



Alexander Sauer
Hans Ulrich Buhl
Alexander Mitsos
Matthias Weigold

ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Band 2: Markt- und Stromsystem,
Managementsysteme und Technologien
energieflexibler Fabriken

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Alexander Sauer
Hans Ulrich Buhl
Alexander Mitsos
Matthias Weigold

ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und
Technologien energieflexibler Fabriken

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Begriffen in diesem Buch das generische Maskulinum verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.



Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Liebe Leserinnen und Leser,

vollständige Klimaneutralität 2045 und ein möglichst rasches Ende der Abhängigkeit von fossilen Energieimporten – wir stehen vor großen energiepolitischen Herausforderungen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung versteht sich als Schrittmacher der Energiewende. Bereits im Jahr 2016 haben wir die Kopernikus-Projekte ins Leben gerufen.

Denn: Wer Tempo in der Energiewende will, braucht Spitzenforschung – und einen effektiven Brückenschlag in die Anwendung. Die Kopernikus-Projekte und SynErgie stehen genau hierfür.

Dieser zweite SynErgie-Band zeigt die erfolgreiche Arbeit des Projekts. Neben Lösungen für die großen Energieverbraucher hat SynErgie mit der Betrachtung von Kälte- und Wärmeanlagen die Anwendung von Energieflexibilität auch für kleine und mittlere Unternehmen möglich gemacht. Zudem zeigt der erfolgreiche Test der SynErgie-Energiesynchronisationsplattform, dass der Handel mit Flexibilität binnen kürzester Zeit umgesetzt werden könnte.

In den nächsten Jahren gilt es, die in diesem Buch umfassend dargestellten Konzepte in die breite Anwendung zu bringen und, wo nötig, weiterzuentwickeln. Denn nur mit Lösungen wie denen aus SynErgie lässt sich die Energiewende erfolgreich umsetzen.

Bei angewandter Energieflexibilität profitieren im Idealfall alle:

- Die Umwelt, weil Energieflexibilität die Integration von erneuerbaren Energien im Netz unterstützt.
- Die Bürgerinnen und Bürger, weil wir durch Energieflexibilisierung weniger Netzausbau benötigen.
- Die Netzbetreiber, weil ihnen die Flexibilitäten bei der Stabilisierung der Stromnetze helfen.
- Und die Unternehmen, die ihre Stromnachfrage an das Stromangebot anpassen, weil sie ihre Flexibilität als Dienstleistung verkaufen können und von niedrigeren Stromkosten profitieren.

Die Ergebnisse des SynErgie-Projekts zeigen eindrücklich, was Forschung bewirken kann, wenn Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft von Anfang an zusammenarbeiten. Ich bin beeindruckt und stolz, dass der Plan unserer Kopernikus-Initiative so erfolgreich aufgegangen ist: SynErgie ist Forschung, die Wirkung zeigt. Dafür vielen Dank an alle Projektpartner und allen Leserinnen und Lesern eine anregende Lektüre.

Herzlichst,

Ihr Christoph Rövekamp

Leiter des Referats »Energie; Wasserstofftechnologien« im Bundesministerium für Bildung und Forschung

Vorwort der Herausgeber

Liebe Leserinnen und Leser,

seit der Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 sehen sich alle Länder mit der Frage konfrontiert, wie die Zukunft der Energieversorgung gestaltet werden kann und wie klimafreundliche Technologien mit dem Ziel der Klimaneutralität etabliert werden können (United Nations, 2015; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2018). Mit dem Green Deal hat sich die Europäische Union verpflichtet, bis 2050 keine Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen (Europäische Kommission, 2019). Die deutsche Bundesregierung möchte dieses Ziel bereits im Jahr 2045 erreichen (Bundes-Klimaschutzgesetz, 2019).

Eine wichtige Säule hierfür ist das Vorantreiben des Ausbaus erneuerbarer Energien. Deutschland ist in diesem Bereich Technologie- und Innovationstreiber und konnte im Jahr 2020 bereits 47,4 Prozent des deutschen Bruttostromverbrauchs durch erneuerbare Energien abdecken. 2021 gab es wegen schlechterer Wetterbedingungen und eines stark steigenden Stromverbrauchs einen Rückgang auf 42,6 Prozent (Bundesnetzagentur, 2021a; Bundesnetzagentur, 2022). Die deutsche Bundesregierung strebt an, bis 2030 einen Anteil der erneuerbaren Energien von 65 Prozent am Bruttostromverbrauch zu erreichen, und das bei weiterhin steigendem Stromverbrauch (Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG, 2021). Die neue deutsche Bundesregierung hat sich diesbezüglich im Dezember 2021 vorgenommen, »neues Tempo in die Energiewende [zu bringen], indem wir Hürden für den Ausbau der Erneuerbaren Energien aus dem Weg räumen« (SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, 2021). Auch global ist ein stark ansteigender Ausbau erneuerbarer Energie mit einem Rekordwert an neu installierter Leistung von 290 GW im Jahr 2021 zu erkennen (International Energy Agency, 2021).

Für eine erfolgreiche Umsetzung solch hoher Anteile erneuerbarer Energien muss ein Energiesystem geschaffen werden, das mit der zunehmend fluktuierenden Stromeinspeisung als Folge des steigenden Anteils erneuerbarer Energien umgehen kann (Fell, 2020; Papaefthymiou et al., 2018). Wie relevant dies ist, zeigt sich auch an der zunehmenden Anzahl von Stunden mit negativen Strompreisen am Day-Ahead-Markt: Diese Stunden mit einem Überschuss erneuerbarer Energien im Stromsystem stiegen von 126 Stunden im Jahr 2015 auf 298 Stunden im Jahr 2020 (Bundesnetzagentur, 2021a).

Für die erfolgreiche Gestaltung der Energiewende rief das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2015 die Kopernikus-Projekte ins Leben und initiierte die bis dahin größte nationale Forschungsinitiative zur Energiewende. Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft entwickeln gemeinsam technologische und wirtschaftliche Lösungen für den Umbau hin zu einem klimaneutralen Energiesystem (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021). Die Kopernikus-Projekte verfolgen vier große Forschungsvorhaben:

- Ariadne – Politische Maßnahmen für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende
- ENSURE – Weiterentwicklung der Stromnetze



- P2X – Umwandlung erneuerbarer Energie in stoffliche Energieträger
- SynErgie – Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung

Eine der großen Herausforderungen bei der Etablierung einer nachhaltigen Versorgung durch erneuerbare Energien liegt in deren fluktuierender Stromerzeugung. Die Leistung aus Windkraft und Photovoltaik schwankt kurzfristig über die Tageszeit sowie langfristig im Jahresverlauf, z. B. durch untertägige, mehrtägige oder saisonale Wetterveränderungen. Um das Stromsystem bei einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien jederzeit im notwendigen Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch zu halten, bedarf es großer Mengen an Energiespeicherkapazitäten, Netzausbau und Sektorenkopplung sowie Flexibilität auf der Verbraucherseite (Babatunde et al., 2020). Solange dies nicht erreicht ist, müssen auf der Erzeugerseite kostenintensive Regeleingriffe erfolgen. Im Jahr 2020 wurden hierfür 1,4 Milliarden Euro aufgewendet und durch die Netzentgelte u. a. von allen Bürgern bezahlt (Bundesnetzagentur, 2021b).

Die aus heutiger Sicht erforderlichen Investitionen in die Energieversorgungs- und Netzinfrastruktur können reduziert werden, wenn sich die Entwicklung weg von einer zentralen, verbrauchsorientierten Erzeugung hin zu einer dezentralen, erzeugungsorientierten Verbrauchssteuerung bewegt (Raquet und Liotta, 2013; Deutsche Energie-Agentur, 2017). Innerhalb dieses Paradigmenwechsels wird die Industrie, die in Deutschland einen Anteil von etwa 44 Prozent am Stromverbrauch hat, mehr und mehr dazu übergehen müssen, sich dem Energieangebot flexibel anzupassen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2021). Der Faktor Energie wird somit zu einer variablen Planungs- und Steuerungsgröße im Produktionsbetrieb.

Hier setzt das Kopernikus-Projekt SynErgie mit über 90 Projektpartnern aus Industrie, Wissenschaft, Verbänden und Zivilgesellschaft an. Industrielle Prozesse werden weiterentwickelt, elektrifiziert und flexibilisiert mit dem Ziel, Strom vermehrt dann zu nutzen, wenn er reichlich vorhanden und damit kostengünstig ist, sowie entsprechend weniger, wenn das Gegenteil der Fall ist. Seit September 2016 forscht im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie deutschlandweit eine ganze Generation an hochmotivierten Wissenschaftlern, um den Technologievorsprung deutscher Unternehmen zu sichern und den Grundstein für eine bessere und klimaneutrale Zukunft zu legen. Die Umstellung des deutschen Energiesystems auf volatile erneuerbare Energien soll dadurch ermöglicht und unterstützt werden.

Wichtige Ergebnisse zum Flexibilitätspotenzial der deutschen Industrie, zu konkreten Anwendungen in der industriellen Produktion sowie zur automatisierten Vermarktung der Flexibilität hatten wir bereits im ersten Band unseres Fachbuchs »Energieflexibilität in der deutschen Industrie« dargestellt (Sauer, Abele und Buhl, 2019). Mit dem vorliegenden zweiten Band greifen wir die Thematik erneut auf und geben Ihnen einen Einblick in zwischenzeitlich zusätzlich erarbeitete, wichtige Ergebnisse. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen!

Es grüßen Sie herzlichst,

Ihr Alexander Sauer, Hans Ulrich Buhl, Alexander Mitsos und Matthias Weigold

Im Januar 2022

Die Herausgeber



© Fraunhofer IPA/Rainer Bez

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. **Alexander Sauer**, Jahrgang 1976, ist Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart sowie Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.

Er hat an der RWTH Aachen Maschinenbau und Betriebswirtschaftslehre studiert, am WZL der RWTH Aachen promoviert und dort verschiedene nationale und internationale Forschungs- und Industrieprojekte geleitet. Anschließend war er verantwortliches Mitglied der Geschäftsleitung eines internationalen Automobilzuliefererunternehmens für den Bereich Operations. Alexander Sauer folgte vor seinem Wechsel nach Stuttgart einem Ruf an die Hochschule München, der mit der Leitung des

Labors für angewandte Fertigungstechnik verbunden war. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des Produktionsmanagements sowie der energie- und ressourceneffizienten Produktion.

Prof. Sauer ist Autor zahlreicher Publikationen und national sowie international in verschiedenen Beiratsfunktionen und Gutachtergremien engagiert. Gemeinsam mit Prof. Abele leitete Prof. Sauer die erste dreijährige Förderphase des Kopernikus-Projekts SynErgie. Mit der Verabschiedung von Prof. Abele in den Ruhestand und dem Beginn der zweiten Förderphase hat er die alleinige Leitung übernommen.



© Björn Seitz – kontender.Fotografie

Dr. **Hans Ulrich Buhl**, 1955 in Esslingen geboren, ist Professor für BWL, Wirtschaftsinformatik, Finanz- & Informationsmanagement. Seit 2002 baute er als wissenschaftlicher Leiter das von der bayerischen Staatskanzlei eingerichtete Kernkompetenzentrum Finanz- & Informationsmanagement und zusätzlich seit 2011 die Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT in Augsburg und Bayreuth auf. Er ist beiden Einrichtungen weiterhin eng verbunden.

Prof. Buhl studierte von 1976 bis 1981 Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Karlsruhe sowie Industrial Engineering and Operations Research an der University of California in

Berkeley, USA. 1980 erfolgte der Abschluss als Master of Science in Berkeley und 1981 die Prüfung zum Diplom-Wirtschaftsingenieur (Informatik/OR) in Karlsruhe. Dort promovierte er 1982 und habilitierte sich 1985 mit Arbeiten über Anwendungen der dynamischen Optimierung auf volks- und betriebswirtschaftliche Problemstellungen. Nach sieben Jahren in der Praxis bei IBM und einem ersten Lehrstuhl in Gießen hatte er von August 1994 bis September 2021 einen Lehrstuhl an der



Universität Augsburg inne. Daneben war Hans Ulrich Buhl von 2004 bis 2021 federführender Wissenschaftler und Vorsitzender des Boards des vom Elitenetzwerk Bayern und zehn renommierten Praxispartnern (darunter Allianz, Hilti, Infineon, KPMG, Kuka, MAN Energy Solutions, Oetker-Gruppe und ZEISS) geförderten Elitenetzwerk-Studiengangs »Finanz- & Informationsmanagement« der TU München, Universität Augsburg und Universität Bayreuth. Das CHE-Ranking zeichnete dieses Programm wiederholt als besten Masterstudiengang aus.

Im Verband der Hochschullehrerinnen und Hochschullehrer für Betriebswirtschaft (VHB) wurde er 2017 bzw. 2018 jeweils einstimmig in den Gesamtvorstand bzw. zum stellvertretenden Vorsitzenden und 2020 einstimmig zum Vorsitzenden des Gesamtvorstandes des VHB gewählt. Er ist Mitglied der wissenschaftlichen Kommission Wirtschaftsinformatik (WKWI), des Fachkollegiums für Betriebswirtschaftslehre der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und des Kuratoriums der Bayerischen EliteAkademie. Seine Forschung konzentriert er aktuell insbesondere auf die Bereiche Digital Energy & Smart Districts.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie verantwortet Prof. Buhl das Cluster »Markt- und Stromsystem« und ist stellvertretender Leiter des Clusters »Energieflexible Modellregion Augsburg«.



© alexlevay

Alexander Mitsos ist Professor am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik der Aachener Verfahrenstechnik (AVT) an der RWTH Aachen University sowie Direktor des IEK-10 (Energy Systems Engineering) am Forschungszentrum Jülich. Seit 2018 ist er Associate Editor des Elsevier Journals »Computers & Chemical Engineering« und Teil des Editorial Boards des »AAAS Science Advances«, und seit 2020 Programming Chair der AIChE CAST Division.

Prof. Mitsos erhielt 1999 das Diplom für Chemieingenieurwesen an der Universität Karlsruhe und promovierte 2006 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) auf dem Gebiet der Systemverfahrenstechnik. Nach Positionen als Senior Engineer in der RES Group Inc. (2006 bis 2007) und als Junior Research Group Leader am AICES, RWTH Aachen University (2008) war Prof. Mitsos von 2009 bis 2012 Assistant Professor am Department of Mechanical Engineering des MIT.

Die Forschungsschwerpunkte von Alexander Mitsos sind einerseits optimale Entwicklung und Betriebsführung von chemischen und biotechnologischen Prozessen und Energiesystemen sowie andererseits Theorie und Algorithmen für deterministische globale Optimierung. Dazu werden Methoden aus Data Science und Machine Learning eingesetzt und weiterentwickelt.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie verantwortet Prof. Mitsos diverse Teilprojekte im Cluster »Schlüsselproduktionsprozesse«. Zudem ist er Projektverantwortlicher für die Nachwuchsförderung der Promovierenden.



©PTW/S. Scheibner

Prof. Dr.-Ing. **Matthias Weigold**, Jahrgang 1977, hat Maschinenbau an der TU Darmstadt studiert. Während seiner Promotion am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt forschte er in den Bereichen Automatisierungstechnik und Fertigungstechnologieentwicklung u. a. an der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern.

Heute ist Prof. Weigold Leiter des PTW. Zuvor war er bei der Heidelberger Druckmaschinen AG und bei der SAP SE im Bereich Digital Manufacturing in führenden Funktionen tätig. Seit der Übernahme der Institutsleitung von Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele hat Matthias Weigold die Forschungsaktivitäten auf

Digitalisierung, künstliche Intelligenz und klimaneutrale Produktion ausgerichtet. Er verantwortet die Aktivitäten der ETA-Fabrik (Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion) sowie des Fertigungstechnologiebereichs des PTW.

Prof. Weigold engagiert sich in unterschiedlichen nationalen und internationalen Gutachtergremien und ist Autor zahlreicher Publikationen, u. a. im Bereich der energieflexiblen und energetisch optimierten Produktion. Im Kopernikus-Projekt SynErgie leitet er das Cluster »Produktionsinfrastruktur«.

Literatur

2019. BUNDES-KLIMASCHUTZGESETZ. KSG [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>

2021. ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ – EEG 2021 (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien). EEG [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/

BABATUNDE, O.M., J.L. MUNDA und Y. Hamam, 2020. Power system flexibility: A review. Energy Reports 6, 101–106. ISSN 23524847. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.egy.2019.11.048

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2021. Kopernikus-Projekt für die Energiewende [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende_node.html

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT, 2018. Atomkraftwerke in Deutschland. Abschaltung der noch betriebenen Reaktoren gemäß Atomgesetz (AtG) [Zugriff am: 16. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/aufsicht-ueber-kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland/>



- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, 2021. Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021 [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6
-
- BUNDESNETZAGENTUR, 2021a. Das Jahr 2020 – Stromerzeugung und Stromhandel im Überblick [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/204970/202398>
-
- BUNDESNETZAGENTUR, 2021b. Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit – Gesamtes Jahr 2020 [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2020.html
-
- BUNDESNETZAGENTUR, 2022. Der Strommarkt im Jahr 2021 [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/206664>
-
- DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR, 2017. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess. Zwischenfazit. Berlin: Deutsche Energie-Agentur [Zugriff am: 12. März 2018]. Verfügbar unter: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9214_dena-Leitstudie-Integrierte-Energiewende_Zwischenfazit.pdf
-
- EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2019. Der europäische Grüne Deal [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
-
- FELL, M.J., 2020. Just flexibility? Nature Energy 5(1), 6–7. Nature Energy. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41560-019-0510-3
-
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. Renewables 2021. Analysis and forecast to 2026 [Zugriff am: 3. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>
-
- PAPAEFTHYMIU, G., E. HAESSEN und T. SACH, 2018. Power System Flexibility Tracker: Indicators to track flexibility progress towards high-RES systems. Renewable Energy 127, 1026–1035. ISSN 09601481. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.renene.2018.04.094
-
- RAQUET, C. und G. LIOTTA, 2013. Datenübertragungstechnologien in Smart Metering und Smart Grids. In: C. Aichele und O.D. Doleski, Hg. Smart Meter Rollout. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 389-402. ISBN 978-3-8348-2439-4.
-
- SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.
-
- SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, 2021. Koalitionsvertrag: Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf
-
- UNITED NATIONS, 2015. Paris Agreement [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
-

Inhalt

	Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung	3
	Vorwort der Herausgeber	4
<hr/>		
A	Das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem	25
<hr/>		
A.1	Gestaltung des aktuellen und zukünftigen Markt- und Stromsystems	29
	Management Summary	30
	Autoren	30
1	Motivation	32
2	Herausforderungen der Energieflexibilitätsvermarktung und (Weiter-) Entwicklung von kurzfristigen Anreizen für Energieflexibilität	32
2.1	Gegenwärtige Hemmnisse der Energieflexibilitätsvermarktung	32
2.2	Energieflexibilitätsvermarktung profitabel gestalten	35
3	Ein Strommarktdesign 2030–2050 zur Schaffung von langfristigen Anreizen für Energieflexibilität	46
3.1	Strommärkte und Systemdienstleistungen	46
3.2	Ziele und Erfolgsfaktoren eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns	48
3.3	Gestaltungsoptionen für ein zukunftsfähiges Strommarktdesign	49
3.4	Strategische Gesichtspunkte eines zukünftigen Strommarktdesigns	53
3.5	Vision eines Strommarktdesigns 2030–2050	55
3.6	Ausgestaltung des Übergangs in ein zukunftsfähiges Strommarktdesign 2030–2050	57
4	Energieflexibilität in einem zukunftsfähigen europäischen Strommarktdesign	64
5	Literatur	64
<hr/>		
A.2	Potenzialanalyse und systemische Betrachtung	73
	Management Summary	74
	Autoren	74
1	Ausgangssituation und Zielsetzung	76
2	Energieflexibilitätsaudits	76
2.1	Methodische Anforderungen und allgemeine Struktur des Energieflexibilitätsaudits	77



2.2	Phase I: Identifizierung und Charakterisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen	78
2.3	Phase II: Bewertung des EFM-Katalogs	82
3	Analyse der Energieflexibilitätspotenziale	83
3.1	Energieflexibilitätspotenziale der deutschen Industrie	83
3.2	Regionalisierung der Energieflexibilitätspotenziale	88
3.3	Internationales Energieflexibilitätspotenzial	90
4	Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und CO ₂ -Emissionen	93
4.1	Abschätzung der CO ₂ -Reduzierung beim Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen	93
4.2	Auswirkungen von industriellen CO ₂ -Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien	97
4.3	Flexibilität und Kreislaufwirtschaft bei ausgewählten, disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken	104
5	Systemische Kosten-Nutzen-Abschätzung	106
5.1	Methodik zur systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung	106
5.2	Auswahl, Charakterisierung und Matching der Einsatz- und Flexibilitätsoptionen	107
5.3	Systemisches Kosten-Nutzen-Verhältnis von Flexibilitätsoptionen für stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen	109
6	Fazit	113
7	Literatur	114
<hr/>		
A.3	Energieflexible Modellregion Augsburg	117
	Management Summary	118
	Autoren	118
1	Ausgangssituation und Zielsetzung	121
2	Lösungsbausteine der regionalen Vermarktung von industrieller Energieflexibilität	122
2.1	Ökonomischer Lösungsbaustein: Lokaler Flexibilitätshandel	123
2.2	Technische Lösungsbausteine: IKT-Lösungen für regionale Nachfrageflexibilität	124
2.3	Gesellschaftliche Lösungsbausteine	125
3	Befähigung von energieflexiblen Fabriken in der Region Augsburg	128
3.1	Beschreibung des angewandten Vorgehens in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	128

3.2	Themenfelder der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	130
3.3	Anwendungsfälle in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	133
3.4	Konzeptioneller Testbetrieb der Anwendungsfälle	146
4	Weiterentwicklung und Übertragung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	148
4.1	Energieflexibilitätspotenzial und CO ₂ -Einsparung	148
4.2	Technische Übertragbarkeit auf weitere Regionen	148
4.3	Gesellschaftliche Perspektive zur erfolgreichen Weiterentwicklung	152
5	Fazit und Ausblick	155
6	Literatur	156
B Managementsysteme für energieflexible Fabriken		159
B.1 Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung		163
	Management Summary	164
	Formelverzeichnis	164
	Autoren	164
1	Einleitung	166
2	Werkzeuge zur Energieflexibilitätspotenzialanalyse	167
2.1	Grundlagen	167
2.2	Schnell-Check-Tool	168
2.3	Energieflexibilitätsaudit	168
2.4	E-Flex-Scanner	168
2.5	Flexibilitätseinsatzplanungstool	169
3	Werkzeuge zur Konzeption und Planung	170
3.1	Grundlagen und Anwendungsbeispiel	170
3.2	Technische Umsetzung	171
3.3	Beispielhafte Demonstration der Anwendung	173
3.4	Zusammenfassung	175
4	Umsetzung und Implementierung am Beispiel von Speicher-Wandler-Systemen	176
4.1	Digitaler Retrofit für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen	176
4.2	Anwendungsbeispiel	179
4.3	Zusammenfassung	181



5	Operative Energieflexibilitätsvermarktung	181
5.1	Die Plattform »Flexys« zur Vermarktung von Energieflexibilität	181
5.2	Forschungs- und Vermarktungsansatze	182
5.3	Plattform-Konzept zur Vermarktung von Energieflexibilität	182
5.4	Funktionsweise und Einsatz von »Flexys«	183
6	Controlling und Monitoring am Beispiel Last- und Flexibilitätsmanagement	184
6.1	Grundlagen	184
6.2	Last- und Flexibilitätsmanagement in der Kunststoffproduktion	185
6.3	Last- und Flexibilitätsmanagement in der Automobilindustrie	190
6.4	Zusammenfassung	193
7	Betriebsoptimierung	194
7.1	Grundlagen	194
7.2	Anwendungsfall	199
7.3	Zusammenfassung	204
8	Zusammenfassung und Ausblick	205
9	Literatur	206
<hr/>		
B.2	Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung	211
	Management Summary	212
	Formelverzeichnis	212
	Autoren	213
1	Einleitung	214
1.1	Betrieb des Elektrostahlwerks	214
1.2	Fluktuation des Energiebedarfs	215
2	Vorhandene Planungsinstrumente	217
2.1	Monatlicher Produktions- und Energieplan	217
2.2	Ablaufplanung im Stahlwerk	219
2.3	Monatlicher Instandhaltungsbericht	220
2.4	Lastmanagement	222
3	Entwicklung einer neuen Planungsplattform	224
3.1	Vorbemerkungen und Zielsetzungen	224
3.2	Erneuerung der Ablauf- und Energieplanung im Stahlwerk	225
3.3	Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs	229

3.4	Nutzung von Energieflexibilität	230
3.5	Ermittlung des 15-Minuten-Forecasts	232
4	Decision-Support-Tool zur Prüfung von Energieflexibilitätsmaßnahmen	233
5	Literatur	235
<hr/>		
B.3	Integration der Flexibilitätsvermarktung	237
	Management Summary	238
	Autoren	238
1	Einleitung	240
1.1	Einordnung und Motivation	240
1.2	Ziele der Energiesynchronisationsplattform	241
2	Referenzarchitektur	242
2.1	Energiesynchronisationsplattform	242
2.2	Marktplattform	243
2.3	Marktplattformseitige Services	246
2.4	Unternehmensplattform	246
2.5	Unternehmensplattformseitige Kernkomponenten und Services	248
3	Energieflexibilitätsdatenmodell	249
3.1	Notwendigkeit des Datenmodells	249
3.2	Ziel und Zweck des Datenmodells	250
3.3	Klassen des Datenmodells	250
3.4	Exemplarische Beschreibung	253
4	Prozesse und Informationsflüsse	255
4.1	Prozessmodell der Energiesynchronisationsplattform	255
4.2	Umsetzung von Prozessen	257
5	Informationstechnische Sicherheit	261
5.1	Maßnahmen des Security-Prozesses	261
5.2	Umsetzungsmaßnahmen	266
6	Demonstratoren	269
6.1	Übersicht der Demonstratoren	269
6.2	Wichtigste Erkenntnisse	271
7	Fazit und Ausblick	271
8	Literatur	272



C	Technologien für energieflexible Fabriken	277
C.1	Chlor-Alkali-Elektrolyse	281
	Management Summary	282
	Formelverzeichnis	282
	Autoren	283
1	Grundlagen und Potenziale der Chlor-Alkali-Elektrolyse	284
1.1	Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse	284
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Chlor-Alkali-Elektrolyse	286
1.3	Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse bei der Covestro Deutschland AG	288
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	289
2	Technische Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	290
2.1	Auswirkung flexibler Fahrweise auf die Langzeitstabilität	290
2.2	Spülverhalten einer Chlor-Alkali-Elektrolysezelle	291
3	Wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	293
3.1	Energieflexibilitätsoptionen und ihre Auswirkungen auf den Gesamtprozess	293
3.2	LCA-Studie der Energieflexibilitätsmaßnahmen	293
4	Literatur	295
C.2	Lastflexible Extraktion biobasierter Carbonsäuren	297
	Management Summary	298
	Formelverzeichnis	298
	Autoren	298
1	Grundlagen und Potenziale der elektrifizierten Carbonsäureherstellung	299
1.1	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	304
2	Technische Umsetzung	307
3	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	313
4	Literatur	315

C.3 Flexible Luftzerlegungsanlagen	319
Management Summary	320
Autoren	321
1 Grundlagen und Potenziale von energieflexiblen Luftzerlegungsanlagen	322
1.1 Energieflexible Luftzerlegungsanlagen	322
1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	323
1.3 Flexible Luftzerlegungsanlagen bei Linde Engineering	324
1.4 Flexible Kompressoren bei MAN Energy Solutions	324
1.5 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	325
2 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	327
2.1 Robustifizierung des Hauptwärmeübertragers	327
2.2 Erweiterter Lastbereich der Kompressoren	330
2.3 Flexible Betriebsstrategien und Digitale Zwillinge	336
3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	341
4 Literatur	341
C.4 Papierherstellung	345
Management Summary	346
Autoren	347
1 Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Papierherstellung	348
1.1 Energieflexible Papierherstellung	348
1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieflexiblen Papierherstellung	350
1.3 Energieflexible Papierherstellung bei UPM	351
1.4 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	352
2 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	355
2.1 Standort Plattling: Energieflexibilität unter Desinvestitionsbedingungen »DesFlex«	356
2.2 Standort Schongau: Energieflexibilität in der Halbstofffertigung »FlexPulp«	357
2.3 Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Skalierbare energieflexibilitätsfördernde IT-Architektur »EnFlex«	358
3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	359
3.1 Standort Plattling: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360



3.2	Standort Schongau: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360
3.3	Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Wirtschaftlichkeit der IT-seitigen Energieflexibilitätsmaßnahmen	363
4	Literatur	363
<hr/>		
C.5	Aluminiumelektrolyse	367
	Management Summary	368
	Formelverzeichnis	368
	Autoren	369
1	Grundlagen und Potenziale der flexiblen Aluminiumelektrolyse	370
1.1	Energieflexible Aluminiumelektrolyse	370
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Aluminiumelektrolyse	371
1.3	Energieflexible Aluminiumelektrolyse bei der TRIMET Aluminium SE	371
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	372
2	Technische Umsetzung des Digitalen Zwillings	372
2.1	Prozessvorhersagemodell	372
2.2	Magnetohydrodynamik-Modell	379
2.3	Prozessüberwachung: Anodenstrommessung	382
2.4	Digitaler Zwilling zur Steuerung energieflexibler Aluminiumelektrolysezellen	386
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	388
4	Literatur	389
<hr/>		
C.6	Klimatisierungs- und Raumluftechnik	393
	Management Summary	394
	Autoren	395
1	Grundlagen und Potenziale der branchenübergreifenden Klimatisierungs- und Raumluftechnik	396
1.1	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik	396
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen von branchenübergreifender Klimatisierungs- und Raumluftechnik	397
1.3	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei der B+T Oberflächentechnik GmbH	398

1.4	Energieflexible Technologie für klimatisierte Räume und Gebäude in der Industrie am Beispiel eines Kühllagers (Intercool GmbH, Dr. Oetker)	398
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	400
2	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik in der ETA-Fabrik	402
2.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	402
2.2	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	410
3	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei B+T GmbH	412
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme	412
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme	413
4	Literatur	414
<hr/>		
C.7	Prozesskälte	417
	Management Summary	418
	Autoren	419
1	Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung	420
1.1	Energieflexible Prozesskältebereitstellung	420
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung	420
1.3	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der DMK Group	421
1.4	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei Mercedes-Benz	421
1.5	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der Badischen Staatsbrauerei Rothaus	422
2	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	423
3	Prozesskälteversorgung im milchverarbeitenden Gewerbe	424
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	424
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	426
4	Energieflexible Prozesskälteversorgung in der Automobilindustrie	427
4.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	428
4.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	429
5	Energieflexible Prozesskälteversorgung im Brauereigewerbe	431
5.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	432



5.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	435
6	Literatur	437
<hr/>		
C.8	Prozesswärme	439
	Management Summary	440
	Autoren	440
1	Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesswärmebereitstellung	441
1.1	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung	441
1.2	Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung	441
1.3	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Evonik	442
1.4	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Schaeffler	442
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	443
2	Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der chemischen Industrie	444
2.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	444
2.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	448
3	Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der metallverarbeitenden Industrie	449
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	449
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	455
4	Literatur	457
<hr/>		
C.9	Bivalenter Nichteisenmetalldruckguss	459
	Management Summary	460
	Autoren	460
1	Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Technologien im Nichteisenmetalldruckguss	461
2	Energieflexibler Nichteisenmetalldruckguss	462
2.1	Schmelzofen	463
2.2	Beschichtungsprozesses	464
2.3	Recyclingofen	464
2.4	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen im Nichteisenmetalldruckguss	466

2.5	Energieflexibilitätsmaßnahmen des Nichteisenmetalldruckgusses bei der Torun Bark Magnesium GmbH	466
2.6	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	467
3	Technische Umsetzung eines bivalenten Ofens	467
3.1	Vorauswahl des Brennersystems	468
3.2	Steuerung und Regelung	468
3.3	Konstruktion	469
3.4	Numerische Simulation	471
4	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahme	476
5	Literatur	478
<hr/>		
C.10	Bivalente Wärmebehandlung in der Massivumformung	481
	Management Summary	482
	Autoren	482
1	Grundlagen und Potenziale in der Massivumformung	483
1.1	Wärmebehandlung in der Massivumformung	483
1.2	Energieflexibilitätsmaßnahmen bei Hirschvogel Group	483
1.3	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	485
2	Technische Umsetzung der bivalenten Wärmebehandlung in der Massivumformung	486
2.1	Wärmebehandlungsöfen	486
2.2	Konzept zur bivalenten Wärmeversorgung	487
2.3	Simulationsbasierte Untersuchung der Anlage	488
2.4	Ergebnisse der Simulation	490
2.5	Umsetzung der bivalenten Anlage	493
2.6	Fazit der technischen Umsetzung	495
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	497
4	Literatur	498
<hr/>		
C.11	Hybride Beheizung in der Stahlindustrie	501
	Management Summary	502
	Autoren	502
1	Grundlagen und Potenziale einer hybriden Beheizung in der Stahlindustrie	503
1.1	Energieflexible Beheizung in der Stahlindustrie	503



1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahme der Wärmebereitstellung eines hybriden Strahlrohrs	504
1.3	Projektpartner	505
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	506
2	Technische Umsetzung der hybriden Beheizung	506
2.1	Anforderungen	506
2.2	Konzeptentwicklung	507
2.3	Konstruktion des Prototyps	507
2.4	Test der elektrischen Beheizung	508
2.5	Komplettmontage	509
2.6	Test der Gasbeheizung	510
2.7	Betriebsnahe Untersuchungen	511
3	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	513
4	Literatur	514
<hr/>		
C.12	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicher	517
	Management Summary	518
	Autoren	518
1	Grundlagen und Potenziale von Energiespeichertechnologien in der Automobilindustrie	519
1.1	Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher	519
1.2	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung bei Mercedes-Benz	519
1.3	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	520
2	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung in der Automobilindustrie	521
3	Technische Umsetzung der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher	522
3.1	Anwendungsfälle für (hybride) Energiespeicher	523
3.2	Prognosetool für thermische und elektrische Energieverbräuche zum Betrieb hybrider Energiespeichersysteme	526
3.3	Auslegung und Bewertung eines hybriden Energiespeichers im Automobilwerk	528
3.4	Umsetzung des methodischen Vorgehens über ein Simulations- und Analysetool	530

4	Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von hybriden Energiespeichern für ein Automobilwerk	531
	4.1 Fazit und Ausblick	534
5	Literatur	534



Das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem

- A.1 Gestaltung des aktuellen und zukünftigen Markt- und Stromsystems
- A.2 Potenzialanalyse und systemische Betrachtung
- A.3 Energieflexible Modellregion Augsburg



Abschnitt A »Das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem« gibt einen ganzheitlichen Überblick über industrielle Energieflexibilität: von der Gestaltung geeigneter Rahmenbedingungen für die Erschließung von Energieflexibilitätpotenzialen über konkrete Energieflexibilitätsmaßnahmen und -potenziale in Schlüsselproduktionsprozessen und Querschnittstechnologien bis hin zur praktischen Umsetzung und Erprobung der entwickelten Lösungen im Rahmen der Energieflexiblen Modellregion Augsburg.

Kapitel A.1 adressiert sowohl die Weiterentwicklung des aktuellen Markt- und Stromsystems als auch die Ausgestaltung eines zukunftsfähigen Designs für den Strommarkt. Die Spezifikation und Umsetzung eines geeigneten Strommarktdesigns, das physikalische Netzrestriktionen abbildet, tragen zur Hebung der dringend benötigten Energieflexibilitätpotenziale bei. Ein zukunftsfähiges Strommarktdesign setzt sowohl Anreize zur Bereitstellung von bereits bestehenden Energieflexibilitätpotenzialen als auch zur Investition in energieflexible Technologien.

Im Fokus von *Kapitel A.2* steht die Analyse der Energieflexibilitätpotenziale der Industrie im nationalen und internationalen Kontext sowie der systemische Beitrag von Energieflexibilität für das Energiesystem. Die Erprobung und Validierung entwickelter ökonomischer, technischer und gesellschaftlicher Lösungen in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg legt den Grundstein, um die Erschließung von Energieflexibilitätpotenzialen in die unternehmerische Praxis zu überführen.

Im Vordergrund von *Kapitel A.3* steht daher insbesondere die Erschließung und lokale Vermarktung von Energieflexibilität in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg sowie die Analyse der Übertragbarkeit von entwickelten Lösungen auf weitere Regionen.





A.1

Gestaltung des aktuellen und zukünftigen
Markt- und Stromsystems

Management Summary

Das Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, wie Energieflexibilitätspotenziale der Industrie kurz- und langfristig bestmöglich vermarktet und damit gehoben werden können. Dabei bedarf es neben kurzfristigen regulatorischen Änderungen auch einer langfristigen Transformation des Strommarktdesigns hin zu einem regional differenzierten, nodalen Preissystem. Dieses Kapitel geht von aktuellen Hemmnissen der Energieflexibilitätsvermarktung aus, beispielsweise verzerrte Preissignale, Ineffizienzen im Strommarktdesign sowie unsichere Investitionserträge energieflexibler Technologien. Auf dieser Basis zeigt es konkrete Perspektiven auf, wie Energieflexibilität heute und in Zukunft gewinnbringend für das Stromsystem und für Unternehmen genutzt werden kann. Neben Änderungen in der Regulatorik und im Strommarktdesign spielen dabei auch der Einsatz digitaler Technologien, die Schaffung lokaler Vermarktungsmöglichkeiten sowie die Gestaltung von Versicherungsprodukten und Energieflexibilitätsanreizen im gesamteuropäischen Verbundsystem eine entscheidende Rolle.

Autoren

Bichler, Martin
 bichler@in.tum.de
 Lehrstuhl für Decision Sciences & Systems (DSS),
 Technische Universität München
 Boltzmannstraße 3, 85748 Garching bei München

Buhl, Hans Ulrich
 hans-ulrich.buhl@fim-rc.de
 Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
 management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
 informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
 Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Bühner, Volker
 volker.buehner@eus.de
 Kisters AG
 Pascalstraße 8 + 10, 52076 Aachen

Cam, Eren
 eren.cam@ewi.uni-koeln.de
 Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
 gGmbH (ewi)
 Vogelsangerstraße 321a, 50827 Köln

Ebinger, Katharina
 katharina.ebinger@forschungswende.de
 Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
 Marienstraße 19/20, 10117 Berlin

Ganz, Kirstin
 kganz@ffe.de
 Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
 Am Blütenanger 71, 80995 München

Hanny, Lisa
 lisa.hanny@fim-rc.de
 Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
 management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
 informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
 Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Harper, Ryan
 rharper@ffe.de
 Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
 Am Blütenanger 71, 80995 München

Hofmann, Nora
 nora.hofmann@uni-bayreuth.de
 Forschungsstelle für deutsches und europäisches
 Energierecht (FER)
 Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

Kern, Timo
 tkern@ffe.de
 Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
 Am Blütenanger 71, 80995 München

Knörr, Johannes
 knoerr@in.tum.de
 Lehrstuhl für Decision Sciences & Systems (DSS),
 Technische Universität München
 Boltzmannstraße 3, 85748 Garching bei München

Lange, Kurt
 zivilrecht5@uni-bayreuth.de
 Forschungsstelle für deutsches und europäisches
 Energierecht (FER)
 Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

Neuhoff, Karsten
kneuhoff@diw.de
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW)
Mohrenstraße 58, 10117 Berlin

Ober, Steffi
steffi.ober@forschungswende.de
Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
Marienstraße 19/20, 10117 Berlin

Ott, Marion
marion.ott@zew.de
ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH
L 7 1, 68161 Mannheim

Reichmuth, Marcel
marcel.reichmuth@forschungswende.de
Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
Marienstraße 19/20, 10117 Berlin

Richstein, Jörn
jrichstein@diw.de
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW)
Mohrenstraße 58, 10117 Berlin

Richter, Fabian
fabian.richter@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Schmidt, Amelie
amelie.schmidt@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Schöpf, Michael
michael.schoepf@uni.lu
SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and Trust, University of Luxembourg
Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

Schott, Paul
paul.schott@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Sitzmann, Amelie
amelie.sitzmann@ewi.uni-koeln.de
Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (ewi)
Vogelsangerstraße 321a, 50827 Köln

Stöter, Maximilian
maximilian.stoeter@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Wagon, Felix
felix.wagon@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Weibelzahl, Martin
martin.weibelzahl@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Weißflog, Jan
jan.weissflog@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Wuntke, Marian
marian.wunkte@forschungswende.de
Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
Marienstraße 19/20, 10117 Berlin

Zilke, Philip
philip.zilke@zew.de
ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH
L 7 1, 68161 Mannheim

1 Motivation

Autoren: Buhl · Hanny · Weibelzahl

Der zügige und flächendeckende Ausbau erneuerbarer Energien (EE) bringt neue Herausforderungen für das Markt- und Stromsystem, denen begegnet werden muss. In Zeiten hoher EE-Einspeisung kommt es vermehrt zu Netzengpässen, da der Netzausbau im Vergleich zum EE-Ausbau in weiten Teilen Deutschlands noch unzureichend erfolgt ist. Folglich gewinnen im Umgang mit Netzengpässen zusätzliche Netz- und Systemsicherungsmaßnahmen an Bedeutung, die jedoch mit hohen Kosten verbunden sind. Konkret beliefen sich die Kosten im Jahr 2020 auf über eine Milliarde Euro (Bundesnetzagentur, 2021). Darüber hinaus gehen aufgrund von Netz- und Systemsicherungsmaßnahmen und der damit verbundenen Abregelung von EE, z. B. im Zuge des Einspeisemanagements, große Mengen erneuerbaren Stroms verloren. Im Jahr 2020 waren das mehr als sechs TWh (Bundesnetzagentur, 2021).

Zur Behebung dieser (teuren) Ineffizienzen und zur besseren Integration von erneuerbaren Energien (EE) in das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem bedarf es kurz- und langfristiger Maßnahmen, die mithilfe von mehr Energieflexibilität im gesamten Markt- und Stromsystem eine nachhaltige, wirtschaftliche und sichere Stromversorgung gewährleisten. Neben der kurzfristigen Erschließung von Energieflexibilitätspotenzialen sowie der Weiterentwicklung bestehender Technologien und regulatorischer Rahmenbedingungen wird die Entwicklung eines langfristigen Markt- und Stromsystems 2030–2050 benötigt. Eine besonders vielversprechende Option zur langfristigen Gestaltung des Markt- und Stromsystems ist der Übergang in ein neues, nodales Preissystem, das verstärkt auftretende Netzknappheiten adäquat bepreist. Nur durch eine integrierte Betrachtung der kurzfristigen Erschließung von Energieflexibilitätspotenzialen sowie der langfristigen Transformation des Strommarktdesigns kann sichergestellt werden, dass Energieflexibilitätspotenziale heute und in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende in Deutschland und auf europäischer Ebene leisten können (Bichler et al., 2022).

2 Herausforderungen der Energieflexibilitätsvermarktung und (Weiter-)Entwicklung von kurzfristigen Anreizen für Energieflexibilität

Autoren: Buhl · Bühner · Cam · Harper · Hofmann · Kern · Lange · Richter · Schöpf · Schott · Stöter · Wagon · Weibelzahl · Weißflog

2.1 Gegenwärtige Hemmnisse der Energieflexibilitätsvermarktung

Derzeit stehen der Vermarktung von Energieflexibilität eine Vielzahl von Hemmnissen entgegen. Hierzu gehören ökonomische, regulatorische, technologische, informationstechnische, verhaltensbedingte, organisatorische und kompetenzbezogene Hemmnisse (Olsthoorn et al., 2015; Sauer et al., 2019).

Im Folgenden wird auf die ökonomischen und regulatorischen Hemmnisse näher eingegangen, da diese die Vermarktung bestehender Energieflexibilitätspotenziale und ebenso die Profitabilität von Investitionen in Energieflexibilitätsmaßnahmen – und somit deren Erschließung – maßgeblich beeinflussen. Im Bereich ökonomischer Hemmnisse werden eingeschränkte Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität sowie eine hohe Komplexität bei Investitions- und Vermarktungsentscheidungen adressiert. Daneben werden im Bereich regulatorischer Hemmnisse hohe fixe Stromkostenbestandteile, die aktuelle Netzentgeltsystematik, Konflikte mit Effizienzvorgaben bei der Umlagenbefreiung, die Kategorisierung der Beschaffungskosten für Energieflexibilitätsdienstleistungen für (Verteil-)Netzbetreiber sowie eine fehlende regionale Preisdifferenzierung im gegenwärtigen Strommarktdesign adressiert.

2.1.1 Ökonomische Hemmnisse

Industrieunternehmen können durch Energieflexibilität Energiebezugskosten senken bzw. Erlöse aus der Vermarktung von Energieflexibilität erzielen. Gegenwärtig stehen der Erschließung von Energieflexibilitätspotenzialen jedoch eingeschränkte Vermarktungsmöglichkeiten sowie Unsicherheiten und Komplexitäten bei Investitions- und Vermarktungsentscheidungen entgegen:

- **Eingeschränkte Vermarktungsmöglichkeiten:** Grundsätzlich bestehen für energieflexible Fabriken gegenwärtig nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten, Energieflexibilität gewinnbringend zu vermarkten. Dies betrifft beispielsweise lokale Möglichkeiten zur Vermarktung von Energieflexibilität. Auf den unteren Netzebenen (Nieder- und Mittelspannung) entsteht aufgrund der überwiegend dort stattfindenden EE-Einspeisung sowie der Elektrifizierung im Rahmen der Sektorenkopplung (z. B. Wärmepumpen oder Elektromobilität) ein zunehmender Bedarf an Energieflexibilität (Sauer et al., 2019). Aus der Perspektive der (Verteil-)Netzbetreiber mangelt es jedoch noch immer an Werkzeugen für einen effizienten Einsatz von Energieflexibilitätsoptionen auf der Nachfrageseite (Özalay et al., 2019; Severin et al., 2019). (Verteil-)Netzbetreiber adressieren lokale Netzengpässe gegenwärtig insbesondere über Maßnahmen des Einspeisemanagements, wobei es zur Abregelung der Stromerzeugung aus EE kommt. Demgegenüber bleiben Maßnahmen zur Bereitstellung von Energieflexibilität auf der Nachfrageseite mangels marktfähiger Lösungen und damit verbundener Anreize ungenutzt. Zusätzlich schränken hohe Zugangsvoraussetzungen für die Teilnahme an Regelenergiemärkten eine Vermarktung von Energieflexibilität ein. Um aktiv an Regelenergiemärkten teilnehmen zu können, müssen Anbieter von Energieflexibilität einen Präqualifikationsprozess erfolgreich bestehen. Dieser aktuell sehr langwierige Prozess ist formal und technisch anspruchsvoll, was eine Barriere für die Teilnahme von Industrieunternehmen an Regelenergiemärkten darstellen kann (Ehrhart et al., 2021; Belica et al., 2016). Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen verfügen nur bedingt über die notwendigen Kenntnisse im Bereich des Energiemanagements, um einen Präqualifikationsprozess erfolgreich zu durchlaufen. Viele kleine und mittlere Unternehmen haben jedoch einzeln und insbesondere in Summe einen erheblichen Stromverbrauch, sodass auch diese vorhandenen Energieflexibilitätspotenziale für ein Gelingen der Energiewende unbedingt gehoben werden müssen.

- **Komplexität bei Investitions- und Vermarktungsentscheidungen:** Einerseits sind Industrieunternehmen mit einer hohen Unsicherheit und Komplexität bei der Bewertung von Investitionsalternativen für Energieflexibilitätsmaßnahmen konfrontiert. Dabei existieren aktuell insbesondere Unsicherheiten bzgl. der Wirtschaftlichkeit bestehender Vermarktungsmöglichkeiten. Vor dem Hintergrund unsicherer Preisentwicklungen auf den Strom- und Energieflexibilitätsmärkten stellt die frühzeitige Identifikation ökonomischer Risiken sowie deren Berücksichtigung bei der Bewertung unterschiedlicher Investitionsalternativen die Industrieunternehmen vor erhebliche Herausforderungen. Andererseits sind energieflexible Industrieunternehmen mit regelmäßig zu treffenden operativen Vermarktungsentscheidungen konfrontiert. In diesem Zusammenhang sind neben möglichen Erlösen durch den Energieflexibilitätseinsatz (z. B. durch die gezielte Nutzung von Strompreisschwankungen) auch die entstehenden Kosten (z. B. aufgrund erhöhter Netzentgelte, s. u.) zu berücksichtigen. Die fortlaufende und integrierte Bewertung möglicher Erlöse und Kosten durch den Energieflexibilitätseinsatz stellt energieflexible Industrieunternehmen somit vor umfassende und komplexe Entscheidungsprobleme.

2.1.2 Regulatorische Hemmnisse

Neben ökonomischen Hemmnissen existieren regulatorische Hemmnisse, die der Erschließung von Energieflexibilitätspotenzialen entgegenstehen (Buhl et al., 2021):

- **Hohe fixe Stromkostenbestandteile:** Zunächst setzen sich die Stromkosten für die meisten Industrieunternehmen derzeit zu einem großen Teil aus fixen, staatlich veranlassten Stromkostenbestandteilen zusammen (z. B. Abgaben, Umlagen oder Steuern). Vor diesem Hintergrund kommen Marktpreissignale, die den Energieflexibilitätsbedarf maßgeblich widerspiegeln, gegenwärtig – sofern überhaupt – nur stark abgeschwächt bei den meisten Industrieunternehmen an (Frontier Economics Ltd. und BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, 2016; Agora Energiewende, 2014; Ländner et al., 2019). Lediglich Industrieunternehmen mit sehr hohem Energieverbrauch unterliegen einer Sonderregelung im Hinblick auf die Zahlung von Abgaben und Umlagen und sind von fixen Stromkostenbestandteilen in teils abgeschwächtem Maße betroffen (s. Regelungen des § 19 II S. 2 StromNEV). Die gegenwärtige Ausgestaltung der Stromkostenbestandteile verzerrt somit die marktbasieren Preissignale und damit auch das wirtschaftliche Potenzial von Energieflexibilitätsmaßnahmen (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2021).
- **Hohe Lastspitzen führen zu hohen Netzentgelten:** Die gegenwärtige Netzentgeltsystematik hindert energieintensive Industrieunternehmen an der Bereitstellung von Energieflexibilität, da diese zu erheblich höheren Netzentgelten führen kann. Energieflexibilitätsmaßnahmen resultieren typischerweise in einem Abweichen von gleichmäßigen Lastprofilen und somit in Lastspitzen (sowie Lasttälern), z. B. bedingt durch den Hochlauf einzelner Komponenten industrieller Anlagen. Solche Lastspitzen können sowohl die zu entrichtenden Netzentgelte im Zusammenhang mit dem Leistungspreis erhöhen (§ 17 II StromNEV) als auch die Qualifizierung für den Anspruch auf die Gewährung individueller Netzentgelte verhindern (§ 17 II sowie § 19 II S. 2 StromNEV). Aufgrund der bestehenden Netzentgeltsystematik

erfahren energieintensive Industrieunternehmen einen finanziellen Anreiz, ein gleichmäßiges Lastprofil zu erreichen. Sofern durch die Bereitstellung von Energieflexibilität Lastspitzen entstehen, aus denen höhere Netzentgelte resultieren, stellt dies ein erhebliches Hemmnis für die operative Vermarktung und Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Energieflexibilität dar.

- **Effizienzvorgaben bei der Befreiung von Umlagen:** Aus der Befreiung von Umlagen können für energieintensive Industrieunternehmen Konflikte mit Effizienzvorgaben entstehen, da Befreiungen einen Nachweis von Effizienzsteigerungen voraussetzen. Eine Reduzierung der EEG-Umlage setzte beispielsweise den Nachweis eines zertifizierten Energie- oder Umweltmanagementsystems voraus (§ 64 Abs. 1 Nr. 3 EEG). Eine entsprechende Zertifizierung erfordert jährlich nachweisbare Effizienzsteigerungen. Durch die Bereitstellung von Energieflexibilität kann dieser Nachweis erschwert werden, da Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Regel die Energieeffizienz reduzieren (Schott et al., 2019; Kopernikus-Projekt SynErgie, 2021).
- **Netz- und Systemsicherungsmaßnahmen sind attraktiver als marktbasierter Beschaffung von Energieflexibilität:** Ein maßgebliches Hindernis für die marktbasierter Beschaffung von Energieflexibilität besteht in Form von Anreiz- und Regulierungsvorgaben, welche die Kategorisierung der Kostenpositionen für (Verteil-)Netzbetreiber bestimmen. Kosten für die Beschaffung von Energieflexibilitätsdienstleistungen (i. S. d. § 14c Abs. 1 S. 1 EnWG-RegE) gelten ebenso wie Netz- und Systemsicherungsmaßnahmen als dauerhaft nicht beeinflussbare Kostenposition. Der Gleichlauf der Kostenpositionen für Netz- und Systemsicherungsmaßnahmen und eine marktbasierter Beschaffung von Energieflexibilität führt heutzutage dazu, dass (Verteil-)Netzbetreiber weiterhin auf etablierte Netz- und Systemsicherungsmaßnahmen zurückgreifen, da der Aufbau und die Koordination lokaler Energieflexibilitätsmärkte mit zusätzlichen Kosten verbunden ist (z. B. Aufbau vertraglicher Beziehungen). Somit besteht für (Verteil-)Netzbetreiber aktuell noch ein Anreiz, die Abregelung der Stromerzeugung anderen netzdienlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen vorzuziehen.
- **Fehlende regionale Preisdifferenzierung:** Das gegenwärtige Strommarktdesign in Deutschland bildet Netzrestriktionen nicht in den Strompreisen ab. Dies liegt am Einheitspreissystem und mangelnder regionaler Preisdifferenzierung. Es setzt so keine notwendigen Anreize zur lokalen Bereitstellung von und Investition in energieflexible Technologien und Verhaltensweisen (z. B. industrielle Energieflexibilität). Somit werden Flexibilisierungsbedarfe auf lokaler Ebene aktuell auch nicht durch Preissignale aufgezeigt.

2.2 Energieflexibilitätsvermarktung profitabel gestalten

Die Gestaltung einer profitablen Vermarktung von Energieflexibilität ist die Grundvoraussetzung dafür, dass Energieflexibilitätspotenziale erschlossen werden können. Kurzfristig kann der Einsatz von digitalen Tools zur Entscheidungsunterstützung den Industrieunternehmen dabei helfen, Erlöse (und Kosten) der Energieflexibilitätsvermarktung genauer zu verstehen und zielgerichtet zu vermarkten. Darüber hinaus bieten Versicherungsprodukte für die Vermarktung von Energieflexibilität die Möglichkeit, die Hebung von Energieflexibilitätspotenzialen effektiv anzureizen. Auch eine

zielgerichtete Weiterentwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen kann erheblich zur Profitabilität der Energieflexibilitätsvermarktung beitragen, anstatt diese – wie derzeit noch – teilweise sogar zu bestrafen.

2.2.1 Digitale Tools zur Unterstützung von Unternehmen bei der Vermarktung ihrer Energieflexibilität

Verantwortliche Personen in Unternehmen (z. B. Energiemanager), die Energieflexibilität vermarkten möchten, werden aufgrund der Komplexität unterschiedlicher Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität vor große Herausforderungen gestellt. Die komplexe Funktionsweise der verschiedenen Märkte und die hohe Preisvolatilität sorgen dafür, dass auf der Erlösseite für Energieflexibilität Intransparenz besteht und somit eine Wirtschaftlichkeitsbewertung von Investitionen erschwert wird. Digitale Tools können Unternehmen bei der Vermarktung von Energieflexibilität unterstützen.

Das Flexibilitätseinsatzplanungstool (Flex-Tool)

Das Flex-Tool unterstützt dabei, operative Entscheidungen wie das Planen des Einsatzes von Energieflexibilitätsmaßnahmen für den nächsten Tag zu treffen (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2022). Voraussetzung für das Treffen von entsprechenden Entscheidungen ist das Vorliegen der Marktergebnisse der Day-Ahead- und Intraday-Auktion. Unter der Annahme, dass diese Preise direkt an das entsprechende Unternehmen weitergegeben werden (z. B. über einen entsprechenden Stromtarif), können die potenziellen Erlöse und Kosten des Energieflexibilitätseinsatzes sowie dessen Fahrplan berechnet werden. Für Einsatzplanungen mit mehr Vorlaufzeit bedarf es der Nutzung von Preisprognosen, die jedoch mit entsprechender Unsicherheit bei den Erlösen verbunden sind. Somit kann das Flex-Tool genutzt werden, um die Produktionsplanung zu unterstützen. Neben dem operativen Einsatz kann das Flex-Tool auch zur Beantwortung der Frage beitragen, ob Investitionen in Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Nutzung und/oder Erhöhung des Energieflexibilitätsangebots überhaupt sinnvoll sind.

Das Flex-Tool ist als Service über die Marktplattform für Unternehmen abrufbar (*Kapitel B.3*). Zur vereinfachten Nutzung ist es mit einer browserbasierten grafischen Benutzeroberfläche ausgestattet. Industrieunternehmen können ihre Energieflexibilitätsmaßnahmen durch Eingabe weniger Parameter des Energieflexibilitätsdatenmodells (*Kapitel B.3*) erfassen. Als weiteren Input nutzt das Flex-Tool die Marktergebnisse (d. h. die erzielten Preise) der verschiedenen Märkte. Es können sowohl die Märkte für Systemdienstleistungen (abschaltbare Lasten, Regelenergie) als auch die Spotmärkte (Day-Ahead oder Intraday) sowie lokale Energieflexibilitätsmärkte berücksichtigt werden (*Kapitel 2.2.3*). Auf Basis dieses Inputs berechnet das Flex-Tool, zu welchen Zeitpunkten der Einsatz einer Energieflexibilität in welchen Ausprägungen – unter den gegebenen Randbedingungen – auf den verschiedenen Märkten am wirtschaftlichsten wäre (Fahrplanoptimierung). Dazu wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell genutzt. In der Optimierung können weitere Randbedingungen wie eine bestimmte Lastspitze berücksichtigt werden, die höhere Kosten in Form von höheren Netzentgelten verursachen würde. Die verschiedenen Strommärkte (Spotmärkte, Systemdienstleistungsmärkte und lokale Energieflexibilitätsmärkte) werden mithilfe des Optimierers sequenziell durchlaufen. Das

Ergebnis für die Vermarktungsmöglichkeit auf dem jeweiligen Strommarkt wird durch das Flex-Tool als Zeitreihe ausgegeben. Diese beschreibt die mögliche Aktivierung einer Energieflexibilitätsmaßnahme anhand des Energieflexibilitätsdatenmodells. Zusätzlich werden weitere Kenngrößen zu den wirtschaftlichen Erlöspotenzialen sowie zum potenziell erhöhtem Energieverbrauch durch Aktivierung der Energieflexibilität ausgegeben. Zentral ist hierbei die Differenz des Cashflows zum Ausgangsfall ohne Aktivierung der Energieflexibilitätsmaßnahme, da dies die entscheidende Größe zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit darstellt. Durch die Definition von Abhängigkeiten kann die Kombination einzelner Energieflexibilitätsmaßnahmen bewertet werden.

Weitere Systeme zur Entscheidungsunterstützung

Aktuelle Modellierungsarbeiten und Analysen für die Vermarktung von Energieflexibilität betrachten meist Systeme unter statischen Randbedingungen. Dennoch ist die Betrachtung der Unsicherheiten von Prognosen und stochastischen Einflüssen auf Einsatzentscheidungen essenziell, um die Vermarktung von Energieflexibilität in einem dynamischen System abbilden zu können. In diesem Zusammenhang unterstützt das stochastische Einsatzmodell Unternehmen hinsichtlich operativer und strategischer Entscheidungen zur Bereitstellung von Energieflexibilität.

Das Einsatzmodell optimiert die Vermarktung von Energieflexibilität durch Lastverschiebung an den Day-Ahead- und Intraday-Märkten für Industrieprozesse. Es enthält stochastische Komponenten, die die Bewertung von Vermarktungsmöglichkeiten unter Unsicherheit erlauben. Das Einsatzmodell basiert auf einem zweistufigen stochastischen Optimierungsmodell, bei dem die in einer ersten Stufe am Day-Ahead-Markt angebotenen Mengen optimiert und in einer zweiten Stufe auf den Intraday-Märkten angepasst werden können. Das Modell nutzt als Input stündliche Day-Ahead-Preise sowie Preisprognosen für den kontinuierlichen Handel auf dem Intraday-Markt für das Jahr 2030, basierend auf dem Entwicklungspfad C (Poganietz et al., 2019). Die Preisprognosen werden durch einen stochastischen Prozess unter Berücksichtigung der Verteilungen der Prognosefehler von Wind- und Photovoltaik-Erzeugung modelliert. Mit den generierten Preiszeitreihen wird das Reduktionspotenzial der Strombeschaffungskosten unter Unsicherheit mit zwei unterschiedlichen Speicherkapazitäten simuliert. Weiterhin werden der Wert der stochastischen Modellierung (Value of Stochastic Solution (VSS)) sowie der Wert von perfekten Prognosen (Expected Value of Perfect Information (EVPI)) bestimmt. VSS ist der zusätzliche Vorteil eines stochastischen Optimierungsrahmens im Vergleich zu einem deterministischen. EVPI ist der Wert, den ein Entscheidungsträger bereit ist zu zahlen, um perfekte Informationen über die Zukunft zu erhalten.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Mehrwert des stochastischen Optimierungsmodells steigt, wenn umfangreiche Restriktionen zur kurzfristigen Anpassung der Fahrweise der Prozesse bestehen bzw. wenn die Anfahrtsentscheidung schon während der Day-Ahead-Stufe (d. h. der ersten Modellstufe) finalisiert werden muss. »Anfahrt« bedeutet in diesem Kontext, dass die Anlage ausgehend von der Null-Last hochgefahren wird. Dahingegen müssen Anlagen mit flexiblen Anfahrtsbedingungen (d. h. mit hohen Leistungsgradienten), die auch während der Intraday-Stufe hochfahren können, nicht unbedingt eine stochastische Optimierung durchführen. Sie können mit einem Erwartungswertansatz für die Intraday-Preise ähnliche hohe Erlöse erzielen. Die Bedeutung von stochastischen Elementen in der Optimierung von Industrieprozessen steigt somit, je weniger flexibel der Prozess betrieben werden kann, z. B. aufgrund von Vorlaufzeiten. Die angewandten Komponenten

für die Simulation von Preiszeitreihen sowie das entwickelte stochastische Einsatzmodell bieten vielversprechende Möglichkeiten, um z. B. Erweiterungen für Real-Time-Analysen zu implementieren, die Entscheidungsträger bei der Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unter Preisunsicherheit unterstützen.

2.2.2 Modellierung zukünftiger Strompreise auf dem kontinuierlichen Intraday-Markt

Durch die Modellierung von zukünftigen Strompreisen im kontinuierlichen Intraday-Markt können die Erlöspotenziale von Energieflexibilitätsmaßnahmen mit kurzen Aktivierungsdauern bewertet werden. So können zukünftige Vermarktungsstrategien entwickelt und die Integration von flexiblen Anlagen in das Energiesystem unterstützt werden. Für die Modellierung zukünftiger Strompreise können Preisabweichungen zwischen dem Day-Ahead-Markt und dem kontinuierlichen, stündlichen Intraday-Markt herangezogen und auf einen zeitlichen sowie situativen Zusammenhang hin empirisch untersucht werden (Harper, Kern und Roon, 2021). Für den Zeitraum Januar 2018 bis August 2021 liegen diese Preisabweichungen in 86 Prozent der Stunden zwischen $-10\text{€}/\text{MWh}$ und $10\text{€}/\text{MWh}$. Sie weisen einen starken zeitlichen Zusammenhang zur Preisabweichung der vorangehenden Stunde auf. Neben der zeitlichen Abhängigkeit der Preisabweichungen können in den historischen Daten auch Unsicherheiten analysiert werden, die von der Residuallast situationsabhängig sind. *Abbildung 1* stellt dar, dass bei einer niedrigen und hohen Residuallastprognose für Deutschland ($\leq 20\text{ GW}$ und $> 50\text{ GW}$) die Preisunsicherheit und damit die Standardabweichung der Preisabweichungen deutlich höher ist. Bei mittleren Residuallastprognosen weichen die kontinuierlichen Intraday-Preise hingegen weniger stark von den Day-Ahead-Preisen ab.

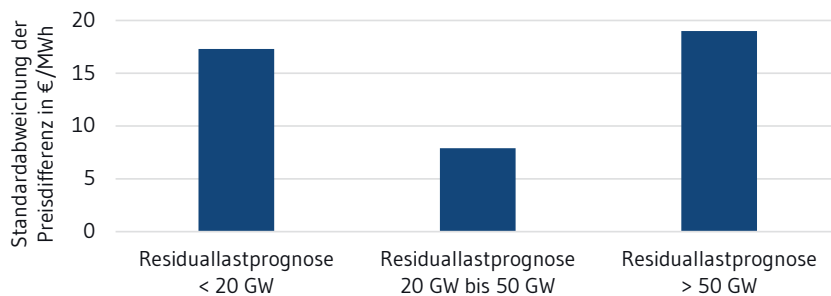


Abb. 1 Standardabweichung der Preisabweichung zwischen Day-Ahead-Markt und stündlichem, kontinuierlichem Intraday-Markt in Abhängigkeit der Höhe der Residuallastprognose für Deutschland

Die Kombination der Ergebnisse dieser ersten Analyse erlaubt die Modellierung zukünftiger Preisabweichungen. Hierzu werden drei Cluster definiert (für eine geringe, mittlere und hohe Residuallastprognose, *Abbildung 1*), die die residuallastabhängigen Preisunsicherheiten widerspiegeln. Über

eine Markov-Kette wird die zeitliche Abhängigkeit der Preisabweichungen modelliert. Unter Berücksichtigung der Residuallastprognose der nächsten Stunde sowie der Preisabweichung der vorangegangenen Stunde ermittelt die Markov-Kette einen neuen Zustand der Preisabweichung. Innerhalb eines Markov-Zustands erfolgt eine stochastische Ziehung, um die reale Verteilung der Preisabweichung zu repräsentieren. Zur Simulation einer stochastischen Jahreszeitreihe stündlicher, kontinuierlicher Intraday-Preise werden im letzten Schritt modellierte zukünftige Day-Ahead-Preise mit den modellierten Preisabweichungen summiert. Die simulierten kontinuierlichen Intraday-Preise weisen eine realitätsnahe zeitliche Abhängigkeit und eine von der Residuallast abhängige Unsicherheit auf, sodass zukünftige Erlöspotenziale von Energieflexibilitäten realistisch abgeschätzt werden können. Die für das Jahr 2030 simulierten kontinuierlichen Intraday-Preise weichen stärker von den Day-Ahead-Preisen ab als jene im Jahr 2021, da es mehr Zeitpunkte mit niedriger Residuallastprognose und damit höherer Preisunsicherheit gibt. Im Rahmen der Simulation steigt die Standardabweichung der Preisabweichungen aufgrund der zunehmenden Anzahl der Zeitpunkte mit niedriger Residuallastprognose von 10,7€/MWh im Jahr 2021 auf 15,7€/MWh im Jahr 2030.

2.2.3 Lokale Vermarktungsmöglichkeiten und -produkte für Energieflexibilität

Neben der Betrachtung von bestehenden Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität auf z. B. Spotmärkten oder Regelleistungsmärkten, auf denen die Kapazitätsgrenzen des Netzes derzeit nicht berücksichtigt werden, bedarf es lokaler Vermarktungsmöglichkeiten. Durch diese kann Energieflexibilität z. B. zur Reduktion von Netzengpässen im Verteilnetz, der Integration von lokal erzeugtem, erneuerbarem Strom sowie der Reduktion von Einspeisemanagement (d. h. der Abregelung von EE) eingesetzt werden (Schermeyer et al., 2018; Neuhoff et al., 2013). In diesem Kapitel werden daher die beteiligten Stakeholder, mögliche Produkte, die Wirkung von Energieflexibilität auf lokaler Ebene sowie Ansätze für Prognosen von lokalen Strompreisen untersucht.

Zur Exploration von lokalen Vermarktungsmöglichkeiten sind zunächst die relevanten Stakeholder und mögliche Vertragskonstellationen zwischen diesen Stakeholdern zu identifizieren. Auf Basis dieser Ergebnisse können notwendige Bestandteile von möglichen Produkten zur lokalen Energieflexibilitätsvermarktung über z. B. einen lokalen Marktplatz bestimmt und wichtige Bestandteile von Produkten zur Energieflexibilitätsvermarktung über einen lokalen Marktplatz identifiziert werden. Diese umfassen: (1) Zeitlicher Vorlauf vor Erfüllung bzw. Gate Closure; (2) Produktdauer bzw. Dauer der definierten Leistungsbereitstellung; (3) Aktivierungsgeschwindigkeit und Art der Leistungsbereitstellung während einer Flexibilitätsleistung; (4) Minimalgebotsgröße (angebotene flexible Leistung); (5) Preisgestaltung: Getrennte oder kombinierte Preise für Leistungsbereitstellung sowie Abruf (Arbeit) von Energieflexibilität; (6) Markträumung: pay-as-bid oder Einheitsbepreisung; (7) Möglichkeit von Blockgeboten. Bei kleinen, lokalen Märkten ist von einer begrenzten Anzahl an Bietern auszugehen, wodurch eine zu große Anzahl von Produktvarianten die Liquidität des Markts stark einschränken kann.

In *Abbildung 2* sind relevante Stakeholder sowie mögliche vertragliche Beziehungen und Kommunikationswege zwischen den Stakeholdern dargestellt. Die Energieflexibilitätsanbieter, die ihre Energieflexibilität über einen lokalen Marktplatz handeln können, sind in *Abbildung 2* links dar-

gestellt. Die Energieflexibilitätsnachfrager, in *Abbildung 2* auf der rechten Seite dargestellt, können über einen (regionalen) Marktplatz angebotene Energieflexibilität kontrahieren und mit Energieflexibilitätsanbietern kommunizieren. Neben dem (Verteil-)Netzbetreiber als Energieflexibilitätsnachfrager, der Energieflexibilität zur Behebung von Netzengpässen im Verteilnetz einsetzen kann, kann der Bilanzkreisverantwortliche durch Energieflexibilität den Einsatz von Ausgleichsenergie vermeiden (Jansen et al., 2015). Sonstige Energieflexibilitätsnachfrager können beispielsweise Aggregatoren darstellen.

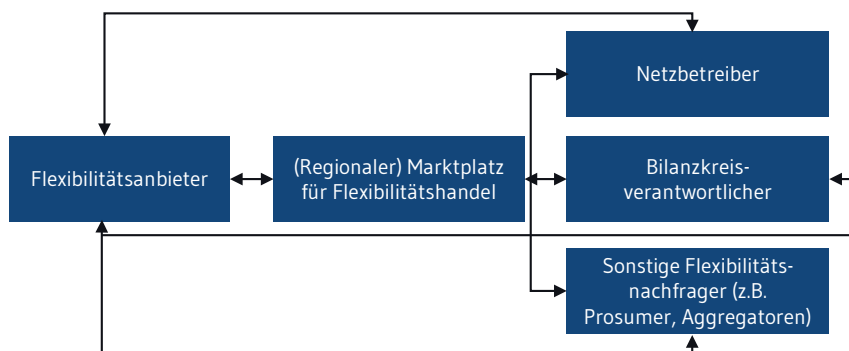


Abb. 2 Darstellung der möglichen vertraglichen Beziehungen und der Kommunikationswege zwischen den Stakeholdern der Energieflexibilitätsvermarktung auf lokaler Ebene

Die vertraglichen Beziehungen zwischen den in *Abbildung 2* dargestellten Stakeholdern müssen über gesetzliche und regulatorische Verpflichtungen oder weitere Vertragsarten wie typisierte, gemischte oder atypische Verträge geregelt werden. Um die grundsätzlichen Aspekte der Zusammenarbeit initial festzuhalten, bevor bekannt ist, wie groß die Zahl der zukünftig abzuschließenden Einzelverträge ist, können zwischen den Stakeholdern Rahmenverträge abgeschlossen werden.

Anhand eines Simulationsmodells kann das Potenzial industrieller Energieflexibilität zur Reduktion des Einspeisemanagements sowie zur Prävention und Behebung von Netzengpässen im Verteilnetz untersucht werden. Die Analyse dieses Potenzials basiert auf Daten des Verteilnetzes in der Modellregion Augsburg sowie der entsprechenden lokalen Stromverbrauchs- und Erzeugungscharakteristika von EE. Das Simulationsmodell setzt sich aus drei Modulen zusammen:

- Das Input-Modell, in dem die Eingangsdaten aufbereitet und Zeitreihen für die Stromerzeugung und den -verbrauch erstellt werden
- Das Lastfluss-Modul, das die Lastflussberechnungen des betrachteten Verteilnetzes auf der Basis der Zeitreihen des Input-Modells nutzt

- Das Analyse-Modul, das die Ergebnisse der Lastflussberechnung auswertet und visuell aufbereitet

Die Ergebnisse des Simulationsmodells zeigen die Auslastung des Verteilnetzes mit und ohne industrielle Energieflexibilität anhand ausgewählter Indikatoren wie der vertikalen Netzlast, der Strombelastung der Leitungen sowie der Einhaltung von Spannungsgrenzen. Das entwickelte Simulationsmodell dient als Grundlage zur kurzfristigen Optimierung des Netzbetriebs und langfristig zur Bestimmung des Netzausbaubedarfs unter Berücksichtigung u. a. industrieller Energieflexibilität.

Die Entwicklung einer Datenbank zur Prognose von Preisen auf lokalen Strommärkten erlaubt die Untersuchung zukünftiger Erlöspotenziale bei der lokalen Vermarktung industrieller Energieflexibilität. Hierbei sind verschiedene Einflussgrößen zu berücksichtigen, z. B. die Verfügbarkeiten der Kraftwerke oder die Einspeisung aus Windkraftanlagen sowie der entsprechenden Korrelation zum Strompreis. Auf der Basis einer internationalen Datengrundlage sowie unterschiedlicher Einflussgrößen kann somit eine Markt- bzw. Zeitreihendatenbank für die Ableitung von lokalen Preisprognosen erstellt werden, die als Grundlage für Simulationen dient. Sobald reale lokale Energieflexibilitätsprodukte verfügbar sind, können deren historische Preiszeitreihen als Basis für Preisprognosen von kurzfristigen Vermarktungsentscheidungen dienen.

2.2.4 Versicherungsprodukte zur Schaffung von Planungs- und Investitionssicherheit für energieflexible Technologien

Der Einsatz energieflexibler Technologien eröffnet Industrieunternehmen die Möglichkeit, Stromkosten zu senken und/oder Erlöse aus der Vermarktung von Energieflexibilität zu erzielen. Demgegenüber sehen sich Industrieunternehmen mit Risiken konfrontiert, die eine grundsätzliche Zurückhaltung gegenüber Investitionen in energieflexible Technologien oder die operative Nutzung von Energieflexibilität nach sich ziehen können. Die Risiken bestehen z. B. in Störungen operativer Abläufe, in technischen Störungen, in ökonomischen Unwägbarkeiten, in der Messung und Verifizierung bereitgestellter Energieflexibilität oder in Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen.

Insbesondere ökonomische Risiken beeinflussen unternehmerische Entscheidungen über die Investition in energieflexible Technologien. Gleichzeitig ist das gegenwärtige Marktumfeld zur Vermarktung von Energieflexibilität mit erheblichen Unwägbarkeiten im Hinblick auf die zu erzielenden Erlöse verbunden. Die Quantifizierung und gezielte Steuerung ökonomischer Risiken bei der Vermarktung von Energieflexibilität stellt daher eine entscheidende Herausforderung dar, um Entscheidungen über Investitionen in die Bereitstellung von Energieflexibilität treffen zu können. Industrieunternehmen brauchen deshalb wirksame Instrumente, um sich gegenüber ökonomischen Risiken abzusichern und damit einhergehend ein verlässliches Umfeld für Investitionen in energieflexible Technologien zu schaffen.

Im Folgenden werden Instrumente in der Gestalt von Versicherungsprodukten gegenüber ökonomischen Risiken aus der Vermarktung von Energieflexibilität vorgestellt (Jäckle et al., 2019). Industrieunternehmen, die als Versicherungsnehmer agieren, wird im Rahmen eines Versicherungsprodukts ein garantierter Grundbetrag an Erlösen aus der Vermarktung bereitgestellter Energieflexibilität zugesichert. Im Gegenzug erfolgt während der Vertragslaufzeit die Entrichtung einer Risikoprämie an einen Versicherungsanbieter. Industrieunternehmen tragen somit nicht mehr das volle ökonomische Risiko, welches sich aufgrund unsicherer Preisentwicklungen aus der Vermarktung von Energieflexibilität ergibt. Im Hinblick auf die Gestaltung möglicher Geschäftsmodelle für Versicherungsanbieter kann dabei unterschieden werden in:

1. Geschäftsmodelle, die ausschließlich eine Absicherung gegenüber ökonomischen Risiken umfassen und einem gewöhnlichen Verhältnis zwischen Versicherungsanbieter und Versicherungsnehmer entsprechen. Hierbei erfolgt die Vermarktung der Energieflexibilität eigenständig durch Industrieunternehmen oder separat durch z. B. einen Aggregator. Die Versicherung deckt ausschließlich das Risiko niedriger Erlöse aus der Vermarktung von Energieflexibilität ab.
2. Geschäftsmodelle, die neben Versicherungsprodukten auch das Angebot umfassender Leistungen rund um die Aggregation (dezentraler) Energieflexibilität sowie deren Abruf und Vermarktung umfassen, z. B. Koordination zentraler Informations-, Steuerungs- und Zahlungsströme. Dies wird bereits teilweise durch Aggregatoren erfüllt.

Die Gestaltung der Versicherungsprodukte beruht auf der Grundidee, dass Versicherungsanbieter die Energieflexibilität einer Vielzahl unterschiedlicher energieflexibler Stromverbraucher (z. B. Industrieunternehmen, Wärmepumpen oder Elektro-Fahrzeuge) bündeln und dabei Risiken nachteiliger Preisentwicklungen reduzieren können. Auf der Grundlage unterschiedlicher Charakteristika der gebündelten Energieflexibilität (z. B. hinsichtlich Abrufdauer, Vorhaltdauer oder Leistungsgradient) und verschiedenen zugrunde liegenden Vertragsausgestaltungen können Diversifikationseffekte realisiert werden (Mijatovic, Rockstuhl und Wagon, 2022). Versicherungsanbieter tragen somit zwar das Risiko nachteiliger Preisentwicklungen, können diesem durch Diversifikation jedoch gezielt entgegenwirken. Industrieunternehmen sind hierzu gewöhnlich nicht in der Lage. Versicherungsanbieter können diesbezüglich Fachwissen aufbauen und eine Vermarktung aggregierter Energieflexibilität auch über mehrere Märkte hinweg effizient abwickeln (z. B. Regelenenergiemärkte, Day-Ahead-Markt, Intraday-Märkte).

Grundsätzlich können Versicherungsprodukte anhand verschiedener Gestaltungsparameter definiert werden (z. B. Niveau der garantierten Vergütung für Energieflexibilität, Risikoprämie an Versicherungsanbieter, optionale Erfolgsbeteiligung an Erlösen, die über das Niveau der garantierten Vergütung hinausgehen). Unterschiedliche Ausgestaltungsformen von Versicherungsprodukten können sich im Hinblick auf das Potenzial zur Minimierung ökonomischer Risiken stark unterscheiden (Jäckle et al., 2019). Zusammenfassend können Versicherungsprodukte einen wichtigen Beitrag zur Erschließung von Energieflexibilität leisten, da diese ein wirksames Instrument darstellen, um marktliche Risiken zu minimieren.

2.2.5 Weiterentwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen

Der technologische Fortschritt bei der Weiterentwicklung von Energieflexibilitätsmaßnahmen stellt den nationalen Gesetzgeber vor die Herausforderung einer zügigen Anpassung und Weiterentwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen für eine zielgerichtete Nutzung von Energieflexibilität. Hierzu zählen die unmittelbare Verankerung von Regelungen zur Energieflexibilitätsbeschaffung in den energiewirtschaftsrechtlichen Vorschriften, die es energieflexiblen Fabriken und Netzbetreibern überhaupt erst ermöglichen, Energieflexibilität nutzbar zu machen.

Energieflexibilitätsvermarktung für energieflexible Fabriken

Energieflexible Fabriken sind grundsätzlich nicht gezwungen, sich mit Blick auf die Versorgungssicherheit energieflexibel zu verhalten. Die Vermarktung von Energieflexibilität ist somit an hinreichende ökonomische Anreize gebunden. Hierzu zählen Privilegierungen bei Abgaben und Umlagen als Netzentgeltbestandteile, die notwendigerweise zu zahlen sind, sofern eine Netznutzung vorliegt (Birkner, Antoni und Hilpert, 2013). So regelt § 118 Abs. 6 S. 1 EnWG gegenwärtig, dass nach dem 31. Dezember 2008 errichtete Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie für einen Zeitraum von 20 Jahren ab Inbetriebnahme hinsichtlich des Bezugs der zu speichernden elektrischen Energie von den Entgelten für den Netzzugang freigestellt sind. Maßgeblicher Anknüpfungspunkt der Gewährung einer Freistellung nach § 118 Abs. 6 S. 1 ist nach § 118 Abs. 6 S. 3 EnWG, dass die elektrische Energie zur Speicherung in einem elektrischen, chemischen, mechanischen oder physikalischen Stromspeicher aus einem Transport- oder Verteilnetz entnommen und die zur Ausspeisung zurückgewonnene elektrische Energie zeitlich verzögert wieder in dasselbe Netz eingespeist wird. Eine Privilegierung für Netzzugangsentgelte hängt damit von einer Rückspeisung in das Netz ab. Damit ergeben sich Abgrenzungsschwierigkeiten in Bezug auf die Einordnung neuartiger energieflexibler Technologien wie Power-to-Heat-Einrichtungen, die ein wesentliches Anwendungsfeld der Zuschaltung von Lasten darstellt (Birkner et al., 2013; Altrock et al., 2016). Gerade bei der Nutzung von ansonsten abzuregelndem Überschussstrom durch eine Umwandlung in einen anderen Energieträger kommt es nicht zu einer Rückverstromung in dasselbe Netz, was nach der aktuellen Regelung einer Freistellung i. S. d. § 118 Abs. 6 EnWG entgegensteht (Agora Energiewende et al., 2014). Um energieflexible Fabriken zu netzdienlichem Verhalten anzureizen, liegt eine Möglichkeit in der Freistellung von Abgaben und Umlagen für sämtliche netzdienlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen. Zukünftig ist daher eine Modifizierung des Wortlauts des § 118 Abs. 6 EnWG dahingehend zu fordern, dass die Freistellung von der Verpflichtung der Netzzugangsentgelte nicht mehr zwingend an eine Rückverstromung geknüpft wird. Sinnvoll erscheint darüber hinaus die Schaffung eines Rechtsrahmens mit Normen, die nicht als reine Übergangsregelungen wie § 118 Abs. 6 EnWG verstanden werden. In Betracht kommt eine an Sinn und Zweck der Energieflexibilitätsmaßnahmen orientierte Privilegierung in Form einer Freistellung von sämtlichen Netzentgeltkomponenten und Umlagen nach dem Merkmal der Netzdienlichkeit des Einsatzes.

Energieflexibilitätsbeschaffung durch Netzbetreiber

Nachfolgend werden zunächst die gegenwärtige Ausgestaltung, Hemmnisse sowie Änderungsmöglichkeiten bei der Energieflexibilitätsbeschaffung durch Netzbetreiber adressiert. Anschließend werden Perspektiven zur Gestaltung geeigneter regulatorischer Rahmenbedingungen der Energieflexibilitätsbeschaffung beleuchtet.

Gegenwärtig ist die Energieflexibilitätsbeschaffung durch Netzbetreiber durch einen nur rudimentär ausgestalteten Rechtsrahmen gekennzeichnet. Maßgebliches Hemmnis für eine effiziente Energieflexibilitätsbeschaffung ist neben der überschaubaren Anzahl von energieflexibilitätsbezogenen Regelungen und deren zum Teil fehlenden Konkretisierungen die damit einhergehende Rechtsunsicherheit. Die engpassorientierte Ab- und Zuschaltung von Lasten i. S. d. § 13 Abs. 1 Nr. 2 i. V. m. § 13 Abs. 6, Abs. 6a EnWG ist grundsätzlich als Energieflexibilitätsoption einzuordnen, da eine zeitliche Verschiebung der Lasten ermöglicht wird. Dies kann helfen, die kostspieligen Abregelungen von konventionellen Anlagen sowie insbesondere EE-Anlagen zu reduzieren und so neben der Versorgungssicherheit auch zum Grundsatz der gesamtwirtschaftlichen Optimierung beitragen (Bertsch et al., 2017). Nach § 13 Abs. 6 S. 1 EnWG haben Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) die Möglichkeit, vertraglich vereinbarte ab- und zuschaltbare Lasten gemäß § 13 Abs. 1 Nr. 2 EnWG in einem diskriminierungsfreien und transparenten Ausschreibungsverfahren zu beschaffen. Für die Beschaffung von Abschaltleistung existiert auf der Grundlage von § 13i Abs. 1 S. 1 EnWG die Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (AbLaV), wonach sich die Beschaffung von Abschaltleistung personell auf Übertragungsnetzbetreiber beschränkt, vgl. § 1 AbLaV. In diesem Kontext zeigt sich zum einen eine Regelungslücke dahingehend, dass eine vergleichbare Konkretisierung des § 13 Abs. 6 EnWG für Zuschaltleistung nach geltendem Recht fehlt; zum anderen, dass ausschließlich Übertragungsnetzbetreiber für die Beschaffung von Zu- und Abschaltleistung i. S. d. § 13 Abs. 6 EnWG adressiert werden. Insoweit ist eine Weiterentwicklung des Rechtsrahmens durch eine Ausweitung des regulatorischen Anwendungsbereichs für die Kontrahierung zuschaltbarer Lasten erforderlich (Buchmüller und Hennig, 2016; Weiser und Schäfer-Stradowsky, 2018). Zunächst ist es für eine erfolgreiche Energieflexibilitätsbeschaffung notwendig, die Verteilnetzbetreiber in den Beschaffungsvorgang einzubinden vor dem Hintergrund, dass der Großteil der engpassbedingten Regelungsbedarfe aufgrund der überwiegend in das Verteilnetz erfolgenden EE-Einspeisung auf der Verteilnetzebene zu verorten ist (Buchmüller und Hennig, 2016; Weiser und Schäfer-Stradowsky, 2018). Regulatorisch ist daher der Anwendungsbereich des § 13 Abs. 6 EnWG auf Verteilnetzbetreiber zu erweitern. Parallel hierzu ist die Schaffung einer Verordnung über zuschaltbare Lasten i. S. d. § 13 Abs. 6 S. 1 EnWG i. V. m. § 13i Abs. 1 S. 1 EnWG anzustreben (Antoni et al., 2016; Agora Energiewende et al., 2014). So kann gewährleistet werden, dass sowohl Netzbetreiber als auch zuschaltbare Lasten als Anbieter von Energieflexibilität ein einheitliches, transparentes und diskriminierungsfreies Verfahren zur Beschaffung von Energieflexibilität durchlaufen können. Parallel zur Ausweitung des Anwendungsbereichs des § 13 Abs. 6 EnWG ist die Vorschrift des § 13 Abs. 6a EnWG dahingehend zu modifizieren, dass Verteilnetzbetreiber ausdrücklich als Nachfrager zuschaltbarer Lasten auftreten können (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2021). Insoweit ist die ersatzlose Streichung des § 13 Abs. 6a S. 5 EnWG zu erwägen, der in seiner aktuellen Fassung eine Begrenzung auf Übertragungsnetzbetreiber im Falle von Engpässen im Übertragungsnetz vorsieht und die Anwendbarkeit des § 14 Abs. 1 S. 1 EnWG ausdrücklich verneint.

Maßgeblicher Faktor für eine erfolgreiche Integration zuschaltbarer Lasten in die Energieflexibilitätsbeschaffung ist ferner die kostenseitige Bewertung dieser Maßnahme. Dem Grundsatz der gesamtwirtschaftlichen Optimierung folgend ist diejenige Maßnahme auszuwählen, die gesamtwirtschaftlich mit den geringsten Kosten verbunden ist (BT-Drs. 19/7375). Um die Zuschaltung von Lasten als konkurrenzfähige Energieflexibilitätsoption sowohl für energieflexible Fabriken als auch für Netzbetreiber attraktiv zu machen, ist eine Einordnung der Kosten zuschaltbarer Lasten in den

Katalog nicht beeinflussbarer Kostenteile i. S. d. § 11 Abs. 2 ARegV erforderlich. So kann zukünftig gewährleistet werden, dass zumindest eine kostenseitige Gleichstellung der Abregelung von Anlagen mit der Möglichkeit der Zuschaltung von Lasten erfolgt. Damit wird bei der Wahl der Energieflexibilitätsmaßnahmen dem Grundsatz der Technologieoffenheit Rechnung getragen (Gneisenau und Hilpert, 2020; Gneisenau, 2021). Ein explizit für die Niederspannungsebene entwickelter Energieflexibilitätsmechanismus ist in § 14a EnWG zu finden, wonach Betreiber von Verteilnetzen denjenigen Lieferanten und Letztverbrauchern im Bereich der Niederspannung, mit denen sie Netznutzungsverträge abgeschlossen haben, ein reduziertes Netzentgelt zu berechnen haben, wenn mit diesen im Gegenzug die netzdienliche Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen, die über einen separaten Zählpunkt verfügen, vereinbart wird (vgl. § 14a S. 1 EnWG). Deklaratorisch weist § 14a S. 2 EnWG darauf hin, dass Elektromobile als steuerbare Verbrauchseinrichtungen gelten. Maßgebliches Hindernis ist die vom Wortlaut des § 14a S. 1 EnWG insoweit offengelassene konkrete Abwicklung und die Zuständigkeit für eine auf der Grundlage einer vertraglichen Vereinbarung erfolgenden Steuerungshandlung hinsichtlich der Vertragsparteien und der steuerungsfähigen Einrichtung. Insoweit ergeben sich aus dem Wortlaut bereits dahingehend Restriktionen, dass ausdrücklich nur Verbrauchseinrichtungen als steuerungsfähig eingeordnet werden. Nach der Intention des Gesetzgebers zum Zeitpunkt der Entstehung des § 14a EnWG im Jahr 2016 wurden darüber hinaus ausschließlich Abschalthandlungen als von der Steuerung umfasst angesehen (BT-Drs. 18/7555). Gänzlich unberücksichtigt bleibt nach geltendem Recht die Möglichkeit der Steuerung von Erzeugungseinrichtungen sowie der Zuschaltung von Lasten. Dabei hat sich der Gesetzgeber zur Zeit der Entstehung der Norm im Jahr 2016 bewusst gegen die Aufnahme von Zuschaltleistung in den Steuerungsmechanismus des § 14a EnWG entschieden (BT-Drs. 18/7555). Für die Aufnahme von Zuschaltleistung in den Anwendungsbereich des § 14a EnWG spricht die veränderte Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur im Zuge der Energiewende, die eine stetig steigende EE-Einspeisung in das Verteilnetz zur Folge hat. So kann gewährleistet werden, dass neben der Steuerung von Lasten auch Erzeugungseinrichtungen netzdienlich gesteuert werden können (Säcker, 2019). Die Erweiterung des Anwendungsbereichs kann entweder durch eine teleologische Extension des Wortlauts des § 14a S. 1 EnWG oder durch eine unmittelbare Änderung des Wortlauts erreicht werden.

Für eine erfolgreiche Erschließung von Energieflexibilitätsmaßnahmen bedarf es vor diesem Hintergrund einer maßgeblichen Weichenstellung zur Festlegung eines übergeordneten transparenten und diskriminierungsfreien Beschaffungsverfahrens, um die einzelnen Rechtsbausteine zu einem einheitlichen Energieflexibilitätsmechanismus zusammenzufügen. In Betracht kommen das für Netzsicherheitsmaßnahmen bereits etablierte kostenbasierte Beschaffungsverfahren sowie das bereits seit längerem in der Diskussion stehende marktbasierende Beschaffungsverfahren. Die zukünftige Präferenz hin zu einer marktbasierenden Beschaffung von Energieflexibilität zeigt sich eindeutig in den europarechtlichen Vorgaben des EU-Winterpakets und hat im nationalen Recht seinen Niederschlag in § 14c EnWG n.F. gefunden. Gemäß § 14c Abs. 1 EnWG n.F. haben Betreiber von Elektrizitätsverteilnetzen, die Energieflexibilitätsdienstleistungen für ihr Netz beschaffen, um die Effizienz bei Betrieb und Ausbau ihres Verteilnetzes zu verbessern, dies in einem transparenten, diskriminierungsfreien und marktgestützten Verfahren durchzuführen. Damit hat sich der nationale Gesetzgeber ausdrücklich für einen marktgestützten Beschaffungsvorgang für Energieflexibilität auf der Verteilnetzebene entschieden, der den Grundsatz der Technologieoffenheit wahren und allen Energieflexibilitätsanbietern die Möglichkeit geben soll, an dem Verfahren teilzunehmen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Rechtsrahmen gegenwärtig noch hinter den technologischen und faktischen Entwicklungen zurückbleibt. Der nationale Gesetzgeber hat jedoch im Zuge der Umsetzung der Elektrizitätsbinnenmarkt-Richtlinie in § 14c Abs. 1 EnWG einen ersten Meilenstein für die gesetzliche Regelung einer Generalnorm zur Energieflexibilitätsbeschaffung auf Ebene der Verteilnetzbetreiber geschaffen. Ob und wie diese Neuerung von den Verteilnetzbetreibern tatsächlich umgesetzt wird, bleibt abzuwarten.

3 Ein Strommarktdesign 2030–2050 zur Schaffung von langfristigen Anreizen für Energieflexibilität

Autoren: Bichler · Buhl · Ebinger · Ganz · Hanny · Kern · Knörr · Neuhoﬀ · Ober · Ott · Richstein · Sitzmann · Weibelzahl · Zilke

3.1 Strommärkte und Systemdienstleistungen

In Stromsystemen muss aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Strom stets sowohl eine zeitliche als auch eine räumliche Koordination zwischen Stromerzeugern, Stromverbrauchern sowie dem Stromnetz stattfinden. Ein erfolgreiches Strommarktdesign sollte daher in der Lage sein, diese Anforderungen zu erfüllen.

3.1.1 Status-Quo

Im deutschen Stromsystem findet der Handel zwischen Stromerzeugern und Stromverbrauchern ohne Berücksichtigung des Stromnetzes statt (Ashour Novirdoust et al., 2021a). Der Handel erfolgt vor der physikalischen Lieferung in einer einheitlichen Preiszone innerhalb Deutschlands. Der Strommarkt besteht dabei aus mehreren, sequenziell aufeinanderfolgenden Märkten: dem Terminmarkt, dem Day-Ahead-Markt und den Intraday-Märkten. Auf diesen Märkten können Marktteilnehmer ausschließlich physikalische Arbeit (MWh) handeln (Buhl et al., 2019).

Der Terminmarkt bietet den Marktteilnehmern die Möglichkeit, ihre Portfolios mittel- bis langfristig zu optimieren und zukünftige Liefergeschäfte finanziell abzusichern, entweder im Börsenhandel oder außerbörslich in sogenannten Over-the-Counter (OTC) Geschäften. Der Day-Ahead-Markt findet ganztägig jeden Tag um 12:00 Uhr als Auktion an der EPEX Spot (European Power Exchange) statt. Auf dem Day-Ahead-Markt können Stundenprodukte und standardisierte Blockgebote für den Folgetag gehandelt werden. Im Anschluss ermöglichen die Intraday-Eröffnungsauktion sowie der kontinuierliche Intraday-Markt zusätzlich den Handel von Viertelstundenprodukten. Der kontinuierliche Handel auf dem Intraday-Markt ist von 16:00 Uhr des Vortags bis zu einer halben Stunde vor physikalischer Lieferung möglich, sodass die Marktteilnehmer kurzfristige Änderungen wie untertägige Korrekturen der EE-Prognosen berücksichtigen können. Sowohl die zeitliche Abfolge der Märkte als auch die Ausgestaltung der Gebotssprache (*Kapitel 3.3.1*) schaffen die Grundlage dafür, dass die Marktteilnehmer ihre Präferenzen und technischen Randbedingungen in ihren Geboten kommunizieren können. Die Wahl der Strommarktdesigns einschließlich der Gebotssprache entscheidet daher

maßgeblich, ob und wie Stromerzeuger und -verbraucher am Markt teilnehmen können und ob eine effiziente Koordination zwischen der Vielzahl unterschiedlicher Akteure mit entsprechenden wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen ermöglicht werden kann.

Die Gewährleistung des zeitlichen und räumlichen Gleichgewichts zum Zeitpunkt der physikalischen Lieferung liegt in der Verantwortung der Übertragungsnetzbetreiber. Damit das Stromangebot und die Stromnachfrage zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sind, können die Übertragungsnetzbetreiber Systemdienstleistungen beschaffen. Im Sinne der räumlichen Koordination sind die Übertragungsnetzbetreiber außerdem dafür verantwortlich, dass das Marktergebnis, das sich nach Handelsschluss des kontinuierlichen Handels auf dem Intraday-Markt eingestellt hat, physikalisch im Netz umsetzbar ist. Sollte dies aufgrund von Netzengpässen nicht möglich sein, können korrigierende Maßnahmen zur Netz- und Systemsicherung vorgenommen werden.

3.1.2 Herausforderungen für das aktuelle Strommarktdesign

Die Transformation des Energiesystems stellen das Strommarktdesign bereits heute vor große Herausforderungen (Bichler et al., 2022). Mit Blick auf das Stromnetz wird auf der einen Seite die europäische Marktkopplung verstärkt vorangetrieben. Auf der anderen Seite ist allerdings national unklar, wie schnell der geplante deutsche Netzausbau durchgeführt werden kann, da es vor allem im Süden Deutschlands große Akzeptanzprobleme gibt (50Hertz Transmission GmbH et al.; 2019, Samweber et al., 2017). Da der Netzausbau den räumlichen Bedarf an Energieflexibilität voraussichtlich nicht erfüllen kann, spielt die regionale Verteilung der Energieflexibilitäten eine immer größere Rolle (*Kapitel A.2*). Aktuell gibt es für die netzdienliche, regionale Erschließung von Energieflexibilitäten jedoch keine marktbezogenen Anreize (sondern allenfalls unvollständige regionale Förderungsmechanismen), sodass der netzdienliche, regionale Einsatz von Energieflexibilität im aktuellen System eine Herausforderung darstellt.

Außerdem werden das Energiesystem und die möglichen Energieflexibilitäten immer kleinteiliger, sodass eine kostengünstige Anbindung immer relevanter wird. Hier kann eine fortgeführte Digitalisierung unterstützen. Allerdings zeigt z. B. die Einführung der intelligenten Messsysteme, dass die Digitalisierung der Energiewirtschaft in Deutschland nur schleppend vorankommt (Bogensperger et al., 2018). Zudem ist die derzeitige Praxis des kostenbasierten Redispatch für viele der künftigen Marktteilnehmer nicht anwendbar, da Redispatch-Akteure auf der Grundlage kurativer Eingriffe gesteuert und ausschließlich auf Kostenbasis entschädigt werden. Diese Kosten lassen sich für konventionelle Kraftwerke gut abschätzen. Viele neue Akteure, die für den lokalen Netzausgleich benötigt werden, haben jedoch keine eindeutige Kostenbasis, sondern stattdessen (nicht-öffentlich bekannte) Opportunitätskosten. Diese Opportunitätskosten hängen im Kontext der Sektorenkopplung häufig nicht nur am Stromsektor, sondern z. B. auch an einer alternativen Wärmeerzeugung. Daher können diese Opportunitätskosten im Allgemeinen nicht von den Regulierungsbehörden bestimmt werden.

Diese Herausforderungen müssen bei der Entwicklung eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die Ziele, die das zukunftsfähige Strommarktdesign erfüllen soll, sowie die Ausgestaltung zur Erreichung dieser Ziele näher beleuchtet.

3.2 Ziele und Erfolgsfaktoren eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns

Märkte und ihre Institutionen bzw. »Spielregeln« bilden ein wesentliches Instrument zur Koordination von Akteuren im aktuellen und zukünftigen Markt- und Stromsystem. Aus diesem Grund müssen die Strommärkte so gestaltet sein, dass sie dazu beitragen, übergeordnete Marktziele wie ökonomische Effizienz zu erreichen. Bei der Auswahl der Gestaltungsoptionen, d.h. des konkreten »Strommarktdesigns«, sind die geltenden regulatorischen und politischen Rahmenbedingungen zwingend zu berücksichtigen (z. B. Klimaschutzziele). Zudem sind bei der Wahl des Strommarktdesigns eine Vielzahl verschiedener »Erfolgsfaktoren« mitzudenken, die die Erreichung übergeordneter Marktziele positiv beeinflussen. Ein »gutes« Strommarktdesign inkl. seiner regulatorischen und politischen Rahmenbedingungen muss folglich geeignet sein, diese »Erfolgsfaktoren« positiv zu verstärken und weiter voranzutreiben. Nur so kann sichergestellt werden, dass übergeordnete Marktziele im Sinne eines allgemeinen »Markterfolgs« erreichbar sind und bleiben.

Der Erfolg von Strommärkten sowie des zugrunde liegenden Strommarktdesigns bemisst sich am Grad der erreichten Marktziele unter Berücksichtigung externer Randbedingungen aus dem unmittelbaren Marktumfeld (z. B. technische Innovationen oder sozioökonomische Begebenheiten (Gimpel et al., 2008)). Die Marktziele beziehen sich deshalb insbesondere auf Anforderungen aus dem gesamten Markt- und Stromsystem sowie der Gesellschaft als Ganzes, z. B. im Sinne der Gestaltung eines Versorgungssicheren, bezahlbaren, sozial gerechten und nachhaltigen Stromsystems. Das Rahmenwerk von Gimpel et al. (2021) fasst beispielhaft eine solche Bandbreite möglicher Marktziele (innerer Kreis) mit zugehörigen Erfolgsfaktoren (äußerer Kreis) zusammen (*Abbildung 3*).

Bei der Betrachtung der Marktziele beschreibt das abgebildete Rahmenwerk zunächst sowohl kurz- als auch langfristige ökonomische Effizienzziele. So soll ein zukunftsfähiges Strommarktdesign kurzfristig vor allem zur allokativen Effizienz beitragen, d. h., dass die (lokal differenzierten) Strompreise die tatsächlichen Kosten von Stromproduktion und -transport widerspiegeln. Mittel- bis langfristig werden zudem Investitionen genau dort angereizt, wo sie jeweils zu netz- und systemdienlichen Zwecken benötigt werden. Darüber hinaus muss durch ein zukunftsfähiges Strommarktdesign zwingend sichergestellt werden, dass Industrieunternehmen im internationalen Wettbewerb Bestand haben und Beschäftigungswachstum sowie Innovationskraft weiterhin gefördert werden. Die Gestaltung des Strommarktdesigns kann somit unmittelbar das nationale und internationale Wettbewerbsumfeld beeinflussen und weitreichende Rückwirkungen auf die gesamte Gesellschaft nach sich ziehen. Weiterhin muss ein zukunftsfähiges Strommarktdesign zu jedem Zeitpunkt Versorgungssicherheit im Sinne eines zuverlässigen, robusten und resilienten Stromsystems gewährleisten. Auch Verteilungsfragen, z. B. mit Blick auf Einkommen, geografische Regionen sowie über Generationen hinweg, müssen zwingend mitgedacht werden. Weiterhin sind Vorgaben zum Umweltschutz, z. B. CO₂-Reduktionsziele, sowie Vorgaben zum Schutz der menschlichen Gesundheit zu beachten. Durch ausdrückliche Förderung der elf »Erfolgsfaktoren« im äußeren Kreis (*Abbildung 3*) kann ein geeignetes Strommarktdesign dazu beitragen, die übergeordneten Marktziele zu erreichen.



Abb. 3 Marktziele und Erfolgsfaktoren eines zukünftigen Strommarktdesigns (in Anlehnung an Gimpel et al., 2021)

3.3 Gestaltungsoptionen für ein zukunftsfähiges Strommarktdesign

Die Allokation und Preisbildung auf Spotmärkten basiert häufig auf zentralisierten Auktionen und dahinterstehenden mathematischen Optimierungsproblemen. Das Design dieser Auktionen beeinflusst die Effizienz der Markträumung und die sich ergebenden Preissignale (Ahunbay et al., 2021). Dieser Abschnitt diskutiert Alternativen in Bezug auf die Gebotssprache solcher Auktionen sowie potenzielle Preissetzungsmechanismen als zentrale Gestaltungsoptionen eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns.

3.3.1 Gebotssprachen

Viele Spotmärkte (z. B. Day-Ahead-Märkte) sind zentralisierte Auktionsmärkte. Die Gebotssprache solcher Auktionen umfasst eine Reihe von Parametern, mit denen die Marktteilnehmer ihre Zahlungsbereitschaft oder Kostenstruktur kommunizieren können. Auf dieser Grundlage bestimmt der Marktbetreiber Erzeugungs- und Verbrauchsprofile sowie Strompreise.

Gebotssprachen sollten zugrunde liegende Opportunitätskosten und wirtschaftliche Aspekte der Marktteilnehmer zum Ausdruck bringen. So entstehen den Stromversorgern i. d. R. bestimmte Fixkosten für das Hochfahren und den Betrieb eines Generators sowie variable Erzeugungskosten. Darüber hinaus existieren häufig technische Restriktionen, z. B. in Bezug auf Mindestlaufzeiten oder Rampenbedingungen. Auf der Nachfrageseite möchten Marktteilnehmer ggf. bestimmte Energieflexibilitäten zum Ausdruck bringen, was aktuell nur bedingt möglich ist (etwa durch flexible Stundenblöcke in europäischen Märkten).

Auf europäischen Day-Ahead-Märkten geben die Teilnehmer i. d. R. Gebote für jede Stunde des folgenden Tages ab. Daneben sind auch Blockgebote möglich. Diese stellen eine Reihe von Einzelgeboten dar, die nur als Ganzes ausgeführt werden können. Kostenstrukturen werden als einteilige Angebote kommuniziert, d. h., dass Marktteilnehmer verschiedene Kostenkomponenten zu einem einzigen Parameter aggregieren müssen. Einige NEMOs (Nominated Electricity Market Operators / Strommarktbetreiber) erlauben weitere Gebotsformen, z. B. flexible Stundenblöcke, Lastgradienten oder Mindestabnahmequoten. Auf der Grundlage des EUPHEMIA-Algorithmus werden Allokation und Preise für den Day-Ahead-Markt berechnet. Der Algorithmus zielt auf eine wohlfahrtsoptimale Allokation für die gekoppelten europäischen Märkte ab, die mit einem einheitlichen Preis innerhalb jeder Preiszone sowie zulässigen zonenübergreifenden Stromflüssen gemäß den Prinzipien der Marktkopplung einhergeht. Technische Restriktionen des Übertragungsnetzes innerhalb einer Zone werden nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Unterschiede zum europäischen Strommarktdesign und einer Vielzahl öffentlich verfügbarer Informationen eignen sich liberalisierte US-Märkte gut für einen Vergleich. Marktteilnehmern in den USA ist es generell erlaubt, ihre Opportunitätskosten granularer anzugeben als in Europa (Madani et al., 2018). Kostenstrukturen können mit mehrteiligen Geboten kommuniziert werden, die i. d. R. aus Hochfahrkosten, Leerlaufkosten sowie einer Angebotskurve bestehen. Darüber hinaus können Erzeuger technische Einschränkungen wie minimale Laufzeiten, minimale und maximale Erzeugungsmengen oder Rampenbedingungen kommunizieren. Nachfrageseitige Gebote umfassen sowohl preisunelastische Mengen als auch preiselastische Gebotskurven (Cramton, 2017). Nodale US-Märkte zielen ebenfalls auf eine wohlfahrtsmaximierende Allokation ab, trennen aber die Allokation von der anschließenden Preisbestimmung. Gebote, Restriktionen der Marktteilnehmer oder des Übertragungsnetzes sowie Regelleistung werden gemeinsam optimiert. Folglich entspricht der nodale Strompreis den Grenzkosten an einem bestimmten Netzknoten.

Einzel- und Blockgebote, wie sie auf europäischen Märkten verwendet werden, können die Unsicherheiten auf den Strommärkten nur zu einem gewissen Grad abbilden (Sioshansi et al., 2010), insbesondere im Vergleich zu mehrteiligen Geboten in den USA (Richstein et al., 2020). Ein zukunfts-

fähiges EU-Strommarktdesign würde von mehrteiligen Geboten für Kostenstrukturen und einem Ausdruck von intertemporalen Restriktionen profitieren. Aktuelle Blockgebote erlauben nur wenig Energieflexibilität. Die Teilnehmer müssen eine Vielzahl von Geboten abgeben, um ihre Präferenzen angemessen zum Ausdruck zu bringen. In ähnlicher Weise sollten Gebote auf der Nachfrageseite bei gleichzeitiger Wahrung einer angemessenen Rechenkomplexität einen besseren Ausdruck von Energieflexibilität erlauben. *Kapitel 3.6* fasst dies noch einmal zusammen.

3.3.2 Preissetzung

Aufgrund der Anforderung einheitlicher Preise innerhalb (großer) Preiszonen weicht das Ergebnis des derzeitigen zonalen Systems in Europa vom wohlfahrtsmaximierenden Ergebnis ab (Meeus et al., 2009). Das Wohlfahrtsmaximum beschreibt die Markträumung, bei der die Differenz aus dem Nutzen der Nachfrager und den Kosten der Erzeuger maximiert wird. Zudem werden Netzrestriktionen innerhalb einer Zone beim Handel nicht berücksichtigt. Das kann dazu führen, dass die gehandelten Strommengen, d. h. die Allokation, nicht über die existierenden Stromtrassen transportiert werden kann, was zu einem Redispatch und entsprechenden Wohlfahrtsverlusten führt. Im Gegensatz dazu spricht eine Vielzahl von Argumenten für nodale Preise:

1. **Wohlfahrtsgewinne:** In Kalifornien führten nodale Preise hinsichtlich durchschnittlicher variabler Kosten zu einem effizienteren Betrieb von Gaskraftwerken (die in Kalifornien den Großteil der konventionellen Stromerzeugung ausmachen) von etwa zwei Prozent (Wolak, 2011). Auch in Texas sanken Verbraucherpreise durch die Einführung nodaler Preise um etwa zwei Prozent (Zarnikau et al., 2014). Eine ähnliche Größenordnung wird für Europa erwartet (Neuhoff et al., 2013).
2. **Regionale Investitionssignale:** Ein nodales System sendet lokale Preissignale und trägt zu regionalen Investitionsanreizen für Erzeuger, Netzbetreiber und Energieflexibilitätsanbieter bei (Bertsch et al., 2016). Langfristig führt dies zu ausreichenden Erzeugungs- und Übertragungskapazitäten und einer Angleichung von Strompreisen an allen Netzknoten. Gleichzeitig werden Investitionsentscheidungen von einer Vielzahl weiterer Faktoren beeinflusst.
3. **Minderung Redispatch und Einspeisemanagement:** Die Kosten für Redispatch und Einspeisemanagement sind in Deutschland erheblich gestiegen und werden über die Netzentgelte auf die Allgemeinheit umgelegt. Die Berücksichtigung von Netzrestriktionen in nodalen Systemen führt zu wesentlich geringeren Ausgleichsmaßnahmen (Antonopoulos et al., 2020).
4. **Stabilität:** Zonenkonfigurationen sind von Natur aus instabil (Fraunholz et al., 2020), da sich überlastete Leitungen je nach Wetterlage und den zukünftigen Veränderungen im Kapazitätsmix verschieben (Neuhoff et al., 2013). Eine regelmäßige Neudefinition von Zonengrenzen ist nicht trivial, untergräbt langfristig Märkte und Investitionsanreize (Maurer et al., 2018) und kann sogar zu Wohlfahrtsverlusten führen (Grimm et al., 2016). Eine solche Zonendefinition ist in einem nodalen Preissystem nicht notwendig.
Der Übergang zu nodalen europäischen Märkten wäre mit einer Reihe administrativer und politischer Herausforderungen verbunden und würde z. B. eine strukturelle Reform der

derzeitigen Förderregelungen für EE erfordern. Zudem könnte der Übergang zu nodalen Preisen aufgrund der zunehmenden Komplexität und Volatilität der Großhandelspreise den Wettbewerb auf Endkundenmärkten beeinflussen. Für effiziente nodale Preissignale müssen zudem verzerrte Anreize infolge zusätzlicher Preiskomponenten wie Netzentgelte, Steuern oder Abgaben verhindert und darüber hinaus folgende Aspekte adressiert werden (*Kapitel 3.6*):

5. **Liquidität, Hedging und Basisrisiko:** In einem nodalen System müssen sich die Marktteilnehmer gegenüber lokalen Risiken absichern, was unverhältnismäßig viele Handelsprodukte voraussetzen und Liquiditätsprobleme implizieren würde. Die Terminmärkte in den USA fußen i. d. R. auf Trading Hubs (Handelspunkten), deren Referenzpreise als Basis für Terminkontrakte dienen und liquide gehandelt werden können. Zusätzlich ermöglichen Finanzinstrumente wie Financial Transmission Rights (FTRs) den Erhalt der Preisdifferenz zwischen zwei Netzknoten und somit eine Absicherung des eigentlichen lokalen Risikos gegenüber dem Referenzpreis. Doch schon ein geringes Basisrisiko, d. h. eine Abweichung des Basiswerts des gehandelten Derivats von der tatsächlichen Spotpreis-Exposition, könnte im Rahmen der MiFID-II-Verordnung als spekulatives Geschäft eingestuft werden und regulatorische Hürden beispielsweise für kommunale Versorger mit sich bringen.
6. **Transitionskosten:** Die Kosten für einen Übergang von einem zonalen zu einem nodalen System könnten signifikant sein. US-Märkte konnten die Implementierungskosten jedoch innerhalb eines Jahres wieder ausgleichen (Neuhoff und Boyd, 2011). Dies ist bedingt durch bessere Netz- und Systemsicherungsmaßnahmen, eine höhere Netzzuverlässigkeit, mehr Wettbewerb, geringere Transaktionskosten, eine bessere Planung und eine bessere Koordination mit den Regulierungsbehörden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Erfahrungen in den USA unter anderen institutionellen Rahmenbedingungen gemacht wurden und daher nur bedingt übertragbar sind.
7. **EU-Perspektive:** Die Einbettung eines nodalen Systems in einen gekoppelten europäischen (zonalen) Strommarkt kann eine sehr komplexe Herausforderung darstellen (Ahunbay et al., 2021). Ein möglicher Weg zur Integration könnte eine vermehrte Verwendung von Auktionen sein, etwa im Rahmen des Intraday-Markts (Richstein et al., 2018). Auch ein Übergang zu finanzieller Bilanzkreisverantwortung und mehrteiligen Geboten könnte die Transparenz und Effizienz erhöhen.
8. **Verteilnetze:** Da die Erzeugung von Strom aus EE und die daraus resultierenden Engpässe in den Verteil- und Übertragungsnetzen regional korreliert sind, ist zu erwarten, dass nodale Preise auf Ebene der Übertragungsnetzbetreiber den regionalen Ausgleich von Angebot und Nachfrage unterstützen und damit auch Engpässe im Verteilungsnetz verringern. Dementsprechend muss auf der Ebene der Übertragungsnetzbetreiber ein konsistenter Marktrahmen geschaffen werden, der eine klare und nutzbare Schnittstelle zum Verteilnetz darstellt.

Unabhängig von der Diskussion über zonale und nodale Preise müssen die Regeln zu Preissetzung nicht-konvexe Strukturen auf diesen Märkten berücksichtigen. Dies umfasst etwa Kosten, die unter bestimmten Bedingungen abrupt ansteigen (etwa Kosten für das Hochfahren eines Generators) oder technische Restriktionen (etwa minimaler Output eines Generators). Im Fall von Nicht-Konvexitäten

gibt es nicht zwangsläufig einen einheitlichen Preis, der ein Wettbewerbsgleichgewicht unterstützt (Bikhchandani und Ostroy, 2002). Mit dem Ziel, alternative ökonomische Eigenschaften zu erreichen (z. B. maximale Wohlfahrt, Budgetausgeglichenheit, individuelle Rationalität) und Preise effizient zu berechnen, wurden im Laufe der Jahre zahlreiche Preissetzungsmechanismen mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen vorgeschlagen (Liberopoulos und Andrianesis, 2016).

3.4 Strategische Gesichtspunkte eines zukünftigen Strommarktdesigns

Marktergebnisse werden sowohl durch die Marktregeln als auch durch das Verhalten der Marktteilnehmer bestimmt. Für ein erfolgreiches Strommarktdesign ist es deshalb essenziell, die Präferenzen und die strategische Interaktion der Marktteilnehmer bei der Festlegung der Marktregeln zu berücksichtigen. Dieser Abschnitt betrachtet Auswirkungen verschiedener Marktdesignoptionen auf strategische Verhaltensweisen der Marktteilnehmer, die Ausübung von Marktmacht sowie strategisches Bieten und Gaming.

3.4.1 Investitionen in energieflexible Technologien

Langfristig sind Marktteilnehmer nicht darauf beschränkt, mit ihren bestehenden Erzeugungskapazitäten zu planen. Sie können Kapazitäten erweitern oder reduzieren, Technologien und Standorte anpassen sowie Innovationen schaffen, z. B. durch Entwicklung neuer Technologien für Stromspeicher oder neuer Methoden für Energieflexibilität. Dabei sollten die individuellen Entscheidungen die langfristigen Marktziele unterstützen (*Kapitel 3.2*). Ein erfolgreiches Strommarktdesign muss Anreize zur Erreichung dieser Ziele setzen.

Der Markt generiert Investitionssignale über Preise an Strommärkten sowie Preise langfristiger Kontrakte, die erwartete Strommarktpreise widerspiegeln. Anreize zur Investition in Energieflexibilität entstehen durch Preisschwankungen, da energieflexible Anbieter von den dabei entstehenden Preisdifferenzen profitieren können. Bestehen begründete Bedenken, dass die Marktsignale langfristige Ziele nicht ausreichend unterstützen, und können diese Verzerrungen nicht beseitigt werden, kann eine Regulierungsbehörde Investitionen direkt stimulieren. Dies ist z. B. der Fall, wenn individuelle Investitionen positive externe Effekte mit sich bringen, die eine Investition zwar gesellschaftlich wünschenswert machen, aber bei der individuellen Entscheidung vernachlässigt werden. Zur Schaffung von Anreizen für Investitionen in energieflexible Technologien, deren Einsatz das Netz entlasten und die Anforderungen an den Netzausbau reduzieren kann, schlagen Gómez et al. (2020) flexible Netzanschlüsse, lokale Marktmechanismen für Energieflexibilitätsleistungen sowie kostenorientierte Netznutzungsgebühren vor (*Kapitel 2.2.3*). Ein zukunftsfähiges Strommarktdesign sollte Anbietern von Energieflexibilität auf sie zugeschnittene Produkte und einen Marktzugang bieten, um die Entwicklung energieflexibler Technologien zu fördern (*Kapitel 3.6.1*).

3.4.2 Marktmacht

Marktmacht kann definiert werden als die Fähigkeit eines Marktteilnehmers, die Preise so zu beeinflussen, dass sie zu seinem Vorteil von den Wettbewerbspreisen abweichen (Lerner, 1934). Marktmacht kann entstehen, wenn ein Akteur den Markt aufgrund seiner Größe beherrscht oder die Nachfrage ohne ihn nicht gedeckt wird. In Strommärkten kann Marktmacht in Situationen entstehen, in denen das Stromangebot knapp ist und der marginale Anbieter nicht dem Wettbewerb um die letzten Einheiten ausgesetzt ist (Borenstein et al., 2002). Marktmacht kann durch eine hohe Anzahl an Marktteilnehmern vorgebeugt werden, z. B. durch Marktöffnung für ein breites Spektrum an Technologien und geringe Markteintrittsbarrieren für kleinere Firmen.

Strommarktdesigns können sich in der Art und Weise unterscheiden, in der Marktmacht ausgeübt werden kann (Graf et al., 2021). Da Übertragungsrestriktionen des Stromnetzes immer berücksichtigt werden müssen, können Marktteilnehmer bei Antizipation von Leitungsengpässen sowohl bei zonalen Märkten mit marktbasierendem Redispatch als auch bei nodalen Märkten den reduzierten Wettbewerb zwischen Stromanbietern auf verschiedenen Seiten der Leitung ausnutzen (Oren et al., 1995; Graf et al., 2021). Erzeugungsverpflichtungen, Gebotsgrenzen und der Einsatz regulatorischer kostenbasierter Entlohnung können eingesetzt werden, um Marktmacht zu reduzieren (California ISO, 1999; Patton et al., 2020). Zudem werden in nodalen Märkten Mechanismen eingesetzt, die darauf abzielen, Marktmacht anhand von Systemzuständen oder kritischen Geboten zu identifizieren und entsprechende Gebote zwangsweise anzupassen (Graf et al., 2021). Ebenso kann die Einbindung der Nachfrageseite zur aktiven Teilnahme am Marktgeschehen im Sinne eines energieflexiblen Verhaltens ein weiteres Mittel zur Abschwächung von Marktmacht der Angebotsseite darstellen (Harvey und Hogan, 2000). Langfristig verringern der Netzausbau und die Beseitigung von Engpässen das Potenzial für lokale Marktmacht. Ein zukunftsfähiges Strommarktdesign sollte die Möglichkeiten der Entstehung von Marktmacht reduzieren sowie Marktmachtpotenziale überwachen und vorausschauend eindämmen (Kapitel 3.6.4).

3.4.3 Strategisches Bieten und Gaming

Als »Gaming« oder unerwünschtes strategisches Bieten bezeichnet man das Ausnutzen der Marktregeln durch einen Marktteilnehmer zu seinen Gunsten und entgegen der Ziele des Markts. Gelegenheiten für Gaming können sich ergeben, wenn Akteure an mehreren verbundenen Märkten für die gleichen Güter teilnehmen, wenn sie mit mehreren Einheiten an einem Markt teilnehmen oder wenn sie unter flexiblen Identitäten teilnehmen. Diese drei Möglichkeiten des Gamings und strategischen Bietens werden in den folgenden drei Absätzen beispielhaft illustriert.

Sequenzielle Strommärkte können Anreize für ein sogenanntes »Increase-Decrease Gaming« (Inc-Dec) bieten. Wenn ein Anbieter z. B. antizipiert, dass seine Einheit aufgrund eines Engpasses benötigt wird, kann er sie am zonalen Strommarkt teuer oder gar nicht anbieten, um dann in einem Redispatch-Markt von hohen Preisen zu profitieren. Dieses Verhalten begünstigt jedoch Engpässe. Ein nodaler Strommarkt kann solchen Inc-Dec-Strategien entgegenwirken, da er Netzengpässe direkt bei der Allokation berücksichtigt (Consentec et al., 2019; Sarfati et al., 2019). Entsprechend kann je nach

Implementierung eines nodalen Strommarkts die Notwendigkeit für sequenziellen Redispatch deutlich reduziert werden oder vollständig entfallen. Das Beispiel illustriert, dass Teilnahmeanreize für alle relevanten Akteure geschaffen und Verflechtungen mit anderen Märkten berücksichtigt werden müssen.

Auch in alleinstehenden Märkten gibt es Anreize für strategisches Bieten. Nimmt ein Marktteilnehmer mit mehreren Einheiten an einem Markt teil, an dem das marginale Gebot den Preis bestimmt, besteht der Anreiz, die potenziell preisbestimmenden Einheiten teuer anzubieten, um mit allen Einheiten von besseren Preisen zu profitieren (Ausubel et al., 2014; List und Lucking-Reiley, 2000).

Ein drittes Beispiel ist die Diskriminierung verschiedener Akteure, die als Marktteilnehmer agieren. So können benachteiligte Akteure, statt regulär am Markt teilzunehmen, Kooperationen mit bevorzugten Akteuren eingehen, um von deren Vorteilen zu profitieren. Dadurch verändert sich die Zusammensetzung des Markts entgegen der Ziele des Strommarktdesigns. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die bevorzugte Behandlung von Bürgerenergieprojekten in Auktionen zur Förderung von Wind an Land, die dazu führte, dass Firmen Partnerschaften mit Gemeinden eingingen, die anstelle der Firmen teilnahmen (Bundesnetzagentur, 2017).

Aus den Beispielen geht hervor, dass bereits kleine Designänderungen große Auswirkungen auf die Anreize und damit auf die Ergebnisse haben können. Ein kohärentes und robustes Strommarktdesign erfordert daher die Beachtung vieler Details.

3.5 Vision eines Strommarktdesigns 2030–2050

Aus den Analysen in den vorangegangenen Abschnitten lassen sich mehrere Schlussfolgerungen zur Gestaltung eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns ziehen. Die beschriebenen Herausforderungen und zukünftigen Anforderungen sollten zu einem Überdenken des aktuellen Strommarktdesigns führen, was eine Zielvision für den Zeitraum 2030–2050 voraussetzt. Ein zukunftsfähiges Strommarktdesign sollte schrittweise bis spätestens 2030 eingeführt werden und bis (mindestens) 2050 Bestand haben, auch wenn sich Klimaschutzvorgaben (z. B. das Ziel der Treibhausgasneutralität) auf einen abweichenden zeitlichen Rahmen beziehen. Die Vision eines Strommarktdesigns 2030–2050 muss die Anforderungen der Energiewende erfüllen und dabei einen räumlich und zeitlich fein gegliederten Markt sicherstellen, der allen potenziellen Akteuren und Technologien die Teilnahme ermöglicht und so den Wettbewerb und die Effizienz steigert (Ahunbay et al., 2021). Gleichzeitig muss dadurch die Systemsicherheit verbessert, müssen Verteilungseffekte begrenzt und eine hohe Integration in den gemeinsamen europäischen Strommarkt vorangetrieben werden.

Um diese Ziele zu erreichen, muss Deutschland Teile des Strommarkts reformieren: Kernelement einer solchen Reform ist die Einführung eines nodalen Preissystems mit örtlich und zeitlich differenzierten Preisen, und zwar zunächst knotenscharf auf der Ebene der Übertragungsnetze (Ashour Novirdoust et al., 2021a). Mehrere Studien haben ergeben, dass bereits zum jetzigen Zeitpunkt

viele europäische Märkte von knotenscharfen nodalen Preisen profitieren würden (Neuhoff et al., 2013; Ashour Novirdoust et al., 2021b). Im Folgenden ist die Vision eines geeigneten nodalen Preissystems beschrieben.

Im Mittelpunkt eines solchen nodalen Preissystems steht die Etablierung eines Echtzeitmarkts, auf dem lokale Preise ermittelt werden. Die vorgelagerten Märkte (im kurzfristigen Handel mehrere Intraday-Auktionen und eine Day-Ahead-Auktion) fungieren als Terminmärkte, die eine Koordinierung der Erzeugung ermöglichen, sodass der Echtzeitmarkt kurzfristige Anpassungen und Abweichungen vergütet. Auf allen Märkten sollten die Beschaffung und die Bereitstellung von Systemdienstleistungen simultan mit den Energiemärkten optimiert werden. Dies kann durch ständig aktive, mehrteilige Gebote erreicht werden (*Kapitel 3.3.1*). Die Markträumung und die daraus resultierenden Preise sollten sicherstellen, dass die Gesamtwohlfahrt und die Markteffizienz maximiert werden. In der Vision werden, im Vergleich zum Status Quo, Fortschritte bei der Netzmodellierung erzielt und aktive Netzsteuerungseinrichtungen in den Markträumungsprozess integriert. Die Preisbildungsregeln sollten effiziente, kurz- und langfristige Anreize für alle Marktteilnehmer schaffen. Die Notwendigkeit zum Einsatz von Regelenergie wird dennoch weiterhin bestehen.

Für die Schaffung eines liquiden Terminmarkts sollten mehrere Handlungspunkte (Trading Hubs) etabliert werden, die als Referenzpreise für Gebiete genutzt werden (ein Konzept, das in existierenden nodalen Preissystemen zu einer guten Liquidität führt). Wichtig ist, dass ein »nationaler Knotenpunkt« als Referenzpunkt für bestehende Verträge mit Bezug auf den zonalen Preis definiert würde. Zudem ist die Etablierung eines liquiden Markts von FTR (*Kapitel 3.3.2*) zur Absicherung von lokalen Preisrisiken essenziell. Hierfür sollten regelmäßige FTR-Auktionen durchgeführt werden, um einen soliden Primärmarkt für finanzielle Übertragungsrechte zu schaffen. Ein Sekundärmarkt wird Handelsmöglichkeiten zwischen den Auktionen gewährleisten.

Bei der Einführung eines nodalen Preissystems sollte überdies die enge Integration mit den europäischen Märkten sichergestellt werden. Im Rahmen einer solchen Integration und bei wachsenden EE-Anteilen dürften sowohl das Land, das ein nodales Preissystem einführt, als auch seine zonalen Nachbarn davon profitieren (Bjørndal et al., 2018). Es gibt dabei mehrere Hauptmechanismen zur Kopplung von zonalen und nodalen Systemen auf der Day-Ahead-, Intraday- und Echtzeitebene, wobei gekoppelte europäische Auktionen über alle Zeithorizonte hinweg eine zentrale Rolle spielen sollten.

In Zukunft werden immer mehr aktive Teilnehmer, einschließlich der industriellen Energieflexibilität, auf der Verteilnetzebene angesiedelt sein (Caramanis et al., 2016; Ausfelder et al., 2018). Selbst lokale Preise, die auf die Ebene der Übertragungsnetze begrenzt sind, können aufgrund der Korrelation mit nötigen Eingriffen auf der Verteilnetzebene dazu beitragen, die Maßnahmen auf der Verteilnetzebene mit dem Gesamtsystembedarf abzustimmen. Dennoch wird eine engere Koordinierung zwischen Übertragungsnetzbetreiber und Verteilnetzbetreiber erforderlich sein. Dies kann entweder durch eine Ausweitung der derzeitigen Zuständigkeiten der Übertragungsnetzbetreiber oder durch eine vertikale Kopplung der Verteilnetzebene mit dem Großhandelsmarkt erreicht werden.

Die Einführung eines nodalen Preissystems könnte zu begrenzten Verteilungseffekten führen, wobei die lokalen Preisunterschiede wahrscheinlich unter dem Niveau der bestehenden Unterschiede bei den Verteilnetztarifen in Deutschland liegen werden (Ashour Novirdoust et al., 2021a). Solche Verteilungseffekte können durch die Zuteilung von FTR für Verbraucher und konventionelle Erzeuger ausgeglichen werden. Bestehende Vergütungsmechanismen für EE können beim Übergang zu einem nodalen Preissystem angepasst werden, um der Veränderung des Markts, der den Verträgen zugrunde liegt, und der damit verbundenen Umverteilung der Gewinne Rechnung zu tragen.

Die Umsetzung der dargestellten Vision eines Strommarktdesigns 2030–2050 würde sicherstellen, dass alle Marktteilnehmer, auch kleinere mit Opportunitätskosten, zur effizienten Adressierung von Netzengpässen beitragen können (*Kapitel 3.4.2*).

3.6 Ausgestaltung des Übergangs in ein zukunftsfähiges Strommarktdesign 2030–2050

Wie in *Kapitel 3.5* dargestellt, sollte ein Übergang zu einem zeitlich und örtlich hochaufgelösten nodalen Preissystem erfolgen. Es stellt sich dabei die zentrale Frage, ob dieser Übergang schrittweise erfolgen soll, also zunächst durch Aufteilung in kleinere Zonen, oder ob die Umstellung von zonalen zu hochaufgelösten nodalen Preisen in einem Schritt praktikabler ist und positive Wohlfahrtseffekte aufweist.

3.6.1 Schritte zur Einführung

Mehrere Probleme einer sukzessiven Aufteilung von Zonen für kurz- und langfristige Märkte begründen die Notwendigkeit für einen einstufigen Übergang in ein nodales Preissystem. Ein Grund hierfür liegt darin, dass ein nodales Preissystem ein integriertes Gesamtkonzept aus verschiedenen aufeinander abgestimmten Märkten ist. Gleichzeitig sind zonale Preissysteme nicht auf strukturelle Netzengpässe und häufige Gebotszonenanpassungen ausgelegt, sodass bei kleiner werdenden Zonen Nachteile für Liquidität im Kurz- und Langfristhandel entstehen. Dennoch können schrittweise begleitende Maßnahmen eingeführt werden, um den Übergang zu einem nodalen Preissystem vorzubereiten und gleichzeitig die Effizienz des derzeitigen Preissystems zu verbessern:

- Ein verstärkter Einsatz von Intraday-Auktionen bis hin zu Echtzeitmärkten kann die zonalen Märkte in Bezug auf Liquidität, Marktmachtresistenz, Effizienz der statischen Zuweisung und effiziente Nutzung zonenübergreifender Kapazitäten verbessern. So könnte die Anzahl von Intraday-Auktionen gesteigert werden (z. B. Auktionen alle 3 bis 4 Stunden), um die Liquidität im Vergleich zum kontinuierlichen Handel auf dem Intraday-Markt zu sammeln und somit zur Effizienz beizutragen.

- Technologiespezifische, mehrteilige Gebote, die durch reguläre Auktionen ermöglicht werden, können es Marktteilnehmern erlauben, ihre technologischen Fähigkeiten vollständig an den Markt zu bringen (*Kapitel 3.3.1 und 3.4.1*). Dies ermöglicht eine effiziente integrierte Arbitrage über mehrere Zeiträume, erhöht die Effizienz unter Unsicherheit (Richstein et al., 2020) und senkt die Teilnahmebarrieren für Marktteilnehmer.
- Die simultane Optimierung von Energiebereitstellung und Systemdienstleistungen, die durch gemeinsame Auktionen und mehrteilige Gebote ermöglicht wird, kann zu Effizienzverbesserungen führen. Die gleichzeitige Markträumung gibt den Marktteilnehmern die Möglichkeit, ihre Fähigkeiten dem bestbezahlten Dienst zuzuweisen, anstatt auf zwei aufeinanderfolgenden Märkten Arbitrage betreiben zu müssen.
- Die Umstellung auf finanzielle Bilanzkreise (d. h. einheitenspezifische Bilanzierungsverantwortung) würde dazu führen, dass Unternehmen finanziell für Abweichungen von der Einsatzplanung in Bezug auf die individuelle Einheit (bzw. Einheiten am selben Netzknoten) zahlen müssten oder bezahlt würden, und nicht physikalisch aggregiert für Abweichungen des gesamten Portfolios innerhalb eines Bilanzkreises. Daraus resultierende Anreize sind vor dem Hintergrund von Netzengpässen effizient, dienen aufgrund der besseren Planbarkeit für die Netzbetreiber der Systemstabilität und sind für eine Umstellung auf lokale Preise notwendig. Finanzielle Bilanzkreise schaffen überdies eine höhere Liquidität für Kurzfrist- und Regelenergiemärkte, erleichtern die Marktteilnahme kleinerer Akteure und senken Markteintrittsbarrieren.
- Es sollte untersucht werden, wie die Zusammenarbeit zwischen Übertragungsnetzbetreibern und Verteilnetzbetreibern in einem nodalen Preissystem im Gegensatz zum derzeitigen zonalen System koordiniert werden kann. Zusätzlich zu den traditionellen analytischen und rechnerischen Ansätzen könnte dies auch durch die Definition von Testregionen für lokale Preise auf Verteilnetzebene mit Ankopplung an ein (virtuelles) nodales Preissignal auf Übertragungsebene geschehen.

3.6.2 Partizipative Technikfolgenabschätzung der digitalen Transformation

Ein zukünftiges Strommarktdesign bringt vielfache intendierte, aber auch nicht intendierte Folgen mit sich. Das Instrument der sozioökonomischen partizipativen Technikfolgenabschätzung (pTA) dient dazu, mögliche Risiken, Fehlentwicklungen und Lock-in-Effekte sowie Pfadabhängigkeiten frühzeitig zu erkennen, zu reflektieren und somit besser steuern zu können. Eine pTA zeichnet sich methodisch dadurch aus, dass gemeinsam mit relevanten Stakeholdern in Workshop-Formaten mögliche Zielkonflikte und Lösungsansätze für eine bestimmte Technologieentwicklung identifiziert werden. Um eine gute Strukturierung dieser Workshops zu ermöglichen, werden in einem ersten Schritt Konfliktfelder identifiziert sowie Interessen und Blickwinkel der betroffenen Akteure beschrieben. Im Mittelpunkt dieses partizipativen Ansatzes steht ein Workshop mit den Stakeholdern (im folgenden Text als Experten bezeichnet) aus Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Praxis, die sich durch ihre fachliche Expertise für das Themenfeld qualifizieren. Solche transdisziplinären Formate sind geeignet, um in gesellschaftlicher Interaktion zu gesellschaftlich tragbaren und sozial-robusten Lösungen zu gelangen (Böschchen et al., 2021).

Eine partizipative Technikfolgenabschätzung kann bei der Einschätzung helfen, inwiefern Änderungen und Anpassungen auf Seiten der Rollen, Funktionen und Regulatorik in welcher Reihenfolge und mit welchem Determinismus gesellschaftlich wünschenswert sind. Darauf basierend können gesellschaftliche Aushandlungsprozesse für die Ausgestaltung der Wandlungsprozesse arrangiert werden. Um die Interessen, Werte und Zielsetzungen der Akteure im Stromsystem sichtbar zu machen, ihre Rollen zu beschreiben sowie Machtverhältnisse aufzuzeigen, wurden anhand der Expertenrunden Thesen zu möglichen Interessens- und Zielkonflikten erarbeitet.

Als beispielhafte Handlungsfelder dieser partizipativen Technikfolgenabschätzung wurden die Herausforderungen für Prosumer, also Akteure, die Strom erzeugen und konsumieren, sowie neue Geschäftsmodelle der digitalisierten Energiedienstleistungsunternehmen (eEDU) gewählt. Die Rollen dieser Akteure werden sich durch digitale Geschäftsmodelle, datengetriebene Dienstleistungen und neue Möglichkeiten von Eigenerzeugung und -verbrauch voraussichtlich stark verändern. Im Folgenden werden ausgewählte Zielkonflikte beschrieben, die von den Teilnehmenden der Expertenrunden identifiziert wurden und somit nicht zwangsläufig der Einschätzung der Autoren oder Herausgeber entsprechen müssen. Im Zentrum möglicher Konflikte stehen dabei rechtliche Vorgaben und ökonomische Chancen:

- **Wer trägt die Verantwortung für Netzstabilität, Engpassmanagement und Reserven?** Durch das Energiewirtschaftsgesetz zu »steuerbaren Verbrauchseinrichtungen und abschaltbaren Lasten sowie zur Festlegung des Verantwortungsbereichs für Versorgungsengpässe und Reservestrom« (§ 14 A EnWG) sind die Mechanismen nicht auf Flexibilisierung ausgerichtet. Die Abregelung als einfachstes Instrument im derzeitigen Regelwerk verdrängt daher alle anderen möglichen Optionen.
- **Konflikte zwischen Resilienz und Nachhaltigkeit des Stromsystems mit zunehmender Automatisierung versus Anfälligkeit und Versorgungssicherheit.** Die Teilnehmenden betonten, dass durch einen möglichen erhöhten Energiebedarf infolge der Automatisierung des Energiesystems und den vermehrten Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) im System das Gesamtsystem ggf. weniger resilient werden kann. Dieses Argument aus der Expertenrunde stützt sich darauf, dass der vermehrte Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) das System weniger resilient machen kann, weil sie wiederum vom Stromsystem abhängig sind und Energie aus diesem benötigen. Der flächendeckende Stromausfall in Italien im Jahr 2003 verdeutlicht die Systemrisiken, die aus der Wechselwirkung von Stromsystem und IKT resultieren: Kaskadenartig führte die systemsicherheitsbedingte Abschaltung eines Kraftwerks zum Zusammenbruch des Kommunikationsnetzes mit weiteren Kraftwerksausfällen und als Folge einem Stromausfall in ganz Italien. Wird zukünftig weiter automatisiert und mehr KI eingesetzt, kann das dazu führen, dass bei einem Engpass der Energiebedarf der KI das System zusätzlich belastet, was zu Ausfällen führen kann. Dies liegt aus Sicht der Teilnehmenden u. a. daran, dass das bestehende Regelwerk die Abregelung und nicht das Demand Side Management als Option bevorzugt.
- **Datenhoheit.** Bezüglich der Datenmessung, -speicherung, -verwaltung und -verwendung der Verbrauchsdaten kann es zu Konkurrenz und Interessenskonflikten kommen. Wer hat Zugang und Nutzungsrechte an den Daten? Mehr Daten, die für allen zur Verfügung stehen, könnten

für das Gesamtsystem dienlich sein. Diese Daten sind jedoch sensibel. In den Expertenrunden kam vermehrt zur Sprache, auf welcher Ebene die Herausforderungen und verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten reguliert werden müssen. Die nötigen Rahmenbedingungen durch die Regulierung sind abhängig vom Ort, dem Grad der Zentralisierung und der Kleinteiligkeit der Datenspeicherung und -verarbeitung.

- **Fehlende Standards vs. schneller Rollout intelligenter Messsysteme.** Eine flächendeckende Installation von Smart Metern ist ein »Wettlauf gegen die Zeit« und behindert die technologische Weiterentwicklung der Geräte. Jedoch bleibt die Umsetzung heute noch häufig in einer Pilotprojektphase stecken, da der rechtliche Rahmen fehlt und so Verantwortlichkeiten nicht geklärt sind. Smart Meter sind aber die Grundlage für die weitere notwendige Digitalisierung des Energiesystems. Allerdings gibt es Stimmen aus den Expertenrunden, die besagen, dass der Smart-Meter-Rollout nicht notwendig sei. Stattdessen sollte die Flexibilisierung und Anreizsetzung für Prosumer in verschiedenen Kontexten und Ebenen wie Industrie- oder Quartierslösungen erfolgen, bevor über die Digitalisierung einzelner Haushalte diskutiert wird.
- **Kosten der Umsetzung der Flexibilisierung versus soziale Gerechtigkeit.** Sozioökonomische Aspekte wie Gerechtigkeit sind ein wichtiger Faktor für die Gestaltung eines sozial gerechten Markts. Wenn der Forderung, dass alle Gesellschaftsschichten profitieren müssen, nachgegangen wird, sind soziale Ausgleichsmaßnahmen sowie die Auswirkungen auf Arbeitsplätze sowie generelle Restrukturierungen zu berücksichtigen.

Die partizipative Technikfolgenabschätzung hat sich als ein geeignetes Instrument gezeigt, um mögliche Zielkonflikte der unterschiedlichen Akteure sowie der marktlichen und politischen Rahmenbedingungen der Digitalisierung im Stromsystem frühzeitig zu erkennen. Für die Ausgestaltung des Übergangs in ein zukunftsfähiges Strommarktdesign ist die Betrachtung dieser Zielkonflikte unabdingbar. In einem weiteren Schritt lassen sich dann zu den hier dargestellten Konflikten und Herausforderungen gezielte Handlungsempfehlungen, Leitfäden und Maßnahmen entwickeln.

3.6.3 Handlungsfelder der gesellschaftlichen Transformation

Mit der Etablierung eines neuen Strommarktdesigns entstehen umfangreiche Herausforderungen an die Akteure sowie an die Entwicklung von neuen Technologien und gesetzlichen Rahmenbedingungen. *Tabelle 1* stellt die zentralen Handlungsfelder der gesellschaftlichen Transformation dar, die sich vor diesem Hintergrund ergeben:

Tab. 1 Handlungsfelder der gesellschaftlichen Transformation

Handlungsfeld	Zusammenfassung
Gesetzliche Regulatorik	Für die erfolgreiche Transformation des Strommarktdesigns ist die Anpassung der Regulatorik an eine fluktuierende Energieerzeugung im 21. Jahrhundert die zentrale Herausforderung (<i>Kapitel 2.1.2</i>). Sie wird als entscheidendes Hemmnis wahrgenommen und muss sich zum Treiber der Energiewende entwickeln.
Markt	Für einen Markt mit einer dekarbonisierten Energieerzeugung muss das Strommarktdesign grundlegend reformiert und der fluktuierenden Energieerzeugung angepasst werden. Dazu muss die Preisgestaltung angepasst werden (<i>Kapitel 3.5</i>).
Technologien	Die Technologien zur Energieerzeugung müssen weiterentwickelt, hochskaliert und wirtschaftlich profitabel sein. Auf der Verbrauchsseite müssen die Lösungsoptionen, insbesondere die Sektorenkopplung (Wärme, Industrie, Strom & Verkehr) weiter forciert werden. Hierbei dienen Energieeffizienz und Energieflexibilitäten als wichtige Hebel.
Gesellschaftliche Transformation	Die Energiewende ist ein Gemeinschaftswerk und eine gesellschaftliche Aufgabe. Verschiedene gesellschaftliche Akteure sind zentral für die Transformation, die sich im Austausch und gemeinsamen Lernen weiterentwickelt.
Neue Akteure	Zur Koordinierung der Energiewende auf institutioneller Ebene wird ein Transitions-Team benötigt.

3.6.4 Begleitende politische Instrumente

In diesem Abschnitt werden begleitende politische Instrumente für die Einführung eines nodalen Strommarktdesigns (in einem Schritt) und der regulatorische Rahmen erörtert, z. B. für den Netzausbau, für den Ausgleich von Verteilungseffekten, die Umstellung von EE-Politiken oder die Abschwächung der Marktmacht.

Ausgleich von Verteilungseffekten

Grundsätzlich könnten nodale Preissysteme zu Preisunterschieden zwischen Knotenpunkten führen. Jedoch zeigen Studien über die Einführung von Knotenpreisen in Deutschland (Neuhoff et al., 2013), dass – obwohl in einigen Stunden signifikante Preisunterschiede bestehen, die Anreize für lokal effizientes Verhalten schaffen – über längere Zeiträume hinweg (z. B. ein Jahr) die Preisunterschiede zwischen den Knotenpunkten gering sind. Sie übersteigen über längere Zeiträume gemittelt selten 2€/MWh. Während starke Standortanreize für eine Minderheit von Knotenpunkten gegeben sind, sind die Verteilungseffekte für eine Mehrheit der Knotenpunkte gering, insbesondere im Vergleich

zu bestehenden Tarifunterschieden in den Verteilnetzen (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, 2020). Die Differenzen zwischen dem teuersten und günstigsten Verteilnetz in Deutschland betragen für Industriekunden bis zu 64,8€/MWh, für Haushaltskunden bis zu 122€/MWh.

Um diese moderaten lokalen Preisunterschiede zu kompensieren, können den Verbrauchern und Erzeugern beispielsweise FTRs zugeteilt werden. Eine Zuweisung von FTRs auf der Grundlage historischer Produktions- oder Verbrauchsmengen kann fast alle Verteilungseffekte auf der Nachfrageseite und einen großen Teil der Verteilungseffekte auf der konventionellen Erzeugungsseite ausgleichen (Kunz et al., 2016). Aufgrund ihrer unterschiedlichen Leistungscharakteristika können Betreiber von EE-Anlagen weniger gut über FTR-Differenzverträge entschädigt werden. FTR-Optionen könnten zwar eine Möglichkeit sein, doch sie leiden unter schwerwiegenden Nachteilen in Bezug auf die nötige Absicherung auf der Erlösseite. Daher scheint es vielversprechender zu sein, die Verteilungseffekte auf EE-Stromerzeuger durch eine Anpassung der Vergütungsmechanismen für EE zu adressieren (siehe unten). Wichtig ist, dass die EE-Politiken auch genutzt werden, um den Anliegen der industriellen Nutzer Rechnung zu tragen, Zugang zu langfristigen Verträgen für erschwinglichen CO₂-armen Strom zu erhalten.

Umstellung der bestehenden EE-Politik

Um den Anpassungsbedarf der bestehenden Vergütungsmechanismen für EE in Deutschland zu ermitteln, muss eine Unterscheidung zwischen Kleinanlagen mit einer Einspeisevergütung und Großanlagen mit gleitender Marktprämie getroffen werden. Die bestehenden Einspeisevergütungen müssen nicht angepasst werden, da sie unabhängig von den Strommarktpreisen sind und wenig bis gar nicht flexibel auf die Preise reagieren können. Mit der Einführung eines nodalen Preissystems ist der Erzeuger von Strom aus EE nicht mehr einem einheitlichen zonalen Preis ausgesetzt, sondern dem des Knotens, an dem er angeschlossen ist. Für größere EE-Anlagen kann ein Übergang zur nodalen Preisbildung ohne jegliche Anpassung der Vergütungsmechanismen entsprechend einer gleitenden Marktprämie die finanzielle Tragfähigkeit oder Rentabilität bestehender Projekte beeinträchtigen.

Eine direkte Übertragung des aktuellen Konzepts (mit gewichtetem Durchschnittspreis und individueller Verantwortung für den Verkauf zu lokalen Marktpreisen) würde zu großen Verteilungseffekten führen: Ein EE-Projekt mit gleitender Marktprämie auf einen lokalen Referenzpreis in einer Region mit niedrigeren Standortpreisen würde auf Erlöse verzichten, während ein Projekt in einer Region mit höheren Preisen zusätzliche Gewinne erzielen würde. Eine Option ist die Übertragung der gleitenden Prämie auf stündliche Differenzkontrakte (CfDs) mit ihrem bisherigen Basispreis und dem jeweiligen nodalen Preis als Underlying. Dies vermeidet übermäßige Gewinne aus dem Übergang, während gleichzeitig eine direkte Marktverbindung zum lokalen Preis des EE-Projekts aufrechterhalten wird. Allerdings geht für die Marktteilnehmer dabei bei hohen Marktpreisen der Optionswert der gleitenden Marktprämie verloren. Eine weitere Option wäre die Beibehaltung der gleitenden Marktprämie, definiert auf einem synthetischen deutschlandweiten Referenzpreis des Marktwerts der Technologiegruppe.

Proaktive und automatische Marktmachtbegrenzung

Wie in *Kapitel 3.4* dargestellt, sollte ein zukunftsfähiges Strommarktdesign die Möglichkeiten der Entstehung von Marktmacht überwachen und vorausschauend eindämmen. Ein nodales Preissystem erhöht das Wettbewerbsniveau aller Marktteilnehmer im Vergleich zur zonalen Preisbildung. Dies ist hauptsächlich auf die effizientere und flexiblere Nutzung von Übertragungskapazität zurückzuführen, welche die Elastizität der Nettonachfrage erhöht und damit die Rentabilität der Ausübung von Marktmacht verringert. Insbesondere in kleinen, nachfragedominierten Netzgebieten können Erzeugungsanlagen für die Deckung der Nachfrage unerlässlich sein. Dies ist sowohl in einem nodalen Preissystem als auch bei zonalen Preissystemen der Fall. In einem nodalen Preissystem wurden in der Vergangenheit verschiedene Verfahren zur Begrenzung der Marktmacht eingeführt und teils kombiniert (Graf et al., 2021). Dabei bestehen zwei komplementäre Strategien für Gebotsobergrenzen auf der Grundlage von geprüften, vorverhandelten oder wettbewerblichen Benchmark-Preisen (Graf et al., 2021). Gebotsobergrenzen könnten automatisch für Erzeugungsanlagen gelten, wenn sie in einem nachfragedominierten Knoten mit weitgehend bindenden Importbeschränkungen liegen (entweder durch eine automatisierte Pivotal-Supplier-Regel oder durch den »conduct and impact«-Ansatz, vgl. Graf et al. (2021)).

Marktmachtbegrenzung wird insbesondere bei einem weiteren Anstieg der Wind- und Solarstromerzeugung von besonderer Bedeutung sein, da dadurch das Intraday-Marktvolumen steigt und die Marktmacht abschwächende Wirkung längerfristiger vertraglicher Vereinbarungen nachlässt (Twomey und Neuhoff, 2010).

Netzausbau

Während ein nodales Preissystem die vorhandenen Netzressourcen effizient nutzt, ändert es nichts an der grundsätzlichen Notwendigkeit eines optimal dimensionierten Stromnetzes. Perez-Arriaga et al. (1995) haben gezeigt, dass Netzengpasserlöse u. a. aufgrund der diskreten Natur der Investitionen nur 25 Prozent der Gesamtkosten eines repräsentativen hochvermaschten Übertragungsnetzes decken. Daraus folgt, dass Netzplanung und -regulierung in nodalen Preissystemen in der Praxis nicht grundlegend anders sind als in zonalen Systemen. Dennoch können die Informationen nodaler Preise in einem Planungsprozess genutzt werden, oder sie ermöglichen individuell profitable Investitionen in sogenannte Merchant-Leitungen, die grenzüberschreitend außerhalb des regulatorischen Regimes betrieben werden (Hogan et al., 2010).

Der Gestaltung des Übergangs hin zu einem nodalen Strommarktdesign in einem Schritt unter Berücksichtigung der Interessen und Ziele einzelner Akteure, gesellschaftlicher Transformationsprozesse sowie begleitender politischer Instrumente kommt eine entscheidende Rolle zu, um wichtige Bedenken von Marktteilnehmern, politischen Entscheidungsträgern und Stromverbrauchern zu adressieren und die Akzeptanz gegenüber Veränderungen des Strommarktdesigns nachhaltig zu heben.

4 Energieflexibilität in einem zukunftsfähigen europäischen Strommarktdesign

Autoren: Buhl · Hanny · Schmidt · Schott · Weibelzahl

Damit Energieflexibilitätspotenziale, insbesondere der Industrie, erschlossen und im Stromsystem genutzt werden können, muss der Energieflexibilitätseinsatz für Unternehmen ökonomisch rentabel gestaltet sein. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Kapitel die Gestaltung kurzfristiger Energieflexibilitätsanreize (z. B. im Sinne regulatorischer Änderungen) sowie langfristiger Energieflexibilitätsanreize (z. B. durch eine grundlegende Transformation des Strommarktdesigns) diskutiert. Bereits kurzfristig existieren eine Vielzahl von Maßnahmen zur Hebung von Energieflexibilitätspotenzialen. Langfristig bedarf es einer zielgerichteten Weiterentwicklung des Strommarktdesigns, wobei insbesondere die Schaffung (lokaler) Energieflexibilitätsanreize zur Behebung (lokaler) Netzengpässe, z. B. mittels eines nodalen Preissystems, im Vordergrund steht.

Die Notwendigkeit einer raschen und flächendeckenden Dekarbonisierung zeigt sich zunehmend auch in den gesamteuropäischen Klimaschutzvorgaben. Die Gestaltung eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns in Deutschland und Europa kann in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag zum Erreichen von klimapolitischen Zielsetzungen leisten. Dabei sind insbesondere die Voraussetzungen zu berücksichtigen, unter welchen der Übergang in ein zukunftsfähiges Strommarktdesign für einzelne Länder sinnvoll ist bzw. eine Einbettung in das gesamteuropäische Verbundsystem erfolgen kann. Die dargestellten Ergebnisse legen den Grundstein für die Berechnung und Analyse von Marktergebnissen, z. B. gehandelter Strommengen und -preise, unter Berücksichtigung von verschiedenen Marktdesignoptionen sowie zugehörigen technischen bzw. organisationalen Anpassungen. Um die Auswirkungen einer Transformation des Strommarktdesigns im Detail zu untersuchen, kann die Berechnung von Marktergebnissen parallel zum bestehenden zonalen Preissystem in Deutschland erfolgen. So können mögliche Nebeneffekte alternativer Strommarktdesigns frühzeitig erkannt und durch entsprechende politische Instrumente adressiert werden. Vor diesem Hintergrund tragen die dargestellten Lösungsbausteine und Ergebnisse einerseits zur erfolgreichen kurzfristigen Erschließung dringend benötigter Energieflexibilitätspotenziale bei sowie andererseits zur langfristigen Gestaltung eines zukunftsfähigen europäischen Strommarktdesigns.

5 Literatur

AGORA ENERGIEWENDE, 2014. Der Spotmarktpreis als Index für eine dynamische EEG-Umlage. Vorschlag für eine verbesserte Integration Erneuerbarer Energien durch Flexibilisierung der Nachfrage [online]. Kurzstudie. Berlin [Zugriff am: 2. April 2019]. Verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/dynamische-eeg-umlage/Agora_RAP_Spotmarktpreis_als_Index_fuer_dyn_EEG-Umlage_web.pdf

AGORA ENERGIEWENDE, FRAUNHOFER IWES, STIFTUNG UMWELTENERGIERECHT UND FRAUNHOFER IFSM, 2014. Studie – Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten. Berlin.

AhUNBAY, M., A. ASHOUR NOVIRDOUST, R. BHUIYAN, M. BICHLER, S. BINDU, E. BJØRNDAL, M. BJØRNDAL, H.U. BUHL, J.P. CHAVES-AVILA, H. GERARD, S. GROSS, L. HANNY, J. KNÖRR, C.S. KÖHNEN, L. MARQUES, A. MONTI, K. NEUHOFF, C. NEUMANN, E. OCENIC, M. OTT, M. PICHLMEIER, J.C. RICHSTEIN, M. RINCK, F. RÖHRICH, P.M. RÖHRIG, A. SAUER, J. STRÜKER, M. TRONCIA, J. WAGNER, M. WEIBELZAHL und P. ZILKE, 2021. Electricity Market Design 2030–2050: Shaping Future Electricity Markets for a Climate-Neutral Europe. Whitepaper. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.24406/fit-n-644366>

ALTROCK, M., H. THOMAS und J. VOLLPRECHT, 2016. Power-to-Heat – Kostenbelastungen, Regelenergie und Überschussstrom. EnWZ, 2016(3), 106–112. EnWZ.

ANTONI, O., J. HILPERT, STIFTUNG UMWELTENERGIERECHT, M. KLOBASA und FRAUNHOFER ISI, 2016. Gutachten zu zuschaltbaren Lasten. für das Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Würzburg/Karlsruhe.

ANTONOPOULOS, G., S. VITIELLO, G. FULLI und M. MASERA, 2020. Nodal pricing in the European internal electricity market [online]. Joint Research Centre (European Commission). Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/50ac5c62-8055-11ea-b94a-01aa75ed71a1>

ASHOUR NOVIRDOUST, A., M. BICHLER, C. BOJUNG, H.U. BUHL, G. FRIDGEN, V. GRETSCHKO, L. HANNY, J. KNÖRR, F. MALDONADO, K. NEUHOFF, C. NEUMANN, M. OTT, J.C. RICHSTEIN, M. RINCK, M. SCHÖPF, P. SCHOTT, A. SITZMANN, J. WAGNER und M. WEIBELZAHL, 2021a. Electricity Spot Market Design 2030–2050. Whitepaper. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.24406/fit-n-621457>

ASHOUR NOVIRDOUST, A., R. BHUIYAN, M. BICHLER, H.U. BUHL, G. FRIDGEN, C. FUGGER, V. GRETSCHKO, L. HANNY, J. KNÖRR, K. NEUHOFF, C. NEUMANN, M. OTT, J.C. RICHSTEIN, M. RINCK, F. RÖHRICH, M. SCHÖPF, A. SITZMANN, J. WAGNER und M. WEIBELZAHL, 2021b. Electricity Market Design 2030–2050: Moving Towards Implementation. Whitepaper. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.24406/FIT-N-640928>

AUSFELDER, F., A. SEITZ und S. VON ROON, Hg., 2018. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Methodik, Potenziale, Hemmnisse [online]. Bericht des AP V.6 »Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie« im Kopernikus-Projekt »SynErgie – synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung«. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. ISBN 978-3-89746-206-9.

AUSUBEL, L.M., P. CRAMTON, PYCIA, MAREK, ROSTEK, MARZENA und WERETKA, MAREK, 2014. Demand Reduction and Inefficiency in Multi-Unit Auctions [online]. The Review of Economic Studies, 81(4), 1366–1400. The Review of Economic Studies. Verfügbar unter: [doi:10.1093/restud/rdu023](https://doi.org/10.1093/restud/rdu023)

BELICA, M., K.-M. EHRHART und F. OCKER, 2016. Kritische Beurteilung der geplanten Umstrukturierung des Regelenergiemarktes. ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 05/2016. ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen.

BERTSCH, J., G. FRIDGEN, T. SACHS, M. SCHÖPF, H. SCHWETER und A. SITZMANN, 2017. Ausgangsbedingungen für die Vermarktung von Nachfrageflexibilität. Status-Quo-Analyse und Metastudie. AP IV.2.1 des SynErgie-Projektes, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter Kennzeichen 035FK3Q0.

BERTSCH, J., S. HAGSPIEL und L. JUST, 2016. Congestion management in power systems [online]. Journal of Regulatory Economics, 50(3), 290–327. ISSN 0922-680X. Verfügbar unter: [doi:10.1007/s11149-016-9310-x](https://doi.org/10.1007/s11149-016-9310-x)

BICHLER, M., H.U. BUHL, J. KNÖRR, F. MALDONADO, P. SCHOTT, S. WALDHERR und M. WEIBELZAHL, 2022. Electricity Markets in a Time of Change: A Call to Arms for Business Research. Schmalenbach Journal of Business Research. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s41471-021-00126-4>

BIKHCHANDANI, S. und J.M. OSTROY, 2002. The Package Assignment Model [online]. *Journal of Economic Theory*, 107(2), 377–406. ISSN 00220531. Verfügbar unter: doi:10.1006/jeth.2001.2957

BIRKNER, P., O. ANTONI und J. HILPERT, 2013. Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Power-to-Heat. *EuroHeat&Power*, 2013, 20–23. *EuroHeat&Power*.

BJØRNDAL, E., M. BJØRNDAL, H. CAI und E. PANOS, 2018. Hybrid pricing in a coupled European power market with more wind power [online]. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 919–931. ISSN 03772217. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ejor.2017.06.048

BOGENSPERGER, A., T. ESTERMANN, F. SAMWEBER, S. KÖPPL, M. MÜLLER und ZEISELMAIR, ANDREAS, WOHLSCHLAGER, DANIELA, 2018. *Smart Meter – Umfeld, Technik, Mehrwert*. München.

BORENSTEIN, S., BUSHNELL, JAMES B. und F.A. WOLAK, 2002. Measuring market inefficiencies in California's restructured wholesale electricity market. *American Economic Review*, (92), 1376–1405. ISSN 0002-8282.

BÖSCHEN, S., A. GRUNWALD, B.-J. KRINGS und C. RÖSCH, Hg., 2021. *Technikfolgenabschätzung. Handbuch für Wissenschaft und Praxis*. Baden-Baden: Nomos. Edition sigma. ISBN 978-3-8487-6070-1.

BUCHMÜLLER, C. und B. HENNIG, 2016. Zuschaltbare Lasten, Innovationsausschreibungen, Experimentierklauseln und vieles mehr – Die Entstehung eines Rechtsrahmens für die Sektorkopplung. *ZNER*, 384–391. *ZNER*.

BUHL, H.U., G. FRIDGEN, M.-F. KÖRNER, M. SCHÖPF, P. SCHOTT und A. SITZMANN, 2019. Kapitel A.2.2: Strommärkte und Systemdienstleistungen. In: A. Sauer, E. Abele und H.U. Buhl, Hg. *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

BUHL, H.U., N. GABREK, J.-N. GERDES, C. KAYMAKCI, K. RAULAND, F. RICHTER, A. SAUER, C. SCHNEIDER, P. SCHOTT, S. SEIFERMANN, A. TRISTÁN, J. WAGNER, F. WAGON, M. WEIBELZAHL, J. WEISSFLOG und B. ZACHMANN, 2021. *Industrial flexibility options and their applications in a future energy system*. Whitepaper. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.24406/fit-n-639062>

BUNDESNETZAGENTUR UND BUNDESKARTELLAMT, 2020. *Monitoringbericht 2020* [online]. Bonn.

BUNDESNETZAGENTUR, 2017. *Hintergrundpapier: Ergebnisse der Ausschreibung für Windenergieanlagen an Land vom 1. Mai 2017, vom 1. August 2017, und vom 1. November 2017*.

BUNDESNETZAGENTUR, 2021. *Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit – Gesamtes Jahr 2020* [online] [Zugriff am: 18. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3

BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V., 2021. *Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung unionsrechtlicher Vorgaben und zur Regelung reiner Wasserstoffnetze im Energiewirtschaftsrecht. Referentenentwurf des Energiewirtschaftsrechtsänderungsgesetzes vom 22. Januar 2021, Berlin, 27. Januar 2021*.

CALIFORNIA ISO, 1999. *Market power in the San Diego basin. Addendum to Annual Report on Market Issues and Performance*.

CARAMANIS, M., E. NTAPOU, W.W. HOGAN, A. CHAKRABORTY und J. SCHOENE, 2016. Co-Optimization of Power and Reserves in Dynamic T&D Power Markets With Nondispatchable Renewable Generation and Distributed Energy Resources [online]. *Proceedings of the IEEE*, 104(4), 807–836. ISSN 0018-9219. Verfügbar unter: doi:10.1109/JPROC.2016.2520758

CONSENTEC, FRAUNHOFER ISI, NAVIGANT UND STIFTUNG UMWELTRECHT, 2019. Untersuchung zur Beschaffung von Redispatch. Sammlung verschiedener Berichte und Kurzpapiere aus dem Vorhaben "Untersuchung zur Beschaffung von Redispatch" (Projekt 055/17).

CRAMTON, P., 2017. Electricity market design [online]. *Oxford Review of Economic Policy*, 33(4), 589–612. ISSN 0266-903X. Verfügbar unter: doi:10.1093/oxrep/grx041

EHRHART, K.-M., F. OCKER und M. OTT, 2021. Analyse des neu eingeführten Regelarbeitsmarktes [online]. *ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 3. ET. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* [Zugriff am: 18.10.21]. Verfügbar unter: <https://www.zew.de/publikationen/analyse-des-neu-eingefuehrten-regelarbeitsmarktes>

FRAUNHOLZ, C., D. HLADIK, D. KELES, D. MÖST und W. FICHTNER, 2020. On the Long-Term Efficiency of Market Splitting in Germany.

FRONTIER ECONOMICS LTD und BET BÜRO FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND TECHNISCHE PLANUNG GMBH, 2016. Kosten und Nutzen einer Dynamisierung von Strompreiskomponenten als Mittel zur Flexibilisierung der Nachfrage. Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) [online] [Zugriff am: 17. März 2019]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-dynamisierung-strompreiskomponenten.pdf?__blob=publicationFile&v=4

GIMPEL, H., L. HANNY, M. OTT, J. WAGNER, M. WEIBELZAHL, M. BICHLER und S. OBER, 2021. Market Success: The Quest for the Objectives and Success Factors of Markets. In: H. Gimpel, J. Krämer, D. Neumann, J. Pfeiffer, S. Seifert, T. Teubner, D.J. Veit und A. Weidlich, Hg. *Market Engineering*. Cham: Springer International Publishing, S. 21–44. ISBN 978-3-030-66660-6.

GIMPEL, H., N.R. JENNINGS, G.E. KERSTEN, A. OCKENFELS und C. WEINHARDT, 2008. Market Engineering: A Research Agenda. In: H. Gimpel, N.R. Jennings, G.E. Kersten, A. Ockenfels und C. Weinhardt, Hg. *Negotiation, auctions, and market engineering*. International seminar, Dagstuhl Castle, Germany, November 12–17, 2006, rev. selected papers. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-77553-9.

GNEISENAU, C. VON und J. HILPERT, 2020. Zuschaltbare Lasten im System der Anreizregulierung – Wie ist der Rechtsrahmen im Vergleich zum Redispatch von Erzeugungsanlagen? *Würzburger Studien zum Umweltenergierecht* Nr. 18.

GNEISENAU, C. VON, 2021. Zuschaltbare Lasten im System der Anreizregulierung. Status quo und Optionen zur Weiterentwicklung des Rechtsrahmens. *N&R*, 130–135. *N&R*.

GÓMEZ, T., R. COSENT und J. CHAVEZ, 2020. Flexible Network Access, local flexibility market mechanisms, and cost-reflective tariffs: Three regulatory tools to foster decarbonized electricity networks. *Oxford Energy Forum*, (124), 18–21. *Oxford Energy Forum*.

GRAF, C., E. LA PERA, F. QUAGLIA und F. WOLAK, 2021. Market Power Mitigation Mechanisms for Wholesale Electricity Markets: Status Quo and Challenges [online]. *FSI Stanford Working Paper*. Verfügbar unter: <https://fsi.stanford.edu/publication/market-power-mitigation-mechanisms-wholesale-electricity-markets-status-quo-and>

GRIMM, V., A. MARTIN, M. WEIBELZAHL und G. ZÖTTL, 2016. On the long run effects of market splitting: Why more price zones might decrease welfare [online]. *Energy Policy*, 94, 453–467. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2015.11.010

HARPER, R., T. KERN und S. VON ROON, 2021. Derivation of future intraday price series from the outputs of energy system modelling. *Wien*.

HARVEY, S.M. und W.W. HOGAN, 2000. Nodal and zonal congestion management and the exercise of market power. *Working paper*.

HOGAN, W., J. ROSELLÓN und I. VOGELSSANG, 2010. Toward a combined merchant-regulatory mechanism for electricity transmission expansion [online]. *Journal of Regulatory Economics*, 38(2), 113–143. ISSN 0922-680X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11149-010-9123-2

JÄCKLE, F., M. SCHÖPF, J. TÖPPEL und F. WAGON, 2019. Risk Mitigation Capability of Flexibility Performance Contracts for Demand Response in Electricity Systems. In: *Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems*. Stockholm: Schweden. ISBN 9781733632508.

JANSEN, M., C. RICHTS, N. GERHARDT, T. LENCK und M.-L. HEDDRICH, 2015. *Strommarkt-Flexibilisierung. Hemmnisse und Lösungskonzepte*.

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021. Positionspapier zu regulatorischen Änderungen [online] [Zugriff am: 21.10.21]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/09/SynErgie-Positionspapier-Regulatorische-Rahmenbedingungen.pdf>

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2022. Flexibilitätseinsatzplanungstool [online] [Zugriff am: 24.01.2022]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/flexibilitaetseinsatzplanungstool>

KUNZ, F., K. NEUHOFF und J. ROSELLÓN, 2016. FTR allocations to ease transition to nodal pricing: An application to the German power system [online]. *Energy Economics*, 60, 176–185. ISSN 01409883. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eneco.2016.09.018

LÄNDNER, E.-M., A. MÄRTZ, M. SCHÖPF und M. WEIBELZAHN, 2019. From energy legislation to investment determination: Shaping future electricity markets with different flexibility options [online]. *Energy Policy*, 129, 1100–1110. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2019.02.012

LERNER, A.P., 1934. The concept of monopoly and the measurement of monopoly power. *The Review of Economic Studies*, (1), 157–175. *The Review of Economic Studies*.

LIBEROPOULOS, G. und P. ANDRIANESIS, 2016. Critical Review of Pricing Schemes in Markets with Non-Convex Costs [online]. *Operations Research*, 64(1), 17–31. ISSN 0030-364X. Verfügbar unter: doi:10.1287/opre.2015.1451

LIST, J. und D. LUCKING-REILEY, 2000. Demand reduction in multiunit auctions: Evidence from a sportscard field experiment. *American Economic Review*, (90), 961–972. ISSN 0002-8282.

MADANI, M., C. RUIZ, S. SIDDIQUI und M. VAN VYVE, 2018. Convex Hull, IP and European Electricity Pricing in a European Power Exchanges setting with efficient computation of Convex Hull Prices [online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1804.00048v1>

MAURER, C., C. ZIMMER und L. HIRTH, 2018. *Nodale und zonale Strompreissysteme im Vergleich. Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* [online]. Consentec GmbH; Neon Neue Energieökonomik GmbH. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/nodale-und-zonale-strompreissysteme-im-vergleich.html>

MEEUS, L., K. VERHAEGEN und R. BELMANS, 2009. Block order restrictions in combinatorial electric energy auctions [online]. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1202–1206. ISSN 03772217. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ejor.2008.04.031

MIJATOVIC, L., S. ROCKSTUHL und F. WAGON, 2022. Diversifikation des marktlichen Risikos bei der Vermarktung industrieller Energieflexibilität im Kontext von Demand Response [online]. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 1–19. ISSN 1866-2765. Verfügbar unter: doi:10.1007/s12398-022-00318-3

- NEUHOFF, K. und R. BOYD, 2011. International Experiences of Nodal Pricing Implementation. Frequently Asked Questions [online]. Working Document. Climate Policy Initiative. Verfügbar unter: <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2011/12/Nodal-Pricing-Implementation-QA-Paper.pdf>
-
- NEUHOFF, K., J. BARQUIN, J.W. BIALEK, R. BOYD, C.J. DENT, F. ECHAVARREN, T. GRAU, C. VON HIRSCHHAUSEN, B.F. HOBBS, F. KUNZ, C. NABE, G. PAPAETHYMIU, C. WEBER und H. WEIGT, 2013. Renewable electric energy integration: Quantifying the value of design of markets for international transmission capacity [online]. *Energy Economics*, 40, 760–772. ISSN 01409883. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eneco.2013.09.004
-
- OLSTHOORN, M., J. SCHLEICH und M. KLOBASA, 2015. Barriers to electricity load shift in companies: A survey-based exploration of the end-user perspective [online]. *Energy Policy*, 76, 32–42. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2014.11.015
-
- OREN, S., P.T. SPILLER, P. VARAIYA und F. WU, 1995. Nodal prices and transmission rights: a critical appraisal. *The Electricity Journal*, (8), 24–35. *The Electricity Journal*.
-
- ÖZALAY, B., H. SCHUSTER, J. KELLERMANN, J. PRIEBE und A. MOSER, 2019. Wirtschaftlicher Vorteil der netzdienlichen Nutzung von Flexibilität in Verteilnetzen [online] [Zugriff am: 31.12.20]. Verfügbar unter: https://www.e-bridge.de/wp-content/uploads/2019/02/20190212_Studie-E-Bridge_Vorteil_netzdienlicher-Flexibilit%C3%A4t_final.pdf
-
- PATTON, D.B., P. LEE VAN SCHAİK, J. CHEN und R. PALAVADI, 2020. 2019 state of the market report for the New York ISO markets.
-
- PEREZ-ARRIAGA, I.J., F.J. RUBIO, J.F. PUERTA, J. ARCELUZ und J. MARIN, 1995. Marginal pricing of transmission services: an analysis of cost recovery [online]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1), 546–553. ISSN 08858950. Verfügbar unter: doi:10.1109/59.373981
-
- POGANIETZ, W.-R., C. TIMPE, L. BECKER, T. HÖFER, M. KOCH, D. SEEBACH, A. WEISS und T. WILDGRUBE, 2019. Entwicklungspfade aus dem ENSURE-Projekt [online]. Transformation des Energiesystems bis zum Jahr 2030 [Zugriff am: 18.10.21]. Verfügbar unter: https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2020/04/ENSURE_Broschuere_Storylines_20200420.pdf
-
- RICHSTEIN, J.C., C. LORENZ und K. NEUHOFF, 2020. An auction story: How simple bids struggle with uncertainty [online]. *Energy Economics*, 89, 104784. ISSN 01409883. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eneco.2020.104784
-
- RICHSTEIN, J.C., K. NEUHOFF und N. MAY, 2018. Europe’s power system in transition: How to couple zonal and locational pricing systems? Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/10419/184675>
-
- SÄCKER, F.J., Hg., 2019. Berliner Kommentar zum Energierecht. Band 1 (Halbband 1): Grundlagen §§ 1–42a EnWG. Frankfurt am Main.
-
- SAMWEBER, F., S. KÖPPL, A. BOGENSPERGER, F. BÖING, A. BRUCKMEIER, T. ESTERMANN, M. MÜLLER und A. ZEISELMAIR, 2017. Projekt MONA 2030: Bewertung Netzoptimierender Maßnahmen gemäß technischer, ökonomischer, ökologischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Kriterien – Teilbericht Einsatzreihenfolgen. München.
-
- SARFATI, M., M. HESAMZADEH und P. HOLBERG, 2019. Production efficiency of nodal and zonal pricing in imperfectly competitive electricity markets. *Energy Strategy Reviews*, (24). *Energy Strategy Reviews*.
-

SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

SCHERMEYER, H., C. VERGARA und W. FICHTNER, 2018. Renewable energy curtailment: A case study on today's and tomorrow's congestion management [online]. *Energy Policy*, 112, 427–436. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2017.10.037

SCHOTT, P., J. SEDLMEIR, N. STROBEL, T. WEBER, G. FRIDGEN und E. ABELE, 2019. A generic data model for describing flexibility in power markets. *Energies*, 12(10), 1893. *Energies*.

SEVERIN, Y., S. MISCHINGER, A.R.D. MÜLLER und H. SEIDL, 2019. Regulatorischer Handlungsbedarf zur Erschließung und Nutzung netzdienlicher Flexibilität [online]. dena-Analyse [Zugriff am: 30.12.20]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Dena-ANALYSE_Regulatorischer_Handlungsbedarf_zur_Erschliessung_und_Nutzung_netzdienlicher_Flexibilitaet.pdf

SIOSHANSI, R., S. OREN und R. O'NEILL, 2010. Three-part auctions versus self-commitment in day-ahead electricity markets [online]. *Utilities Policy*, 18(4), 165–173. ISSN 09571787. Verfügbar unter: doi:10.1016/J.JUP.2010.05.005

TWOMEY, P. und K. NEUHOFF, 2010. Wind power and market power in competitive markets [online]. *Energy Policy*, 38(7), 3198–3210. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2009.07.031

50HERTZ TRANSMISSION GMBH, AMPRION GMBH, TENNET TSO GMBH, TRANSNETBW GMBH, 2019. Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2019 – Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber [online] [Zugriff am: 28.02.2022]. Verfügbar unter: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_V2019_2_Entwurf_Teil_1.pdf

WEISER, E. und S. SCHÄFER-STRADOWSKY, 2018. Weiterentwicklungsbedürfnis und -potentiale der Regelung zu zuschaltbaren Lasten in § 13 Abs. 6a EnWG. *N&R*, 13–19. *N&R*.

WOLAK, F.A., 2011. Measuring the Benefits of Greater Spatial Granularity in Short-Term Pricing in Wholesale Electricity Markets [online]. *American Economic Review*, 101(3), 247–252. ISSN 0002-8282. Verfügbar unter: doi:10.1257/aer.101.3.247

ZARNIKAU, J., C.K. WOO und R. BALDICK, 2014. Did the introduction of a nodal market structure impact wholesale electricity prices in the Texas (ERCOT) market? [online]. *Journal of Regulatory Economics*, 45(2), 194–208. ISSN 0922-680X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11149-013-9240-9





A.2

Potenzialanalyse und systemische
Betrachtung

Management Summary

Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Ausbaus der erneuerbaren Energien und einer im Zuge der Transformation zunehmenden Elektrifizierung der Industrieprozesse kann die industrielle Energieflexibilität einen wichtigen systemischen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten. Bereits aus heutiger Sicht bestehen perspektivisch umfangreiche Energieflexibilitätspotenziale der Industrie in Deutschland: Im Fall des Lastverzichts resultiert für Energieflexibilitätsmaßnahmen mit einer Abrufdauer von mindestens 15 Minuten ein Energieflexibilitätspotenzial von 10,7 GW bzw. 48 TWh/a, im Fall einer Lasterhöhung 9,0 GW bzw. 46 TWh/a. Außerhalb Deutschlands zeigt sich insbesondere für Prozesse in Ländern mit vergleichbaren industriellen und technischen Rahmenbedingungen ein erhebliches Energieflexibilitätspotenzial. Darüber hinaus entstehen durch neue Technologien und Energieträgerwechsel bei hohem industriellem Klimaschutzambitionsniveau infolge politischer Zielentwicklungspfade zusätzliche Energieflexibilitätspotenziale in der Industrie. Aus den untersuchten industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen ergibt sich ein CO₂-Vermeidungspotenzial von mindestens 700.000 Tonnen CO₂ im Bezugsjahr 2019.

Autoren

Ebner, Michael
mebner@ffe.de
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Am Blütenanger 71, 80995 München

Gabrek, Nadine
n.gabrek@hs-mannheim.de
Hochschule Mannheim
Paul-Wittsack-Straße 10, 68163 Mannheim

Gerdes, Jan-Niklas
jan-niklas.gerdes@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Guminski, Andrej
aguminski@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München

Hübner, Tobias
thuebner@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München

Jetter, Fabian
fjetter@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München

Metzger, Konstantin
kmetzger@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München

Neitz-Regett, Anika
aregett@ffe.de
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Am Blütenanger 71, 80995 München

Pastowski, Andreas
andreas.pastowski@wupperinst.org
Wuppertal Institut
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

Pichler, Verena
vpichler@ffe.de
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Am Blütenanger 71, 80995 München

Regener, Vincenz
vregener@ffe.de
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Am Blütenanger 71, 80995 München

Schneider, Christian
christian.schneider@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Seifermann, Stefan
s.seifermann@hs-mannheim.de
Hochschule Mannheim
Paul-Wittsack-Straße 10, 68163 Mannheim

Tristán, Alejandro
alejandro.tristan.jimenez@ipa.fraunhofer.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Veitengruber, Frank
fveitengruber@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München

von Roon, Serafin
sroon@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München

Zachmann, Bastian
b.zachmann@hs-mannheim.de
Hochschule Mannheim
Paul-Wittsack-Straße 10, 68163 Mannheim

1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Das *Kapitel A.2* thematisiert die Potenzialanalyse für industrielle Energieflexibilität und ordnet die Erkenntnisse in einen systemischen Kontext ein. Bevor in *Kapitel 2* die industriellen Energieflexibilitätspotenziale auf nationaler und internationaler Ebene analysiert werden, wird in *Kapitel 1* aufgezeigt, welche methodischen Schritte notwendig sind, um Energieflexibilitätsmaßnahmen und -potenziale in Unternehmen in Form von Energieflexibilitätsaudits systematisch zu erheben. *Kapitel 3* zeigt anschließend auf, welche Wechselwirkungen zwischen der Bereitstellung von Energieflexibilität und der Vermeidung von CO₂-Emissionen vorliegen. Hierzu wird in *Kapitel 3.1* das CO₂-Vermeidungspotenzial aus dem Einsatz industrieller Energieflexibilität abgeschätzt. Anschließend folgt in *Kapitel 3.2* eine Analyse zu den Auswirkungen von industriellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Energieflexibilität, bevor in *Kapitel 3.3* auf den Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft eingegangen wird. Vor dem Hintergrund, dass die Bereitstellung von Energieflexibilität einen wichtigen Beitrag für das Energiesystem liefern kann, wird in *Kapitel 4* der systemische Mehrwert verschiedener Flexibilitätsoptionen bestimmt.

2 Energieflexibilitätsaudits

Autoren: Tristán · Gerdes · Schneider

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das Energieflexibilitätsaudit und beschreibt dessen Anforderungen, Struktur und methodische Schritte. Die Ergebnisse können in *Kapitel A.3* eingesehen werden.

Die zunehmende Volatilität der Stromspeisung aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer, fluktuierender Energiequellen hat den Industriesektor dazu veranlasst, sich zunehmend um einen flexiblen Stromverbrauch zu bemühen, um seinen Gesamtenergiebedarf zu optimieren und gleichzeitig seine Nachhaltigkeit und Resilienz zu erhöhen. Energieflexibilitätsmaßnahmen werden bereits in verschiedenen industriellen Wirtschaftszweigen eingesetzt, um den Stromverbrauch zu flexibilisieren (Sauer et al., 2019). Dennoch ergeben sich aus dem derzeitigen Stand der Technik zwei grundlegende Fragestellungen:

- Existieren innerhalb der bereits energieflexiblen industriellen Wirtschaftszweige zusätzliche industrielle Systeme mit hohem Energieflexibilitätspotenzial?
- Was sind die Energieflexibilitätspotenziale der industriellen Wirtschaftszweige, die bisher noch nicht analysiert wurden?

Um diese beiden Kernfragen zu beantworten, wurde das Energieflexibilitätsaudit so konzipiert, dass drei übergeordnete Ziele erreicht werden: Erstens die systematische Identifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen in Fabriken, unabhängig von dem hergestellten Produkt oder dem industriellen Wirtschaftszweig. Zweitens die Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials und anderer relevanter Charakterisierungsparameter der verfügbaren Energieflexibilitätsmaßnahmen. Drittens

die Bereitstellung einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung der Ziele, die anhand der verfügbaren Energieflexibilitätsmaßnahmen je Produktionsstandort erreicht werden können. Diese Ziele, die als industrielle Energieflexibilitätsziele bezeichnet werden, sind die Folgenden (VDI 5207 Blatt 1, 2020):

- Intelligente Reaktion auf die Volatilität der Strompreise
- Proaktive Vermarktung der Energieflexibilitätsmaßnahmen
- Maximierung der Nutzung der lokalen konventionellen Kraftwerke
- Maximierung der Nutzung des Erneuerbare-Energie-Portfolios
- Peak-Shaving (Reduktion der Spitzenlast und damit der jährlichen Netzentgelte)
- Atypische Netznutzung
- Erhöhung der Resilienz der firmeneigenen Energieinfrastruktur

2.1 Methodische Anforderungen und allgemeine Struktur des Energieflexibilitätsaudits

Die Norm DIN 16247-1 definiert sechs Anforderungen an ein Energieauditverfahren. Das Energieauditverfahren muss angemessen, vollständig, repräsentativ, rückverfolgbar, zweckdienlich und verifizierbar sein (DIN EN 16247-1:2012-10, 2012). Diese Anforderungen wurden als Grundlage für das Energieflexibilitätsaudit herangezogen und wie folgt interpretiert:

- **Angemessen:** Die Methodik konzentriert sich auf die Identifizierung und Charakterisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen in industriellen Systemen und ermöglicht es Unternehmen, über deren zielgerichtete Umsetzung zu entscheiden.
- **Vollständig:** Die Methodik ist auf die Heterogenität der industriellen Systeme innerhalb der Fabriken und die Vielfalt dieser Fabriken anzuwenden.
- **Repräsentativ:** Die Methodik berücksichtigt alle energieflexiblen, betriebsrelevanten Merkmale der einzelnen industriellen Systeme und der Fabrik.
- **Rückverfolgbar:** Die Methodik muss einem strukturierten Verfahren folgen, bei dem nach und nach alle industriellen Systeme in einer Fabrik und ihre Merkmale analysiert werden.
- **Zweckdienlich:** Die Methodik muss eine Analyse der technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit und der Risiken der Umsetzung der verfügbaren Energieflexibilitätsmaßnahmen beinhalten.
- **Verifizierbar:** Die Methodik sollte den Unternehmen Instrumente an die Hand geben, mit denen sie die technisch-wirtschaftliche Leistung der umgesetzten Energieflexibilitätsmaßnahmen nachverfolgen können.

Um diese Anforderungen zu erfüllen und die angestrebten Energieflexibilitätsziele zu erreichen, ist das Energieflexibilitätsaudit in zwei Phasen unterteilt (*Abbildung 1*).

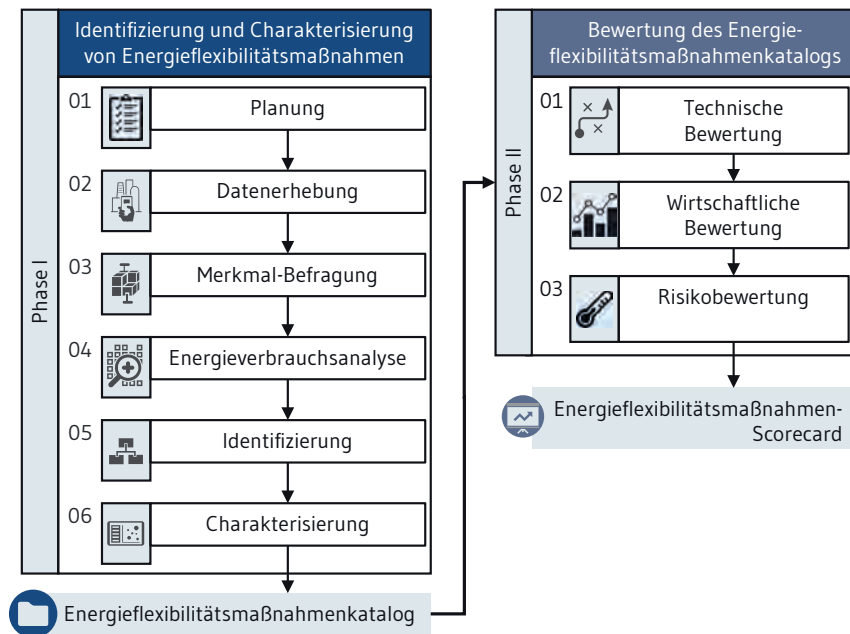


Abb. 1 Überblick über das Verfahren des Energieflexibilitätsaudits

In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick über den Ablauf der beiden Phasen des Energieflexibilitätsaudits gegeben.

2.2 Phase I: Identifizierung und Charakterisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die Identifizierung und Charakterisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen besteht aus sechs Schritten, die darauf abzielen, alle verfügbaren und betriebsfreundlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen in einer Fabrik zu ermitteln. Diese Schritte werden im Folgenden beschrieben:

- **Schritt 1: Planung:** In einem ersten Schritt werden der Umfang und die relevanten Energieflexibilitätsziele vereinbart. Der Umfang wird durch die Festlegung der in der Fabrik vorhandenen industriellen Systeme definiert. Industrielle Systeme werden als Gruppen von Komponenten verstanden, die zusammenwirken, um eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen. Diese Systeme gehören zu einer von vier technischen Einheiten: Produktionssysteme, Zusatzsysteme, technische Gebäudeausrüstungssysteme oder Energie- und Mediensysteme (Tristán et al., 2020). Die Berücksichtigung aller oder nur einiger der verfügbaren industriellen Systeme

hängt von der Topologie der Fabrik, der für die Analyse verfügbaren Zeit und den verfügbaren historischen Energieverbrauchsdaten dieser Systeme ab.

Die Entscheidung über die relevanten Energieflexibilitätsziele richtet sich danach, welche der vorgenannten Energieflexibilitätsziele erreichbar und mit dem Kontext, in dem sich die Fabrik befindet, vereinbar sind.

- **Schritt 2: Datenerhebung:** Im zweiten Schritt werden die relevanten historischen Daten gesammelt. Im Wesentlichen handelt es sich bei den erforderlichen historischen Daten um den Energieverbrauch für mindestens ein Jahr und eine Auflösung zwischen 15 Minuten und einer Stunde für jedes industrielle System und auf Werksebene. Zusätzlich werden auch historische Produktionsdaten und Energiekosten der Fabrik miteinbezogen.
- **Schritt 3: Merkmal-Befragung:** Der dritte Schritt besteht in der Erfassung aller relevanten Merkmale für den energieflexiblen Betrieb der analysierten industriellen Systeme. Die relevanten Merkmale gehören zu drei Kategorien (Tristán et al., 2020):
 - a) Physische Merkmale: Sie bestimmen die Art und die Energieverbrauchskapazität des industriellen Systems.
 - b) Operative Merkmale: Sie beschreiben den operativen Ansatz des industriellen Systems.
 - c) Produktionsmerkmale: Sie fassen das Produktionskonzept der Fabrik zusammen.

Die Schritte 1, 2 und 3 werden systematisch mithilfe eines Umfragewerkzeugs durchgeführt, das Unternehmen intuitiv dazu anleitet, die erforderlichen Angaben zu erstellen.

- **Schritt 4: Energieverbrauchsanalyse:** Der vierte Schritt, die Energieverbrauchsanalyse, besteht aus zwei Teilen. Zunächst werden aus allen verfügbaren industriellen Systemen diejenigen herausgefiltert, die für einen energieflexiblen Betrieb geeignet sind. Zu diesem Zweck wird jedes verfügbare industrielle System qualitativ nach seiner Kritikalität, Steuerbarkeit und Pufferkapazität klassifiziert (Tristán, Heuberger und Sauer, 2020; VDI 5207 Blatt 2, 2021). Eine Nichteignung in einem dieser Kriterien disqualifiziert das System für den energieflexiblen Betrieb und wird daher nicht mehr für die Analyse berücksichtigt.

Der zweite Teil der Analyse besteht darin, die historischen Energieverbrauchsdaten des Systems mit Hilfe des k-Means-Algorithmus zu gruppieren, um den historischen Energieverbrauch des industriellen Systems in typische Tagesprofile zu gruppieren. Diese Betriebsprofile beschreiben die verschiedenen täglichen Energieverbrauchsmuster des Systems. Der vollständige Ansatz für die Erstellung typischer Betriebsprofile von Industriesystemen ist in Tristán et al. (2021) dargestellt.
- **Schritt 5: Identifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen:** Im fünften Schritt werden anhand der gesammelten Systemmerkmale und der typischen Betriebsprofile der industriellen Systeme die verfügbaren Energieflexibilitätsmaßnahmen ermittelt. Dies geschieht durch eine Kreuzanalyse-Matrix zwischen den Merkmalen und den vordefinierten Kategorien von Energieflexibilitätsmaßnahmen (Tristán et al., 2020; VDI 5207 Blatt 2, 2021). Die Kreuzanalyse-Matrix zur Identifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen ist in *Abbildung 2* dargestellt.

Merkmale des industriellen Systems	Energieflexibilitätsmaßnahmenkategorien																					
	Organisatorische Maßnahmen							Technische Maßnahmen														
	Pausenzeiten verschieben	Schichtzeiten anpassen	Auftragsreihenfolge ändern	Kapazitätsplanung anpassen	Produktionsstart verschieben	Auftrag unterbrechen	Produktionsreihenfolge ändern	Ressourcenbelegung anpassen	Prozessparameter anpassen	Prozess unterbrechen	Bearbeitungsreihenfolge ändern	Energie speichern (inhärent)	Energiebivalent betreiben	Energie speichern	Energieträger wechseln							
Physische Merkmale	<p style="text-align: center;">Einflussnahme</p> <table style="margin: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">Unterstützend</td> <td style="text-align: center;">▲</td> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">Unklar</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Nachteilig</td> <td style="text-align: center;">▼</td> <td style="text-align: center;">●</td> <td style="text-align: center;">Irrelevant</td> </tr> </table>														Unterstützend	▲	■	Unklar	Nachteilig	▼	●	Irrelevant
Unterstützend															▲	■	Unklar					
Nachteilig															▼	●	Irrelevant					
Typische Betriebsprofile																						
Operative Merkmale																						
Produktionsmerkmale																						

Abb. 2 Kreuzanalysematrix zur Identifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die verschiedenen Merkmale und die typischen Profile können eine von vier verschiedenen Einflüssen auf die Verfügbarkeit jeder Kategorie von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM-Kategorie) haben: unterstützend, nachteilig, unklar oder irrelevant. **Unterstützend** bedeutet, dass die Ausprägung dieses Merkmals im System die Verfügbarkeit der spezifischen EFM-Kategorie unterstützt. **Nachteilig** bedeutet, dass die Ausprägung dieses Merkmals im System die Verfügbarkeit der spezifischen EFM-Kategorie behindert. Eine nachteilige Ausprägung macht die EFM-Kategorie nicht verfügbar. **Unklar** bedeutet, dass der Einfluss dieses Merkmals weiter analysiert werden muss. **Irrelevant** beschreibt, dass das spezifische Merkmal keine Rolle bei der Verfügbarkeit der spezifischen Kategorie spielt (Tristán et al. 2020).

Die daraus resultierenden EFM-Kategorien, in denen alle Ausprägungen der relevanten Merkmale unterstützend oder irrelevant sind, sind die identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen. Diese Maßnahmen werden mit den Stakeholdern des Unternehmens validiert und bilden die verfügbaren Energieflexibilitätsmaßnahmen der Fabrik.

2.2.1 Charakterisierung der verfügbaren Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die verfügbaren Energieflexibilitätsmaßnahmen werden im sechsten Schritt charakterisiert. Dies erfolgt anhand von vier Dimensionen, die sich aus mehreren Parametern zusammensetzen. Die Charakterisierungsdimensionen und ihre Parameter sind in *Abbildung 3* vorgestellt.





Charakterisierungsparameter		Funktionale Dimension	Charakterisierungsparameter		Zeitliche Dimension
		Systembeschreibung			Abrufdauer
		EFM-Kategorie			Aktivierungsdauer
		Operatives Konzept			Deaktivierungsdauer
		Anpassungsfaktor			Regenerationsdauer
		Anpassungsbeziehung			Gültigkeit
		Betriebsarten			Abrufhäufigkeit
	Ausführungsebene				
Charakterisierungsparameter		Leistungsbezogene Dimension	Charakterisierungsparameter		Wirtschaftliche Dimension
		Art der Flexibilität			Investitionskosten
		Flexibilisierbare Leistung			Abrufkosten
		Flexibilisierbare Energieträger			Instandhaltungskosten
		Flexibilisierbare Energie			Erwartete Amortisationsdauer
				Spezifische Kosten	

Abb. 3 Charakterisierungsstruktur von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Diese Charakterisierungsstruktur wird in Tristán et al. (2020) detailliert erläutert und besteht aus der funktionalen, zeitlichen, leistungsbezogenen und wirtschaftlichen Dimension. Dadurch wird eine standardisierte Beschreibung der Energieflexibilitätsmaßnahme erreicht, die die Bewertung, Implementierung und das Management dieser Maßnahmen unterstützt.

Die meisten dieser Parameter sind konsistent mit den Kennzahlen des Energieflexibilitätsdatenmodells, das für die standardisierte Kommunikation von Energieflexibilitätsmaßnahmen verwendet und in *Kapitel B.3* beschrieben wird.

Sobald alle Energieflexibilitätsmaßnahmen charakterisiert sind, werden sie in Form von Steckbriefen gesammelt, die den EFM-Katalog bilden. Eine abschließende Diskussion über den EFM-Katalog wird mit den Stakeholdern des Unternehmens geführt, um die Energieflexibilitätsmaßnahmen und ihren Umfang zu genehmigen und zu Phase II des Auditverfahrens überzugehen.

2.3 Phase II: Bewertung des EFM-Katalogs

Phase II besteht aus der technisch-wirtschaftlichen Bewertung des EFM-Katalogs im Hinblick auf die Fähigkeit der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen, die zuvor definierten Energieflexibilitätsziele zu erreichen, und deren Umsetzungsrisiken. Die folgenden Unterkapitel enthalten eine kurze Beschreibung der einzelnen Schritte von Phase II:

- **Schritt 1: Technische Bewertung:** In diesem Schritt werden die Charakterisierungsparameter der Energieflexibilitätsmaßnahmen mit den spezifischen technischen Anforderungen pro industriellem Energieflexibilitätsziel (*Kapitel 1*) verglichen. Jede Energieflexibilitätsmaßnahme kann daher diese Anforderungen einzeln oder in Kombination erfüllen. Die Maßnahmen, die die Anforderungen in keiner Form erfüllen können, werden für das jeweilige Ziel nicht weiter berücksichtigt. Zu diesem Zweck wurde eine Anforderungsmatrix pro Ziel für den aktuellen deutschen Energiekontext erstellt.
- **Schritt 2: Wirtschaftliche Bewertung:** Für diejenigen Energieflexibilitätsmaßnahmen, die die technischen Anforderungen eines bestimmten industriellen Energieflexibilitätsziels erfüllen, werden die Brutto- und Nettoerlöse berechnet. Zu diesem Zweck wird der aktuelle deutsche Kontext sowohl in Bezug auf die Energieregulierung als auch auf den Markt verwendet, um die jährlichen Bruttoerlöse zu berechnen, die durch den Einsatz der Maßnahme erzielt werden können. Die Kosten in Form von spezifischen Kosten, die in der Charakterisierung kalkuliert sind, werden dann von den jährlichen Erlösen abgezogen, um die erwarteten Nettoerlöse pro Energieflexibilitätsmaßnahme und industriellem Energieflexibilitätsziel zu erhalten.
- **Schritt 3: Risikobewertung:** Bei der Risikobewertung handelt es sich um eine qualitative Analyse der potenziellen Risiken, welche die Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen mit sich bringen könnte, insbesondere in Bezug auf die Energiekosten sowie Produktionskosten und -kontinuität.

Phase II schließt mit der Erstellung einer EFM-Scorecard ab, welche die technische und wirtschaftliche Eignung der identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Verfolgung der einzelnen Energieflexibilitätsziele sowie die Umsetzungsrisiken vergleicht (*Abbildung 4*). Die Scorecard ermöglicht es Unternehmen, Entscheidungen über die Umsetzung und Nutzung ihrer Energieflexibilitätsmaßnahmen zu treffen.

Energieflexibilitätsmaßnahme	Energieflexibilitätsziele																							
	Intelligente Reaktion auf die Volatilität der Strompreise			Proaktive Vermarktung der Energieflexibilitätsmaßnahmen			Maximierung der Nutzung der lokalen konventionellen Kraftwerke			Maximierung der Nutzung des erneuerbaren Energieportfolios			Peak-Shaving			Atypische Netznutzung			Erhöhung der Resilienz der firmeneigenen Energieinfrastruktur					
	TA	RS	RI	TA	RS	RI	TA	RS	RI	TA	RS	RI	TA	RS	RI	TA	RS	RI	TA	RS	RI			
EFM-A																								
EFM-B																								
EFM-C																								

TA: Technische Anforderungen | RS: Jährliche Nettoerlöse | RI: Umsetzungsrisiken

Abb. 4 Vereinfachte Version der EFM-Scorecard

3 Analyse der Energieflexibilitätspotenziale

Autoren: Veitengruber · Jetter · Ebner · Regener · Guminski · von Roon

Im Folgenden werden beginnend mit *Kapitel 3.1* die aktuellen Erkenntnisse zum industriellen Energieflexibilitätspotential in Deutschland beschrieben, bevor in *Kapitel 3.2* deren örtliche Verfügbarkeit dargestellt wird. *Kapitel 3.3* zeigt auf, welche Prozesse und Länder sich im internationalen Vergleich zu Deutschland potenziell für eine verbraucherseitige Energieflexibilisierung eignen könnten und damit potenzielle Exportländer für industrielle Flexibilitätstechnologien sind.

3.1 Energieflexibilitätspotenziale der deutschen Industrie

3.1.1 Einordnung und Bilanzraum für Deutschland

Im Rahmen der Flexibilitäts Potenzialanalyse werden sowohl industrielle Schlüsselproduktionsprozesse als auch Querschnittstechnologien, d.h. wirtschaftszweigunabhängige Technologieanwendungen, betrachtet (*Abschnitt C*). Zusätzlich gehen in die Analyse acht weitere Wirtschaftszweige der Grundstoffindustrie ein, die in Ausfelder et al. (2018) bereits ausführlich untersucht wurden. Hierzu gehört z.B. die Zement- und Glasherstellung. Seitens der Unternehmen erfolgt sowohl eine Detailanalyse hinsichtlich möglicher Energieflexibilitätsmaßnahmen und Energieflexibilitätspotenziale sowie jeweils eine Hochrechnung der identifizierten Energieflexibilitätspotenziale auf die Wirtschaftszweige. Anschließend werden die Daten aller betrachteten Prozesse und Technologien konsolidiert und auf Deutschlandebene aggregiert.

Nachdem in Sauer et al. (2019) bereits allgemeine Begriffsdefinitionen sowie bisherige Analysen im Bereich der industriellen Energieflexibilität und die grundsätzliche Methodik zur Beschreibung und Erhebung der Energieflexibilitätspotenziale erfasst sind, liegt der Fokus im Folgenden auf der Erweiterung bestehender Forschungsergebnisse und -erkenntnisse.

3.1.2 Aggregation der industriellen Energieflexibilitätspotenziale in Deutschland

Unter Anwendung der Methodik aus Sauer et al. (2019) werden die Energieflexibilitätspotenziale für Deutschland aus heutigen »Potenzialen« und zukünftigen »Perspektiven« aggregiert. Das aggregierte Energieflexibilitätspotenzial ist deshalb aus heutiger Sicht noch nicht direkt technisch nutzbar. Da in der Industrie die Lastgangerfassung des Stromverbrauchs auf 15-Minuten-Intervallen basiert, wird neben dem maximalen Energieflexibilitätspotenzial, das unter der Annahme einer kürzest möglichen Abrufdauer vorliegt (≤ 5 min), das Energieflexibilitätspotenzial für Energieflexibilitätsmaßnahmen mit einer Abrufdauer von mindestens 15 Minuten ausgewiesen. Während der Lastverzicht einer positiven Laständerung entspricht, liegt im Fall einer verbraucherseitigen Lasterhöhung eine negative Laständerung vor (Ausfelder et al., 2018). Wird eine positive oder negative Laständerung anschließend wieder um den Betrag der flexibilisierten Energie ausgeglichen, handelt es sich um eine Lastverschiebung. Hierbei können sowohl die flexibilisierte Leistung als auch die Abrufdauer eine unterschiedliche Ausprägung aufweisen, da ein Ausgleich z. B. nur über einen längeren Zeitraum bei verminderter Leistung möglich sein kann.

Abbildung 5 zeigt die erhobene flexibilisierbare Leistung der deutschen Industrie. Im Fall der Lasterhöhung beträgt die flexibilisierbare Leistung für Energieflexibilitätsmaßnahmen mit einer Abrufdauer von mindestens 15 Minuten insgesamt 9,0 GW. Hiervon entfallen 1,4 GW auf die erfassten industriellen Schlüsselproduktionsprozesse und 7,6 GW auf die Querschnittstechnologien. Bei gleicher Abrufdauer beträgt das Energieflexibilitätspotenzial des Lastverzichts 10,7 GW. Die flexibilisierbare Leistung teilt sich dabei mit 2,7 GW auf die industriellen Schlüsselproduktionsprozesse und mit 8,0 GW auf die Querschnittstechnologien auf.

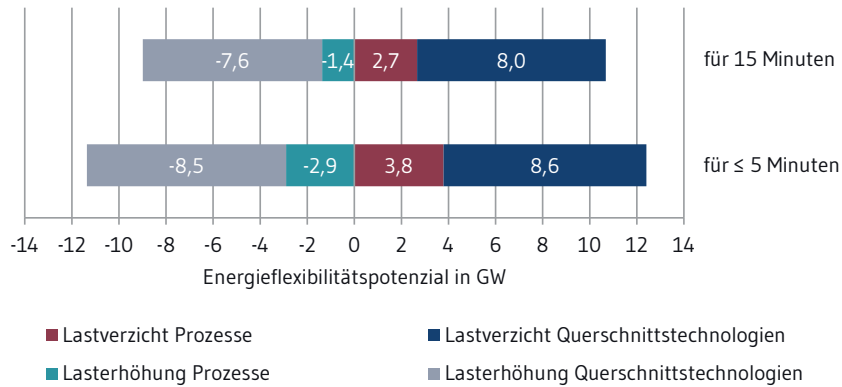


Abb. 5 Flexibilisierbare Leistung der deutschen Industrie

Die flexibilisierbare Energie der deutschen Industrie ist in *Abbildung 6* dargestellt. Diese resultiert anhand der ausgewiesenen flexibilisierbaren Leistung unter Berücksichtigung der technologiespezifischen Abrufdauern und Abrufhäufigkeiten über einen Zeitraum von einem Jahr. Letztere sind sowohl technologie- als auch maßnahmenpezifisch und z. B. von einzuhaltenden Produktionsparametern, der Prozessreihenfolge, Schichtzeiten etc. abhängig. Je nach Energieflexibilitätsmaßnahme und Technologie liegt die mögliche Abrufhäufigkeit zwischen mehrmals pro Tag oder weniger als einmal pro Woche. Für Energieflexibilitätsmaßnahmen mit einer Abrufdauer von mindestens 15 Minuten beträgt das Energieflexibilitätspotenzial im Fall des Lastverzichts insgesamt 48 TWh pro Jahr, wovon 44 TWh/a auf die Querschnittstechnologien und 4 TWh/a auf die Schlüsselproduktionsprozesse entfallen. Das quantifizierte Energieflexibilitätspotenzial bei gleicher Abrufdauer liegt für eine Lasterhöhung bei knapp 46 TWh pro Jahr. Hiervon könnten anteilig 43 TWh/a durch Querschnittstechnologien und 3 TWh/a durch die Schlüsselproduktionsprozesse flexibilisiert werden.

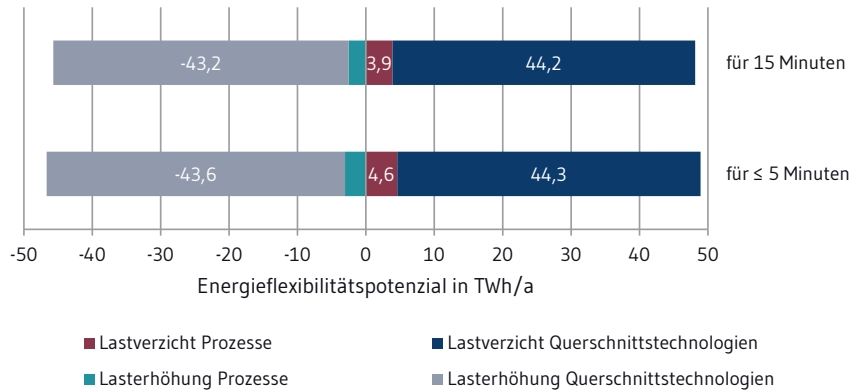


Abb. 6 Flexibilisierbare Energie der deutschen Industrie

3.1.3 Einfluss der Abrufdauer auf die Energieflexibilität

Grundsätzlich sind die Energieflexibilitätspotenziale längerer Abrufdauern als Teilmenge des maximalen Potenzials zur geringsten Abrufdauer zu verstehen. Den Technologien und Energieflexibilitätsmaßnahmen der Schlüsselproduktionsprozesse und Querschnittstechnologien liegen jeweils empirisch erhobene Abrufdauern zugrunde. Im Folgenden werden die aggregierten Energieflexibilitätspotenziale für unterschiedliche Abrufdauern analysiert.

Abbildung 7 veranschaulicht das Energieflexibilitätspotenzial für die flexibilisierbare Leistung sowie Energie. Hierbei weist die Lasterhöhung in Abhängigkeit von der Abrufdauer in beiden Fällen einen ähnlichen Verlauf auf. Mit zunehmender Abrufdauer bis zu 24 Stunden sinkt das Last- und Energieflexibilitätspotenzial deutlich. Nachdem im Rahmen der Betrachtung eine verbraucherseitige Flexibilitätsbereitstellung angestrebt wird, bei der beispielsweise kein Produktionsausfall oder eine Minderung der Produktqualität einhergeht, liegt gerade bei Produktionsprozessen oftmals eine gewisse zeitliche Restriktion vor, sodass vergleichsweise größere Lastanteile nur im Minutenbereich und zu bestimmten Zeitpunkten flexibilisiert werden können.

Wie in *Abbildung 7* dargestellt, weist der Lastverzicht tendenziell einen größeren Hebel auf als die Lasterhöhung, da die betrachteten Prozesse meist bereits eine hohe Auslastung verzeichnen. Folglich kann eher ein Lastverzicht durchgeführt werden oder – im Fall einer Lastverschiebung – können die Produktion und die Energiemenge über einen ggf. längeren Zeitraum wieder aufgeholt werden.

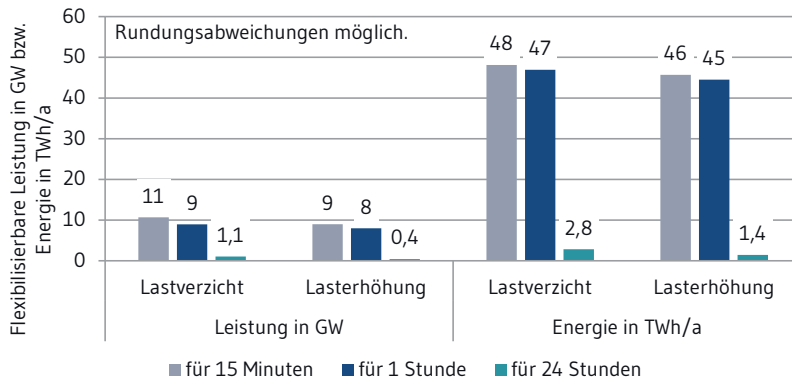


Abb. 7 Energieflexibilitätspotenzial in Abhängigkeit von der Abrufdauer

Abbildung 8 zeigt das Energieflexibilitätspotenzial der flexibilisierbaren Leistung in Abhängigkeit von den Einsatzbereichen am Beispiel des Lastverzichts. Absolut betrachtet wird ersichtlich, dass insbesondere bis zu einer Abrufdauer von vier Stunden mit 8,7 GW ein erhebliches Energieflexibilitätspotenzial für einen Lastverzicht vorliegt, welches zu einem größeren Anteil durch Energieflexibilitätsmaßnahmen aus Querschnittstechnologien bereitgestellt werden könnte. Für längere Abrufdauern bis zu 24 Stunden reduziert sich das Energieflexibilitätspotenzial für einen Lastverzicht auf ca. 1,4 GW bis 1,1 GW, da die typische Prozesslänge und folglich die Abrufdauer für eine bivalente Prozessdampfbereitstellung mit Elektrodenkessel ca. vier Stunden beträgt. Im Vergleich mit dem Energieflexibilitätspotenzial der Querschnittstechnologien können die Schlüsselproduktionsprozesse für Abrufdauern bis zu 15 Minuten mit 2,7 GW einen bedeutenden Beitrag zur Energieflexibilitätsbereitstellung leisten. Auf der anderen Seite sind für Abrufdauern von sechs bis 24 Stunden insbesondere Prozesse mit großen Materialspeicherkapazitäten relevant, wie beispielsweise die Chlor-Alkali-Elektrolyse oder die flexible Luftzerlegung.

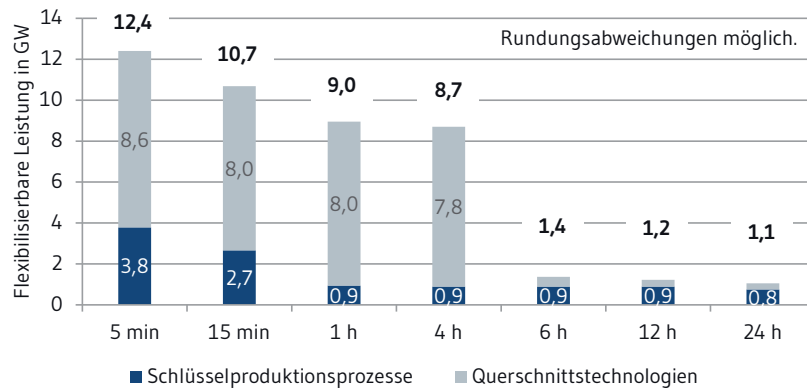


Abb. 8 Energieflexibilitätspotential der flexibilisierbaren Leistung in Abhängigkeit von der Abrufdauer und des Einsatzbereiches (Lastverzicht)

3.2 Regionalisierung der Energieflexibilitätspotenziale

In *Kapitel 2.1* wurden die Energieflexibilitätspotenziale, die durch das kontinuierliche Abfragen von Informationen beteiligter Industriepartner identifiziert und durch Hochrechnungen in Summe für Deutschland quantifiziert werden konnten, vorgestellt.

Um die Möglichkeiten für den markt-, netz- und systemdienlichen Einsatz der erhobenen Energieflexibilitätspotenziale abschätzen zu können, ist deren räumliche Verteilung entscheidend. Zur Bestimmung der räumlichen Verfügbarkeit der erhobenen Flexibilitätspotenziale wird daher auf Ebene der Landkreise eine Regionalisierung durchgeführt.

Die Regionalisierung der erhobenen Energieflexibilitätspotenziale erfolgt über den industriellen Stromverbrauch nach Wirtschaftszweigen auf Landkreisebene, der in einer vorgelagerten Untersuchung anhand der Statistik zu den sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Wirtschaftszweigen und Regionalstatistiken zum industriellen Stromverbrauch ermittelt wurde.

Die Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ) zur Beschreibung der Flexibilitätspotenziale ist allerdings detaillierter als die Aufschlüsselung, die für die Zuordnung des industriellen Stromverbrauchs verwendet wird. Daher wird eine WZ-Zuordnung zwischen diesen beiden Datensätzen auf übergeordneter Ebene durchgeführt. So wird beispielsweise das Energieflexibilitätspotential in dem WZ 11.05 »Herstellung von Bier« anhand des Stromverbrauchs des WZ 11 »Getränkeherstellung« regionalisiert.

Die Visualisierung der räumlichen Verteilung der Energieflexibilitätspotenziale in Deutschland ist als Heatmap umgesetzt. In *Abbildung 9* ist die Summe der erhobenen Energieflexibilitätspotenziale für die betrachteten Industrieprozesse und Querschnittstechnologien bei einer Abrufdauer von mindestens 15 Minuten dargestellt, differenziert nach der ab- und zuschaltbaren Last. Die Energieflexibilitätspotenziale weisen eine ähnliche regionale Verteilung auf und befindet sich vor allem im Westen und Südwesten Deutschlands, insbesondere in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Im Bereich der Querschnittstechnologien ist die bivalente Prozessdampfbereitstellung durch Elektrodenkessel in den deutschen Industriezentren dominierend.

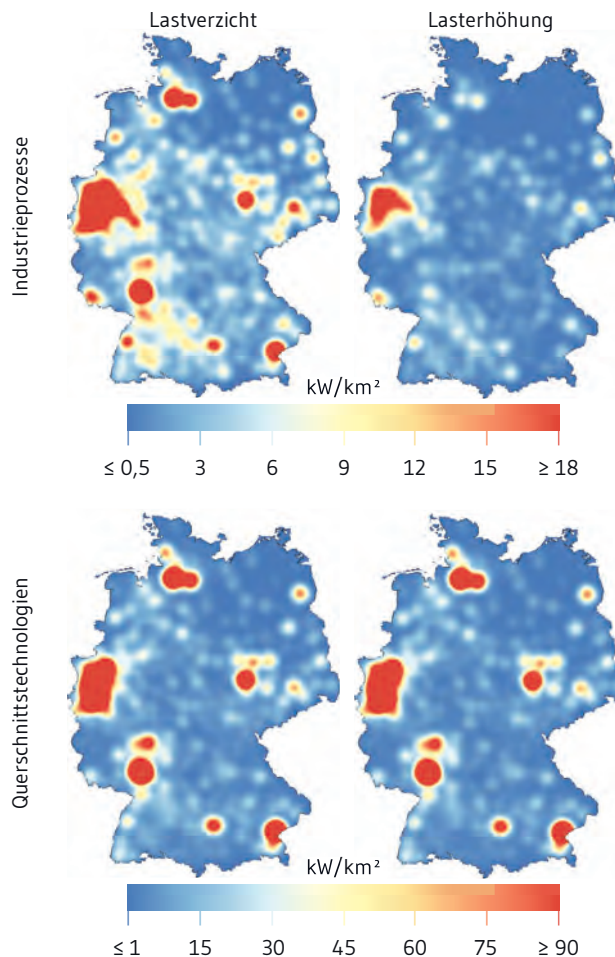


Abb. 9 Regionale Verteilung der potenziellen ab- und zuschaltbaren Last bei einer Abrufdauer ≥ 15 Minuten

3.3 Internationales Energieflexibilitätspotenzial

Die Energieflexibilitätspotenziale in der deutschen Industrie werden auf einen internationalen Betrachtungsraum ausgeweitet, um relevante Energieflexibilitätsmärkte zu identifizieren, die bei der Dekarbonisierung einzelner Länder und damit global eine wichtige Rolle spielen können. Dabei wird grundsätzlich zwischen kurzfristiger, existierender Energieflexibilität und langfristigen Energieflexibilitätsperspektiven unterschieden. Der Fokus liegt dabei zum einen auf Prozessen, die im Rahmen der Dekarbonisierung (Reduzierung von Kohlendioxidemissionen im Energiesystem) eine signifikante Transformation durchlaufen müssen, z. B. die Stahlherstellung oder die Grundstoffchemie. Zum anderen werden Länder und Energiesysteme betrachtet, in denen heute oder in Zukunft Bedarf an Energieflexibilität erwartet werden kann. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Betrachtung wirtschaftlicher und marktlicher Rahmenbedingungen einzelner Länder, die die Grundlage zur erfolgreichen Erschließung internationaler Energieflexibilitätspotenziale darstellen; sie stehen jedoch nicht im Fokus der weiteren Betrachtungen. Durch eine Länderauswahl werden die relevanten Energieflexibilitätsmärkte identifiziert, bevor eine Methodik zur Bestimmung des internationalen Energieflexibilitätspotenzials entwickelt wird und die einzelnen Potenziale erhoben werden.

3.3.1 Länderauswahl

Die Auswahlkriterien für den Betrachtungsraum der Länder lassen sich grob unter den Überbegriffen »Schwankungen im Stromnetz« und »Wissenstransfer« subsumieren. Ersterer umfasst alle deutschen Nachbarländer, die man durch die direkte Verbindung des Stromnetzes auch als »elektrische Nachbarn« bezeichnen kann. Der zweite Punkt umfasst Länder, die für Deutschland in Bezug auf industrielle Energieflexibilitätspotenziale eher eine indirekte Rolle spielen werden. Dies sind Länder mit ähnlichen industriellen und technischen Rahmenbedingungen, mit Energiesystemen mit Erfahrung im Demand Side Management oder Länder, die in Zukunft für Energieflexibilität eine bedeutende Rolle spielen könnten.

Die Auswahl der Länder nach beiden Kategorien ergibt folgende Liste: Australien, Norwegen, Belgien, Österreich, Dänemark, Polen, Deutschland, Schweden, Frankreich, Schweiz, Großbritannien, Slowakei, Irland, Slowenien, Italien, Tschechische Republik, Japan, Ungarn, Niederlande und Vereinigte Staaten von Amerika.

3.3.2 Methodik zur Bestimmung des internationalen Energieflexibilitätspotenzials

Zur Ausweisung des internationalen Energieflexibilitätspotenzials wurden zwei Kenngrößen entwickelt: der Flexibilitäts-Indikator (FI), der eine vereinfachende Einschätzung darüber ermöglicht, ob der untersuchte Industrieprozess des Landes eine ähnlich große Rolle für die kurzfristige Energieflexibilität spielt wie in Deutschland, sowie das konkrete Energieflexibilitätspotenzial. Untersucht werden in diesem Zusammenhang die Prozesse der Grundstoffindustrie: Chlor-, Aluminium-, Zement-, Hohlglas-, Elektro Stahl- und Holzstoffherstellung.

Flexibilitäts-Indikator: Zur Bestimmung des Flexibilitäts-Indikators wird für jedes Land der Anteil des Stromverbrauchs eines Prozesses am Gesamtstromverbrauch berechnet. Dieser Anteil wird anschließend ins Verhältnis gesetzt zum Anteil des Stromverbrauchs dieses Prozesses in Deutschland am Gesamtstromverbrauch in Deutschland (siehe *Abbildung 10* exemplarisch für die Chlorherstellung). Damit zeigt der Flexibilitäts-Indikator an, welchen Anteil der Prozess bei der Energieflexibilitätsbereitstellung im Vergleich zu Deutschland innehat.

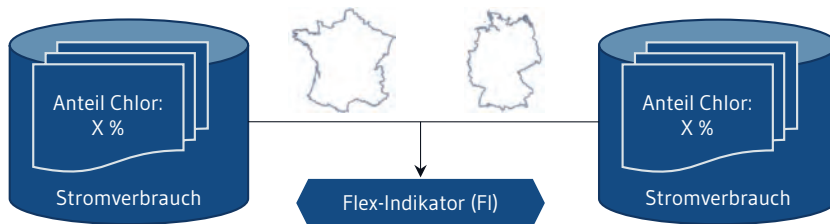


Abb. 10 Berechnung des Flexibilitäts-Indikators in der Chlorherstellung

Internationales Energieflexibilitätspotenzial: Um im nächsten Schritt ein konkretes Energieflexibilitätspotenzial je Prozess ausweisen zu können, werden die deutschen Energieflexibilitätspotenziale (EFP) über die Produktionsmengen je Prozess in Tonnen auf ein Potenzial je Tonne (EFPt) heruntergebrochen. Anschließend wird dieses spezifische Potenzial über die Produktionsmengen der jeweiligen Prozesse in den anderen Ländern multipliziert, um das dortige Energieflexibilitätspotenzial je Prozess zu berechnen (*Abbildung 11*). Die Energieflexibilitätspotenziale werden dabei jeweils für Lasterhöhung sowie Lastverzicht für die Chlor-, Aluminium-, Zement-, Glas-, Elektrostahl- und Holzstoffherstellung berechnet.

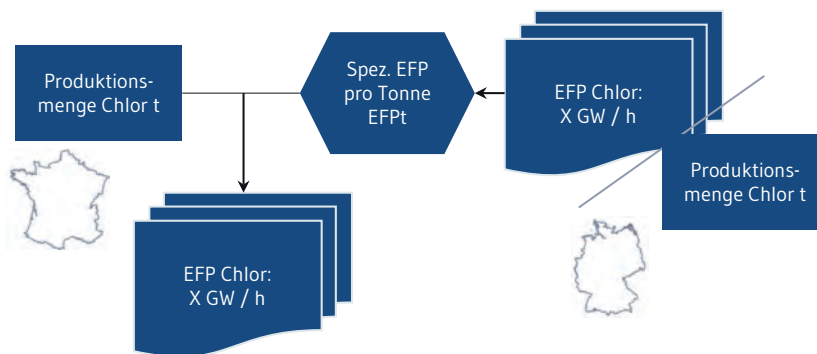


Abb. 11 Berechnung des internationalen Flexibilitätspotenzials

3.3.3 Ergebnisse

Um die umfassend recherchierten sowie die berechneten Daten zur Flexibilitätssituation eines Landes visuell bereitzustellen, werden diese in Ländersteckbriefen zusammengefasst. Diese stellen unter anderem den aktuellen elektrischen Endenergieverbrauch je Wirtschaftszweig dem theoretischen, langfristig elektrifizierbaren Potenzial gegenüber. Über eine Karte des jeweiligen Landes lassen sich die wichtigsten Industriestandorte aus den verschiedenen Wirtschaftszweigen auch geografisch verorten.

Die Datenbasis stammt aus Fiedler und Pelling (2018). Dort wurden für den Industriesektor anwendungsbezogene Energiebilanzen erstellt, die neben unterschiedlichen Energieträgern und acht Wirtschaftszweigen noch weitere Detaillierungsgrade aufweisen.

Überdies enthalten die Steckbriefe Kennzahlen zur Stromerzeugung vor Ort, dem Elektrifizierungsgrad der Industrie und eine Übersicht zu den energieintensivsten Prozessen je Wirtschaftszweig inkl. deren Flex-Indikatoren, letztere ermittelt nach der zuvor beschriebenen Methodik. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die berechneten Energieflexibilitätspotenziale nicht Bestandteil der Steckbriefe, sondern werden separat ausgewiesen.

Während ein Großteil der Abbildungen in den Steckbriefen für sich selbst spricht, lohnt sich ein detaillierterer Blick auf die Flex-Indikatoren (*Abbildung 12*) für ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Methodik. Das Beispiel Belgien zeigt, dass dort speziell die Chlor- (1,4-fach) und Holzstoffherstellung (1,8-fach) einen höheren Anteil am Gesamtstromverbrauch ausmachen als dies in Deutschland der Fall ist. Die Herstellung von Elektrostahl, Hohlglas und Zement nehmen in Bezug auf ihren Stromverbrauch einen vergleichbaren Stellenwert wie in Deutschland ein. Belgien verfügt über keinerlei Produktionskapazitäten für Aluminium, weshalb hier auch der zugehörige Flex-Indikator zu Null wird.

Prozess	Chlor	Aluminium	Zement	Behälterglas	Elektrostahl	Holzstoff
Flex-Indikator						

Anteil des elektrischen Prozessenergieverbrauchs im Vergleich zu Deutschland

≤ 75 %
 Ähnlich oder gleich
 ≥ 125 %

Abb. 12 Flexibilitätsindikatoren von Belgien

Gemessen am Gesamtstromverbrauch könnten folgende Länder am stärksten von der Prozessflexibilisierung im jeweiligen Wirtschaftszweig profitieren:

- **Chlor:** 1. Belgien, 2. Ungarn, 3. Deutschland
- **Hohlglas:** 1. Tschechien, 2. Polen, 3. Slowakei
- **Holzstoff:** 1. Schweden, 2. Norwegen, 3. Australien
- **Primäraluminium:** 1. Norwegen, 2. Australien, 3. Slowakei
- **Sekundärstahl:** 1. Italien, 2. Slowenien, 3. Polen
- **Zement:** 1. Slowakei, 2. Polen, 3. Österreich

4 Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und CO₂-Emissionen

Autoren: Seifermann · Zachmann · Gabrek · Hübner · Metzger · von Roon · Pastowski

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Energieflexibilität und CO₂-Emissionen wird in *Kapitel 4.1* das CO₂-Vermeidungspotenzial aus dem Einsatz industrieller Energieflexibilität abgeschätzt. Anschließend folgt in *Kapitel 4.2* eine Analyse der Auswirkungen von industriellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Energieflexibilität von Prozessen und Technologien, bevor in *Kapitel 4.3* auf deren Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft eingegangen wird. Anzumerken ist, dass im Folgenden unter CO₂ auch CO₂-Äquivalente zu verstehen sind.

4.1 Abschätzung der CO₂-Reduzierung beim Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Da im Zuge der Energiewende der Emissionsausstoß (gemessen in CO₂-Äquivalent; nachfolgend vereinfacht als CO₂ bezeichnet) von großer Bedeutung ist, wird an dieser Stelle untersucht, welchen Beitrag industrielle Energieflexibilität zur Erreichung der Klimaziele leisten kann. Die Untersuchung erfolgt mithilfe einer Abschätzung des CO₂-Vermeidungspotenzials industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen, ausgehend von den in *Kapitel 3.1* identifizierten technischen Potenzialgrößen.

4.1.1 Methodische Vorgehensweise

Durch die Anwendung von Energieflexibilitätsmaßnahmen können Emissionen indirekt durch eine intensivere Nutzung vorhandener emissionsarmer Erzeugungstechnologien reduziert werden. Arbeit wird dabei aus Zeiträumen mit hohen spezifischen Emissionen (geringer Anteil erneuerbarer Energien) in Zeiträume niedriger spezifischer Emissionen (hoher Anteil erneuerbarer Energien) verschoben. Es wird konservativ angenommen, dass die verschobene Arbeit zu einem späteren Zeitraum zu mittleren spezifischen Emissionen ausgeglichen wird. Wie in *Kapitel C.4* aufgezeigt wird, können Energieflexibilitätsmaßnahmen – unter Berücksichtigung der Randbedingungen betroffener Prozesse – ebenso

einen Ausgleich der verschobenen Arbeit auf einen Zeitraum mit niedrigeren spezifischen Emissionen erlauben (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2021), weshalb die beschriebene Annahme zu einer konservativen Abschätzung des CO₂-Vermeidungspotenzials führt.

Das CO₂-Vermeidungspotenzial einer Energieflexibilitätsmaßnahme mit der Abrufdauer n lässt sich dementsprechend für jeden möglichen Zeitpunkt i wie in Gleichung 1 dargestellt berechnen.

$$CO_2 \text{ Vermeidung} = \sum_i^{i+n} \text{Laständerung}_i \cdot (-\text{spez. Emissionen}_i + \text{mittlere spez. Emissionen}) \quad (1)$$

Auf Basis vorliegender Energieflexibilitätspotenziale sowie unterjähriger spezifischer Emissionen der Stromerzeugung lässt sich mit dieser Gleichung folglich eine Zeitreihe der möglichen CO₂-Vermeidung einer Energieflexibilitätsmaßnahme ermitteln. Die Berechnungen erfolgen hierbei in einer Auflösung von 15 Minuten. Das jährliche CO₂-Vermeidungspotenzial wird schließlich mithilfe der jeweils identifizierten Abrufhäufigkeit k ermittelt. Zur Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen werden hierfür Blöcke mit der Länge eines Abrufzyklus eingeführt, die aus der Abrufdauer und einer prozesstechnisch bedingten Nachholzeit bestehen. In jedem Block wird der höchstmögliche CO₂-Vermeidungswert angesetzt. Das jährliche CO₂-Vermeidungspotenzial einer Energieflexibilitätsmaßnahme lässt sich aus der Summe der k größten Blöcke errechnen.

Eine Übersicht der methodischen Vorgehensweise ist in Abbildung 13 dargestellt:

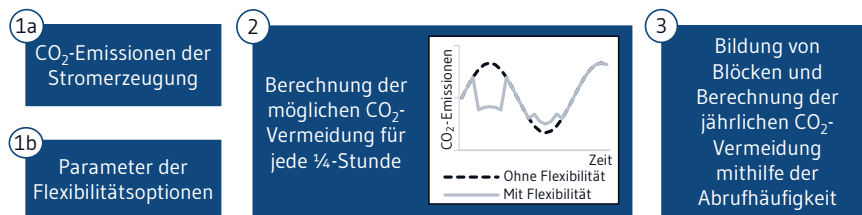


Abb. 13 Methodische Vorgehensweise zur Abschätzung des jährlichen CO₂-Vermeidungspotenzials

4.1.2 Datenbasis zur Berechnung des CO₂-Vermeidungspotenzials

Als Ausgangsbasis dienen die in Kapitel 2.1 dargestellten Potenziale industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen. Die Berechnung des jährlichen CO₂-Vermeidungspotenzials wird für verschiedene Anwendungsfälle durchgeführt und im Anschluss aggregiert. Es wird hierbei jeweils der Maximalwert der Anwendungsfälle »Maximale Laständerung« und »Maximale Abrufdauer« sowie »Lasterhöhung« und »Lastverzicht« herangezogen. Bei identischen Abrufzyklen wird darüber hinaus eine Kombination aus Lastverzicht und Lasterhöhung betrachtet, wobei je Block der höchstmögliche CO₂-Vermeidungs-

wert beider Anwendungsfälle angesetzt wird. Die Aggregation aus »Potenzial« und »Perspektive« erfolgt analog zu der in Sauer et al. (2019) beschriebenen Methode. Die Ergebnisse der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen werden anonymisiert und in Anlehnung an die Wirtschaftszweigklassifikation (Destatis, 2008) zu sieben Industriezweigen zusammengefasst. Die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung werden in Anlehnung an Fiorini und Aiello (2018) aus viertelstündlichen Stromerzeugungsdaten mithilfe der Emissionsfaktoren der einzelnen Erzeugungstechnologien ermittelt. Dabei werden die in *Abbildung 14* dargestellten Strommix-Szenarien betrachtet.

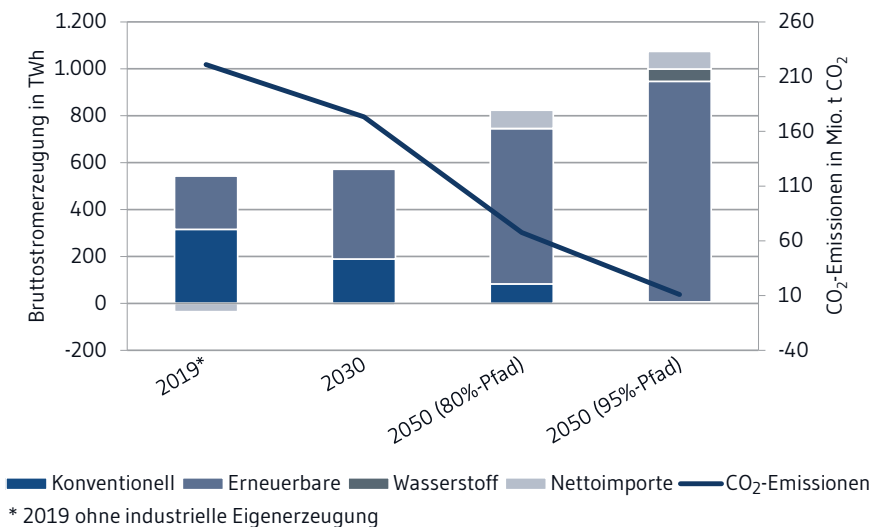


Abb. 14 Bruttostromerzeugung der betrachteten Strommix-Szenarien

Für den Strommix des Jahres 2019 wird die historische Nettostromerzeugung herangezogen (ENTSO-E, o.J.). Industrielle Eigenerzeugung sowie der Außenhandelsaldo werden hierbei nicht berücksichtigt. Der Kraftwerkseigenverbrauch hingegen wird nachträglich über Eigenverbrauchsfaktoren integriert. Das Strommix-Szenario des Jahres 2030 spiegelt, ausgehend von Poganietz et al. (2019), einen unter heutigen Voraussetzungen wahrscheinlichen Entwicklungspfad wider. Mit den Strommix-Szenarien 80%-Pfad sowie 95%-Pfad des Jahres 2050 werden hingegen auf Basis von Robinius et al. (2020) kosteneffiziente CO₂-Reduktionspfade bis zum Jahr 2050 beschrieben. Die Abbildung der unterjährigen Stromerzeugung dieser (auf jährlicher Ebene vorliegenden) zukünftigen Strommix-Szenarien erfolgt über ein Stromerzeugungsmodell.

4.1.3 CO₂-Vermeidungspotenzial industrieller Nachfrageflexibilität

Auf Basis der beschriebenen Datengrundlage wird für die untersuchten Strommixszenarien das in *Abbildung 15* dargestellte CO₂-Vermeidungspotenzial industrieller Energieflexibilität ermittelt.

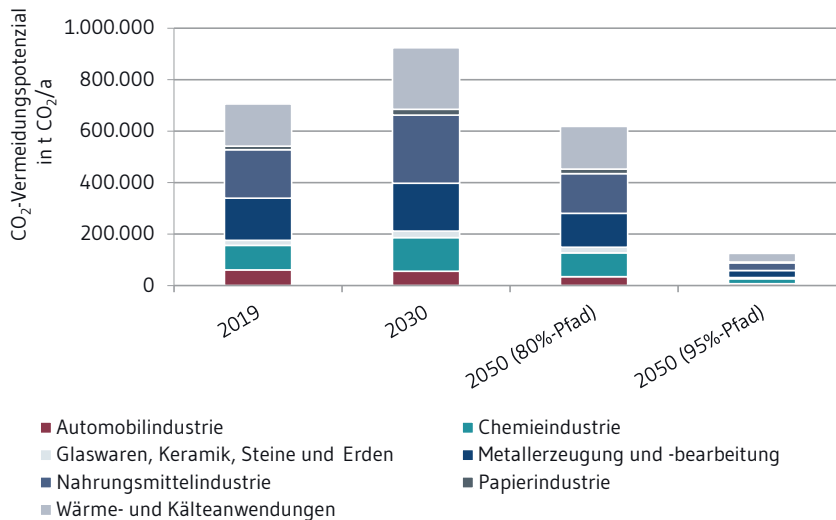


Abb. 15 Jährliches CO₂-Vermeidungspotenzial industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen in den betrachteten Strommix-Szenarien

Aus den untersuchten industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen ergibt sich ein für das Bezugsjahr 2019 ein CO₂-Vermeidungspotenzial von mindestens 700.000 Tonnen CO₂ für den Strommix. Perspektivisch steigt das CO₂-Vermeidungspotenzial bis zum Jahr 2030 um rund 30 Prozent auf mindestens 925.000 Tonnen CO₂ an. Bis zum Jahr 2050 ist das CO₂-Vermeidungspotenzial hingegen rückläufig. Für den betrachteten 80 %-Pfad ergeben sich mindestens 620.000 Tonnen CO₂, während der 95 %-Pfad ein Vermeidungspotenzial von mindestens 125.000 Tonnen CO₂ ausweist.

Vor dem Hintergrund, dass bei einer Reduktion der CO₂-Emissionen generell ein Rückgang des CO₂-Vermeidungspotenzials in vergleichbarer Größenordnung zu erwarten ist, ist die industrielle Energieflexibilität auf dem Weg zur Klimaneutralität ein besonders effektives und langfristig nutzbares Instrument der CO₂-Reduzierung. Als wesentliche Ursache hierfür wurde die zunehmende Bedeutung von Emissionsspitzen bei einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien identifiziert, aus deren Vermeidung durch Lastverzicht eine zusätzliche CO₂-Reduzierung erzielt werden kann.

4.2 Auswirkungen von industriellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien

Mit der Verschärfung des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2021 geht eine zunehmende Dekarbonisierung des Industriesektors einher. Basierend auf einem ambitionierten Klimaschutzszenario »Climate Protection (CP)« des Sektormodells Industrie (SmInd) und einer Erweiterung um ein Flexibilitätsmodul können für Deutschland veränderte Flexibilitätspotenziale von Prozessen und Technologien abgeleitet werden.

4.2.1 Methoden

Abbildung 16 visualisiert die Vorgehensweise zur Untersuchung der Auswirkungen von CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität, welche im Wesentlichen vier Kernelemente umfasst.

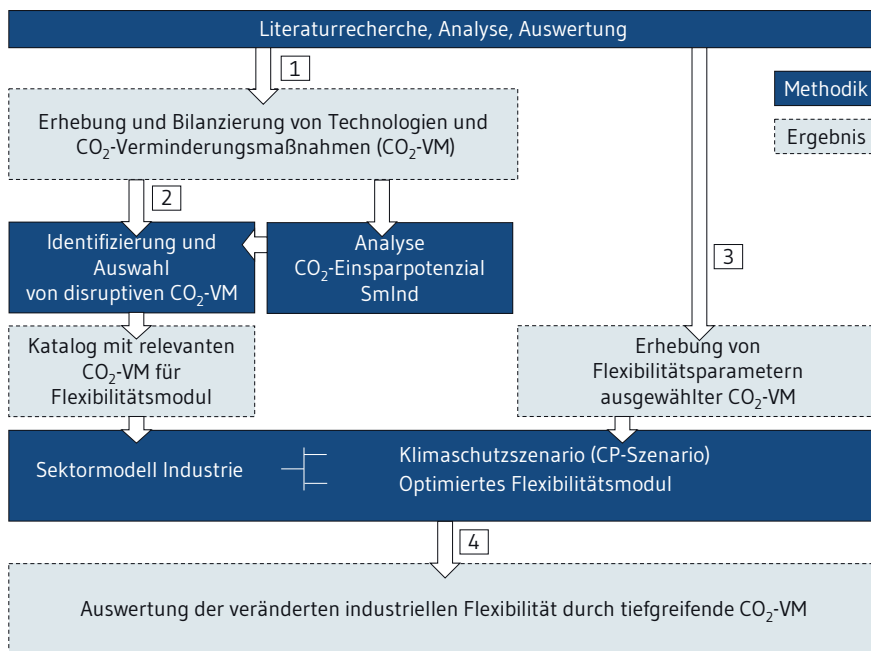


Abb. 16 Methodenübersicht zur Untersuchung der Auswirkung von CO₂-Verminderungsmaßnahmen (CO₂-VM) auf die Flexibilität

- **Schritt 1** beinhaltet die Erhebung und Bilanzierung von Prozessen, Technologien und CO₂-Verminderungsmaßnahmen. Via Literaturrecherche und Metaanalyse erhobene sowie durch sieben Experteninterviews validierte Eingangsdaten bilden die Grundlage der Modellsimulationen.
- **Schritt 2** umfasst die Methodenentwicklung und -anwendung zur Identifizierung und Auswahl disruptiver CO₂-Verminderungsmaßnahmen. Die Methode umfasst sieben Schritte und identifiziert Maßnahmen, die sowohl eine hohe CO₂-Verminderung bewirken als auch Auswirkungen auf die Flexibilität aufweisen. **Schritt 3** enthält die Erhebung von Flexibilitätsparametern ausgewählter emissionsarmer Industrieprozesse und -technologien.
- Abschließend umfasst **Schritt 4** die Entwicklung und Anwendung des Flexibilitätsmoduls in Smlnd sowie die Szenarienanalyse und Auswertung der Ergebnisse, die nachfolgend genauer beschrieben werden.

Zur Ableitung von Energieflexibilitätspotenzialen nutzt das Flexibilitätsmodul Stromlastgänge, die auf Basis realer Datensätze synthetisiert werden (Hübner et al., 2022). Das Optimierungsproblem und die gemischt-ganzzahlige Optimierung bilden das Kernelement des Flexibilitätsmoduls (Abbildung 17). Das Flexibilitätsmodul optimiert den Lastgang in Abhängigkeit des Strompreises, welcher wie angenommen die zeitaufgelöste Kritikalität der Stromverfügbarkeit reflektiert.

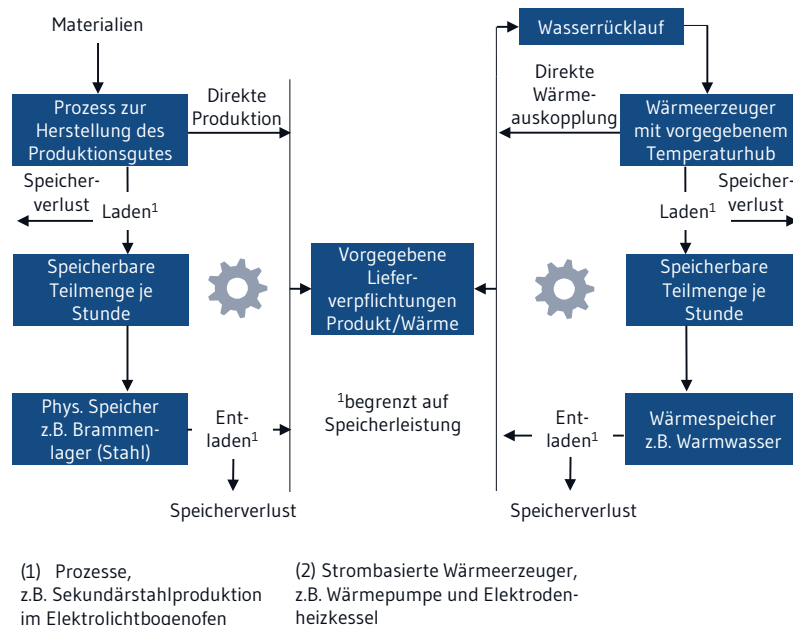


Abb. 17 Konzeptionelle Darstellung der Funktionalität des Flexibilitätsmoduls

Abbildung 17 verdeutlicht, dass Prozesse und Wärmeerzeuger die Flexibilität durch physische Material- und Wärmespeicher generieren. Dabei entstehen sowohl bei der Beladung als auch bei der Entladung Verluste. Speichergradienten begrenzen das Be- und Entladen. Da die Lastgänge in stündlicher Auflösung vorliegen, werden Flexibilitätsabrufe ebenfalls in stündlicher Auflösung durchgeführt. Viele Prozesse können aufgrund ihrer technischen Voraussetzungen oder Betriebsweise keine volle Stunde Energieflexibilität abrufen. Deshalb wird ein Zwischenparameter eingeführt, der die speicherbare Teilmenge je Stunde abbildet. Prozesse und Wärmeerzeuger entscheiden in Abhängigkeit von den Kosten und dem aktuellen Speicherfüllstand, inwieweit der originäre Lastgang aus der direkten Produktion oder dem Speicher gedeckt wird. Das Modul berechnet den Differenzlastgang vor und nach der Optimierung. Bei Leistungsverminderung entsteht ein negativer, bei Leistungserhöhung ein positiver Wert. Das über die Stunde gemittelte positive und negative Flexibilitätspotenzial ergibt sich durch Division der Entladeleistung durch die maximale stündliche Abrufdauer. Die negative bzw. positive Energieflexibilität ist das Produkt aus der stündlichen Abrufhäufigkeit und der Be- bzw. Entladeleistung des Speichers.

4.2.2 Klimaschutzszenario und Flexibilitätssignal

Abbildung 18 visualisiert den industriellen Energieverbrauch nach Energieträgern und die industriellen Emissionen im Klimaschutz-Szenario (CP-Szenario). Das Szenario ist durch eine Kombination aus starker Elektrifizierung, dem Einsatz von Biomasse und der Substitution fossiler durch synthetische Brennstoffe gekennzeichnet. Durch die Implementierung von individuellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen und -technologien vermindert das Modell die Emissionen bis 2050 um 88 Prozent gegenüber 1990 (Scope 1) (Hübner und von Roon, 2020).

Der Strompreis des Szenarios, welcher dem Flexibilitätsmodul als Signal zur Flexibilitätsableitung dient, steigt von 2018 bis 2050 im Schnitt von 45 €/MWh auf 80 €/MWh an (Hübner und von Roon, 2020). Im Vergleich zum Referenzjahr 2018 konnte insbesondere in den Jahren 2021 bis 2022 eine erhebliche Zunahme des Strompreisniveaus sowie der Volatilität der Strompreise beobachtet werden. Daraus resultieren unmittelbare Auswirkungen auf die Ableitung von Energieflexibilitätspotenzialen anhand des Flexibilitätsmoduls. Mit Blick auf die nachfolgenden Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass das Flexibilitätsmodul auf der Grundlage der Preisentwicklungen der Jahre 2021 bis 2022 zur Ableitung umfangreicherer Energieflexibilitätspotenziale im Vergleich zum Jahr 2018 führt.

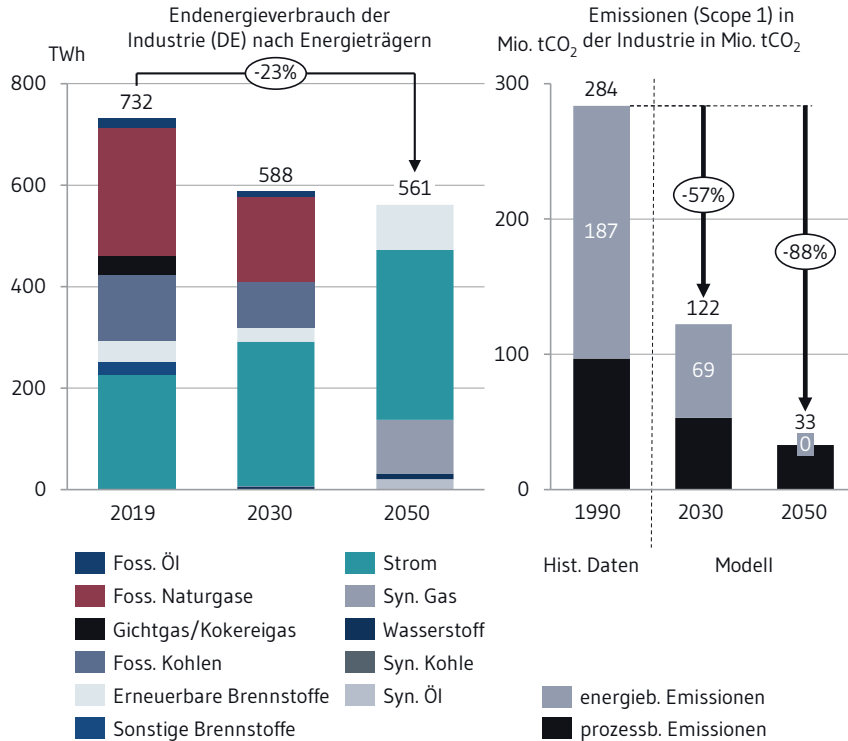


Abb. 18 Energieverbrauch sowie Emissionen im Szenario »Climate Protection« (CP)

4.2.3 CO₂-Verminderungsmaßnahmen und deren Entwicklung

Abbildung 19 zeigt die Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich der CO₂-Verminderung. Zudem weist die Abbildung die Änderung des Strom- und Brennstoffverbrauchs aus. Die Maßnahmen umfassen transformative Technologien der Stahl, Papier, Ethylen und Glasproduktion sowie der Wärmeerzeugung. In Summe senken die Maßnahmen die CO₂-Emissionen um knapp 40 Prozent gegenüber 2020 (178 Mio. Tonnen CO₂). Die Maßnahmen beinhalten teils mehrere Technologien, welche einer Flexibilitätsbetrachtung unterzogen werden.

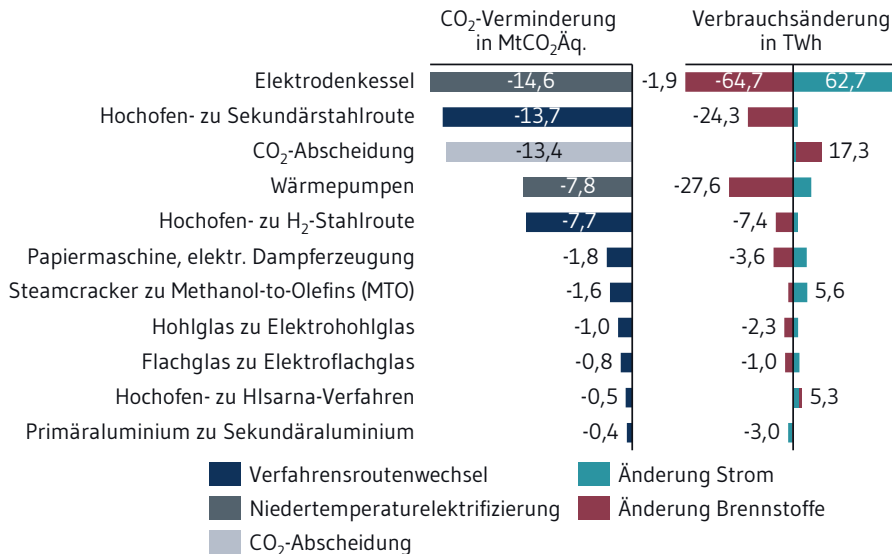


Abb. 19 CO₂-Verminderung und Energieverbrauchsänderung der relevanten Maßnahmen

Die Elektrolichtbogenöfen der Sekundärstahl- sowie der H₂-Stahlroute offerieren erhebliche Flexibilität. Der Elektrolichtbogen generiert Stromflexibilität durch Überkapazitäten gegenüber der nachfolgenden Stranggussanlage (Ausfelder et al., 2018). Etwa 20 Minuten pro achtstündige Schicht können für Flexibilitätsabrufe genutzt werden (Ausfelder et al., 2018).

Der Einsatz von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln offeriert elektrische Flexibilitätspotenziale in der industriellen Niedertemperatur. Ein Warmwasserspeicher sorgt für die zeitliche Entkoppelung von Wärmenachfrage und Stromangebot (Wolf, 2016).

Tiefgreifende technologische Veränderungen ergeben sich durch die Substitution der Olefinproduktion (hauptsächlich Ethylen) durch das Methanol-to-Olefins-Verfahren (MTO-Verfahren), welches im Gegensatz zum konventionellen Steamcracker elektrische Flexibilität offeriert. Der Schmelzprozess der Glasproduktion bietet Stromflexibilität bei den elektrischen Zusatzheizungen (EZH). Fehlende Energie- und Massenspeicher verhindern dahingegen eine Lastverschiebung bei der elektrischen Glasschmelze (Ausfelder et al., 2018).

Die kryogene Trennung zur CO₂-Abscheidung bei Abgasströmen mit hohen CO₂-Konzentrationen bietet nennenswerte Energieflexibilitätspotenziale. Zur Entkoppelung der CO₂-Abscheidung von der HIsarna-Stahlproduktion ist eine Speicherung des Abgases erforderlich. Ein Experteninterview ergab (Stoffregen, 2021), dass die Industrie typischerweise Kugelgasspeicher mit einem Speichervolumen von 100.000 m³ Erdgas bei 10 bar nutzt. Beim Einsatz von zwei Kugelgasspeichern ergibt sich bei

durchschnittlichem Abgasstrom der Hlsarna-Stahlproduktion eine Speicherdauer von etwa drei Tagen, die laut Experten plausibel erscheint. Die Speicherauslegung berücksichtigt Dichteunterschiede von Erdgas und Abgas.

Die Verschiebung im CP-Szenario hin zu Sekundäraluminium beeinflusst das Flexibilitätspotenzial der Aluminiumindustrie. Im Gegensatz zur Sekundäraluminiumproduktion nutzt die Primäraluminiumproduktion ausschließlich elektrische Energie (Kammer, 2009), weshalb eine Verschiebung das Flexibilitätspotenzial der Aluminiumindustrie senkt.

Abbildung 20 zeigt die Veränderung der Produktionsmengen (Balken) und installierten Leistungen (Linien) flexibilitätsrelevanter Prozesse und Technologien im CP-Szenario.

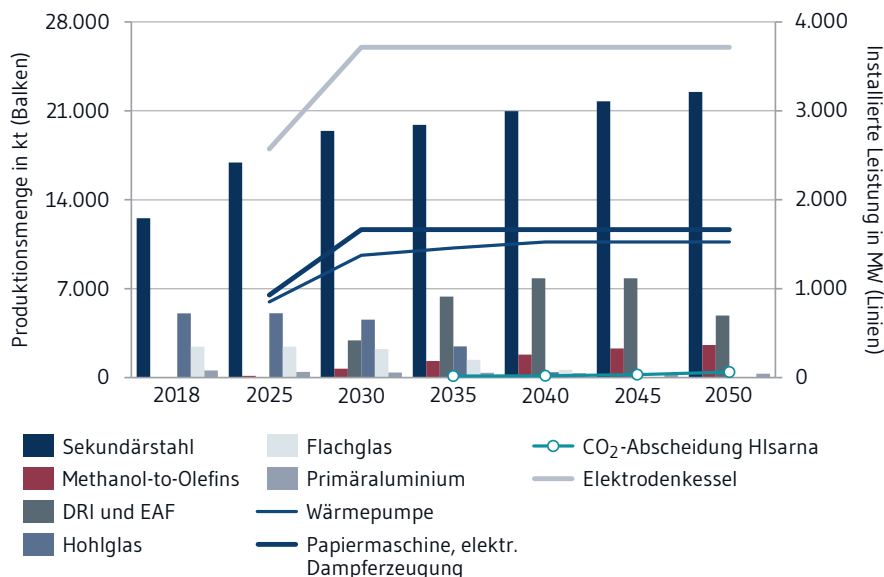


Abb. 20 Hochlauf flexibilitätsrelevanter Prozesse und Technologien

4.2.4 Simulationsergebnisse Energieflexibilitätspotenziale

Abbildung 21 zeigt links die Entwicklung des positiven und negativen Energieflexibilitätspotenzials. Um die Auswirkungen der CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Energieflexibilität hervorzuheben, werden die Energieflexibilitätspotenziale ab 2025 als Differenz gegenüber 2018 ausgewiesen. In Abbildung 21 ist rechts die veränderte Energieflexibilität ab 2025 dargestellt. Da das Modell die uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung annimmt und veränderte Energieverbräuche im

Verlauf eines Jahres demgemäß zu nivellieren sind, entsprechen sich die Jahressummen positiver und negativer Energieflexibilitäten in der Modellierung. *Abbildung 21* verzichtet dementsprechend auf eine individuelle Darstellung. In Summe über die in *Kapitel 3.2* betrachteten Prozesse und Technologien steigt das positive bzw. negative Energieflexibilitätspotenzial um 7,7 GW respektive 6,3 GW im Jahr 2050 gegenüber 2018.

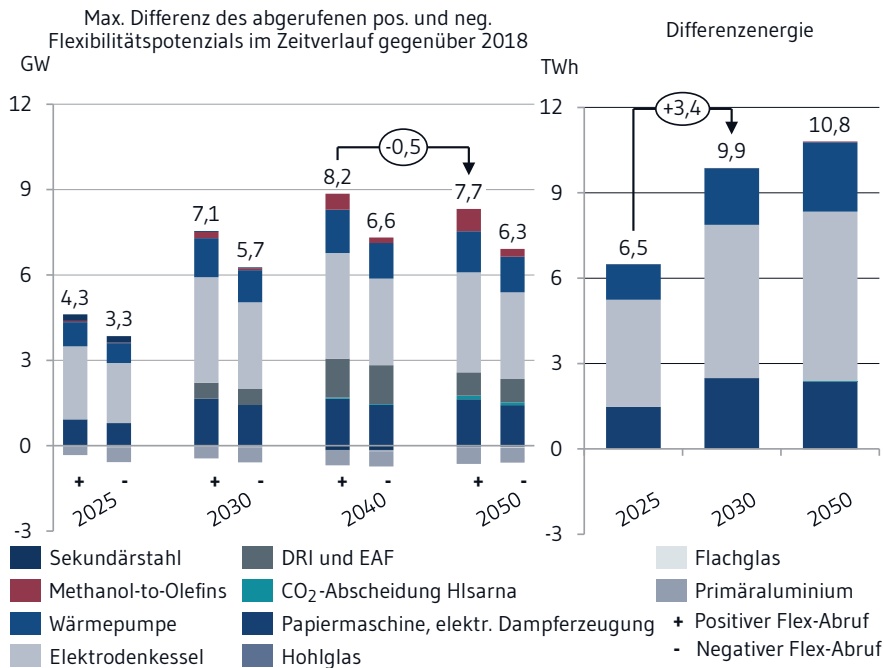


Abb. 21 Maximales Differenzpotenzial und Differenzenergie

Wegen der hohen Auslastung industrieller Prozesse ist das zusätzliche negative Energieflexibilitätspotenzial im Zeitverlauf stets geringer als das zusätzliche positive. Im Jahr 2040 erreicht das positive Energieflexibilitätspotenzial sein Maximum (8,2 GW). Aufgrund erhöhter Prozesseffizienz, der Substitution von Primär- durch Sekundäraluminium sowie des Wechsels von H₂- auf Hlsarna-Stahlroute sinkt es bis zum Jahr 2050 leicht um etwa sieben Prozent. Etwa 85 Prozent (90 Prozent) des Anstiegs positiver (negativer) Energieflexibilitätspotenziale im Jahr 2050 sind gegenüber 2018 auf den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln in der Niedertemperatur sowie der elektrischen Dampferzeugung in der Papierproduktion zurückzuführen. Elektrodenkessel weisen aufgrund der höheren installierten Leistung infolge geringerer Effizienz gegenüber Wärmepumpen einen deutlich höheren Anteil am Differenzpotenzial auf, obwohl die thermische Wärmeauskopplung beider Techno-

logien im CP-Szenario in etwa gleich ist. Das Beispiel verdeutlicht die in den Endenergiesektoren häufig auftretende Interdependenz zwischen effizientem Energieverbrauch und der Bereitstellung von Energieflexibilitätpotenzialen.

Die Analyse der Auswirkungen von industriellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien zeigt, dass bei intensiven Bemühungen zur Dekarbonisierung zusätzliche Flexibilitätpotenziale in der Industrie entstehen. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die industrielle Transformation sowie die damit einhergehende Elektrifizierung und Nutzung entstehender Energieflexibilität auch einen wesentlich stärkeren Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien leisten könnte als bisher. Dabei erfolgt die zunehmende Umstellung des Bereitstellungsektors auf erneuerbare Energien in Einklang mit der Transformation des Industriesektors. Gerade die prospektiv steigende elektrische Energieflexibilität könnte wetterbedingte Extremereignisse wie Dunkelflauten und Hellbrisen abfedern. Reine Wärmeversorger eignen sich aufgrund ihrer hohen Energieflexibilität und geringeren Komplexität für die Überbrückung längerfristiger Zeiträume, wohingegen wertschöpfende Prozesse primär zum Ausgleich kurzzeitiger extremer Lastspitzen nützen. Diese Flexibilität gilt es in Zukunft zu nutzen, um das damit verbundene Klimaschutzniveau zu erreichen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie in Deutschland zu erhalten.

4.3 Flexibilität und Kreislaufwirtschaft bei ausgewählten, disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken

4.3.1 Anforderungen an zukunftsfähige Produktionstechniken

So wichtig Potenziale für die Flexibilität des Stromverbrauchs bei konventionellen Produktionstechniken sind, werden diese jedoch nicht ausreichen, um die angestrebte weitgehende Dekarbonisierung in der Industrie umzusetzen. Vielmehr bedarf es neuartiger Produktionstechniken, die ohne relevante Emissionen von Treibhausgasen betrieben werden können. Vereinfachend werden diese nachfolgend als »disruptiv dekarbonisiert« bezeichnet. Mit dieser Transformation geht der Bedeutungsverlust der jeweils ersetzten Produktionstechniken sowie deren Flexibilitätpotenzialen einher. Zugleich ergeben sich in Abhängigkeit von den technischen Eigenschaften der disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken neue Potenziale bzw. Hemmnisse für Flexibilität.

Neben den Anforderungen der Dekarbonisierung und Flexibilität beim Energieeinsatz spielt in der Produktion zugleich eine Rolle, dass die verwendeten Einsatzstoffe effizient genutzt werden und im Sinne der Kreislaufwirtschaft als Nebenprodukte oder Abfallstoffe für andere Produktionen verwendet werden können. Im Fokus stehen somit Produktionstechniken zur disruptiven Dekarbonisierung bei überwiegend unveränderten Produkten. Zudem geht es um erkennbare Flexibilitätpotenziale sowie Wechselwirkungen mit Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft. Grundsätzlich konnte in diesem Rahmen nur ein selektiv sondierender Ansatz verfolgt werden, der bereits erkennbare Besonderheiten einzelner disruptiv dekarbonisierter Produktionstechniken in den Blick nimmt.

Für die Auswahl sind mögliche substanzielle Beiträge zur Dekarbonisierung Voraussetzung, während Potenziale für Flexibilität und Kreislaufwirtschaft fallweise von Bedeutung sind. Skizziert wird hier beispielhaft die Produktion von Roheisen und die additive Fertigung mit Metallen.

4.3.2 Disruptiv dekarbonisierte Produktionstechniken an den Beispielen Roheisen und additive Fertigung mit Metallen

Die Produktion von Roheisen und Stahl trägt weltweit mit elf Prozent zu den Emissionen von Kohlendioxid sowie mit sieben Prozent zu den Treibhausgasen insgesamt bei. Für Roheisen gibt es drei disruptiv dekarbonisierte Produktionstechniken. Dabei dominieren gegenwärtig Projekte zur Direktreduktion mit H₂, weil die Direktreduktion mit Erdgas eingeführt ist und auch im Hochofen Wasserstoff beigemischt werden kann. Zudem gibt es noch elektrolytische Prozesse mit Erzlösungen oder -schmelzen, die aber bislang geringere technische Entwicklungsstände aufweisen (LeadIT, 2021).

Die Direktreduktion mit Wasserstoff entkoppelt die Roheisenerzeugung räumlich und zeitlich von der Stromerzeugung. Flexibilität besteht bei der Erzeugung von H₂ und dessen Rückverstromung, wodurch die Roheisenerzeugung wie beim konventionellen Hochofen weitgehend vom Stromangebot unabhängig ist. Dagegen erfordern die elektrolytischen Produktionstechniken eine zusätzliche Stromproduktion, und die Potenziale für Flexibilität beim Einsatz des Stroms zur Erzeugung von Roheisen sind bei der Hochtemperatur-Elektrolyse gegenwärtig unklar (Tabelle 1).

Im Gegensatz zur Hochofen-Konverter-Route liefern die elektrolytischen Produktionstechniken Sauerstoff als Nebenprodukt, der für andere Prozesse genutzt werden kann. Bei der Direktreduktion mit H₂ entsteht dagegen als Nebenprodukt Wasser. Bei allen betrachteten disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken für Roheisen fällt gegenüber dem Hochofen kein Hüttensand an, der bislang ein wichtiger Einsatzstoff in der Zementproduktion ist.

Tab. 1 Eigenschaften disruptiv dekarbonisierter Produktionstechniken für Roheisen

Eigenschaften	Direktreduktion Wasserstoff	Alkalische Eisenelektrolyse	Hochtemperatur-Eisenelektrolyse
TRL	6–8	5–6	4
Projekte/Unternehmen	HYBRIT (Schweden)	SIDERWIN (EU)	BOSTON METAL (USA)
Brückentechnik	Grundsätzlich ja	Nein	Nein
Netzanbindung	Indirekt	Direkt	Direkt
Flexibilität	Hoch: Produktion/ Speicherung Wasserstoff	Relativ hoch: Modularität und Temperatur (110 °C)	Unklar: Hohe Temperatur (ca. 1.600 °C)
Kreislaufwirtschaft	Hohe Qualität Eisenerz	Alternative Einsatzstoffe (z. B. Aluminiumproduktion)	Alle Eisenerze

Neben der Erzeugung von Grundstoffen können auch nachgelagerte Produktionstechniken für Flexibilität und Kreislaufwirtschaft eine wichtige Rolle spielen. Während etwa bei der additiven Fertigung mit Metallen technisch das Potenzial für den flexiblen Einsatz gegeben ist, ist der zukünftige Umfang ihrer Diffusion und ihres absoluten Beitrags zu Dekarbonisierung und Flexibilität ungewiss. Die additive Fertigung mit Metallen bietet wegen der elektrisch betriebenen lokal begrenzten Erwärmung mit anschließender Abkühlung Potenziale für Flexibilität. Zugleich birgt der additive Ansatz mittels neuartiger Formgebungen und insbesondere gegenüber der zerspanenden Fertigung erhebliche Potenziale zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz, da hierbei deutlich weniger Schrott anfällt. Darüber hinaus sind Formgebungen für den Leichtbau möglich, die insbesondere in der Nutzungsphase Effizienzsteigerungen eröffnen, die bislang vor allem in der Luft- und Raumfahrt erschlossen werden. Aber auch bei stationär betriebenen Maschinen ist durch additive Fertigung vermehrter Leichtbau und die Reparatur von Maschinenteilen am Einsatzort möglich, womit Material wiederverwendet und die Wertschöpfungskette räumlich verkürzt werden kann. Somit bestehen bei der additiven Fertigung mit Metallen direkt Potenziale für Flexibilität sowie überdies zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette, was bei Produktionstechniken für Grundstoffe nicht möglich ist (Pastowski und Kobiela, 2021).

5 Systemische Kosten-Nutzen-Abschätzung

Autoren: Seifermann · Gabrek · Zachmann · Neitz-Regett · Pichler

Vor dem Hintergrund, dass die Bereitstellung von Energieflexibilität nicht nur zu einem Vorteil für die umsetzenden Akteure führen kann, sondern auch einen Beitrag für das Energiesystem liefern soll, wird im Folgenden der systemische Mehrwert verschiedener Flexibilitätsoptionen bestimmt. Zur Einschätzung dieses Mehrwerts von industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen im Vergleich zu anderen Flexibilitätsoptionen wird eine systemische Kosten-Nutzen-Abschätzung im Kontext der Stromnetzstabilisierung durchgeführt. Als Grundlage hierfür werden stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen sowie ausgewählte Flexibilitätsoptionen anhand techno-ökonomischer Parameter charakterisiert. Geeignete Anwendungskombinationen werden auf Basis eines Matching-Verfahrens identifiziert und deren Kosten-Nutzen-Verhältnis anhand eines systemischen Rentabilitätsindex (RI) ermittelt. Aus der absteigenden Anordnung der RI kann so für jede Einsatzoption eine Rangfolge geeigneter Flexibilitätsoptionen erstellt werden. Anhand eines analogen Matchings werden industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen geeigneten Einsatzoptionen zugeordnet. Zur Einordnung industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen wird schließlich je Einsatzoption anhand der ermittelten Rangfolgen der Kostenrahmen industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen im Wettbewerb mit vorhandenen Flexibilitätsoptionen abgeleitet. Im Folgenden werden die angewandte Methodik sowie ausgewählte Ergebnisse der systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung dargestellt.

5.1 Methodik zur systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung

Die Bewertung des systemischen Nutzens von Flexibilitätsoptionen für stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen wird anhand von vier Schritten umgesetzt, welche in *Abbildung 22* dargestellt sind. Zunächst werden die auf der Basis von Studien aus dem Bereich der Energiesystemanalyse

identifizierten stromnetzstabilisierenden Einsatzoptionen (z. B. Lastglättung, Regelleistung, Redispatch) hinsichtlich ihrer Anforderungen, ihres Bedarfs, sowie der zu erzielenden Erlöse bzw. vermiedenen Kosten beschrieben. Als Gegenstück erfolgt anschließend die Charakterisierung der als relevant identifizierten Flexibilitätsoptionen (z. B. Lastflexibilisierung, Stromspeicher, Power-to-X-Technologien) in Bezug auf ihre techno-ökonomischen Kennwerte sowie hinsichtlich ihres Potenzials. Durch Abgleich der Anforderungen und des Bedarfs aus Energiesystemsicht mit den technischen Kennwerten und dem Potenzial auf Technologieseite werden durch ein Matching-Verfahren für jede Flexibilitätsoption geeignete Einsatzoptionen identifiziert. Für die so ermittelten Anwendungskombinationen aus jeweils einer Einsatz- und Flexibilitätsoption wird anschließend das systemische Kosten-Nutzen-Verhältnis anhand eines RI bestimmt und einander gegenübergestellt.

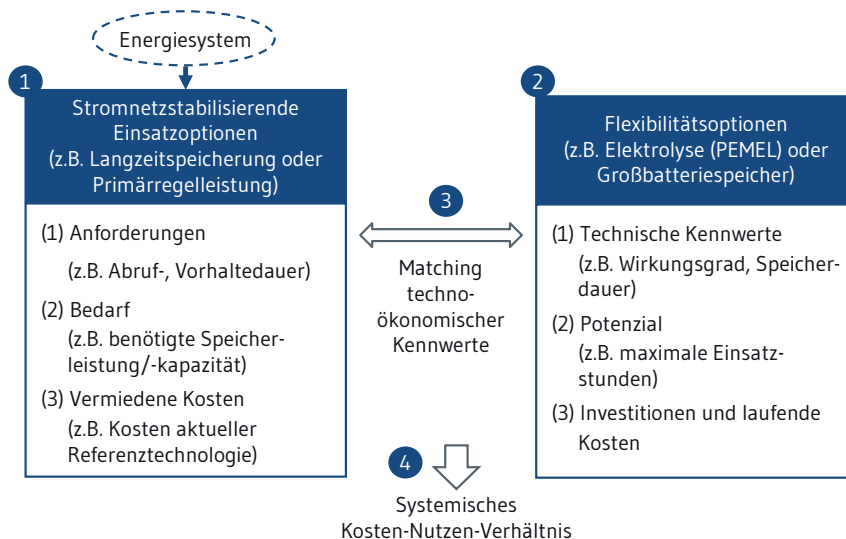


Abb. 22 Überblick über die Methodik zur systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung (eigene Darstellung aufbauend auf Pellingner und Schmid, 2016)

5.2 Auswahl, Charakterisierung und Matching der Einsatz- und Flexibilitätsoptionen

Die Darstellung der Ergebnisse aus der Auswahl und Charakterisierung der Einsatz- und Flexibilitätsoptionen erfolgt in Form von Steckbriefen, die für die jeweiligen Optionen ausgearbeitet werden. Für die Einsatzoption »Primärregelleistung« sowie die Flexibilitätsoption »Großbatteriespeicher« zeigt *Abbildung 23* exemplarisch eine verkürzte Darstellung der erstellten Steckbriefe mit zum Zeitpunkt der Erarbeitung aktuellen Werten (Stand 12/2021).

Zu den betrachteten Einsatzoptionen zählen neben dem Vermeiden von Redispatch und dem Einspeisemanagement auch die Bereitstellung von Regelleistung, die Langzeitspeicherung sowie die Bereitstellung gesicherter Leistung. Da Flexibilitätsoptionen durch die Teilnahme sowohl am Day-Ahead-Markt als auch den Intraday-Märkten zur Lastglättung und somit indirekt zu einer Entlastung des Stromnetzes beitragen, sind diese Einsatzoptionen ebenfalls Teil der Betrachtung.

Einsatzoption "Primärregelleistung"		Flexibilitätsoption "Großbatteriespeicher (Lithium-Ionen-Batterie)"	
Parameter	Aktueller Wert	Parameter	Aktueller Wert
Regulatorische Anforderungen	Mindestleistung: +/- 1 MW	Regulatorische Anforderungen	Befreiung von Steuern und Abgaben für Stromspeicher auf bestimmte Technologien und Zwecke beschränkt
Planungsdauer	0 s	Planungsdauer	Annahme: unmittelbar einsetzbar
Leistungsgradient	100 % in 30 s	Anstiegsdauer	Annahme: unmittelbar einsetzbar (Leistungsgradient 100 %/s)
Abrufdauer	mind. 15 Min.	Abrufdauer	1–4 h
...
Strombezugs-kosten	37,7 €/MWh	Fixe Betriebskosten	3,75–7,48 €/kWh*a (1,5 % der Investitionskosten)
Vermiedene Kosten	69.029 €/MW*a	Variable Kosten (ohne Strombezug)	Annahme: variable Kosten vernachlässigbar

Abb. 23 Verkürzte Steckbriefe der Einsatzoption »Primärregelleistung« und der Flexibilitätsoption »Großbatteriespeicher (Lithium-Ionen-Batterie)« (Stand: 12/2021)

Auf Seiten der Flexibilitätsoptionen werden neben industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen weitere Flexibilitäten im Haushalts- und Verkehrsbereich sowie klassische Strom-zu-Strom-Speicher (Abbildung 23), Power-to-X-Technologien, aber auch die Flexibilisierung erneuerbarer und konventioneller Anlagen und Kraftwerke betrachtet. Somit wird die ganze Spannbreite an Technologien, die für stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen in Frage kommen, abgedeckt.

Die ausführlichen Ergebnisse für alle betrachteten Einsatz- und Flexibilitätsoptionen sind in Seifermann et al. (2021a) sowie Seifermann et al. (2021b) zusammengefasst.

Anhand der ermittelten Parameter für die ausgewählten Einsatz- und Flexibilitätsoptionen werden anschließend mögliche Anwendungskombinationen im Zuge eines Matching-Prozesses aufgedeckt. Um als geeignet eingeordnet zu werden, muss eine Kombination verschiedene Anforderung erfüllen. Die Abrufdauer der Einsatzoption muss beispielsweise die Abrufdauer der Flexibilitätsoption unterschreiten oder dieser entsprechen, damit die Kombination als geeignet eingestuft werden kann.

Die Berücksichtigung sehr heterogener Einsatzoptionen und einer großen Spannweite an Technologie führt dazu, dass als Ergebnis des Matching-Prozesses nicht alle Technologien für alle Einsatzoptionen in Frage kommen. *Abbildung 24* zeigt dazu einen Auszug aus dem Ergebnis des Matching-Prozesses anhand exemplarischer Einsatz- und Flexibilitätsoptionen.

	Langzeitspeicherung	Day-Ahead-Markt	Primärregelleistung
Elektrolyse (AEL)	+	+	+
Elektrolyse (PEMEL)	+	+	+
Großbatteriespeicher	-	+	+
Elektrodenheizkessel	+	+	+
Flexibilisierung KWK	-	+	+
GT-Einsatz	-	-	-

+ geeignete Anwendungskombination; - nicht geeignete Anwendungskombination

Abb. 24 Auszug aus dem Ergebnis des Matching-Prozesses

Die beispielhafte Kombination »Primärregelleistung/Großbatteriespeicher«, welche sich durch das Matching der in *Abbildung 23* bereits eingeführten Einsatz- und Flexibilitätsoption ergibt, stellt auf Grundlage der festgelegten Anforderungen eine geeignete Anwendungskombination dar.

Eine detaillierte Darstellung der Gesamtergebnisse mit allen identifizierten Anwendungskombinationen des Matching-Prozesses ist in Buhl et al. (2021) veröffentlicht.

5.3 Systemisches Kosten-Nutzen-Verhältnis von Flexibilitätsoptionen für stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen

Für alle identifizierten Anwendungskombinationen wird der Rentabilitätsindex (RI) berechnet, sodass anhand dessen für jede Einsatzoption alle geeigneten Technologien bewertet und einander gegenübergestellt werden können. Die Ergebnisse der Rentabilitätsrechnungen werden schließlich je Einsatzoption als Rangfolge in absteigender Reihenfolge der Rentabilitätsindizes dargestellt. Industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen werden in einen Kostenrahmen eingeordnet.

5.3.1 Berechnung des Rentabilitätsindex

Der Rentabilitätsindex (RI) ist ein Maß für eine Kosten-Nutzen-Bewertung und ist aufbauend auf Pelling und Schmid (2016) wie folgt definiert:

$$RI = \frac{\text{jährliche vermiedene Kosten im System} - \text{jährliche Kosten der Flexibilitätsoption}}{\text{jährliche Kosten der Flexibilitätsoption}} \quad (2)$$

In Abhängigkeit von der Einsatzoption wird über die vermiedenen Kosten zunächst der Nutzen des Einsatzes einer Flexibilitätsoption gegenüber der aktuellen Referenztechnologie im Energiesystem bestimmt. Durch die Subtraktion der jährlichen Kosten der Flexibilitätsoption wird der eigentliche Mehrwert im Energiesystem ermittelt. Indem dieser ins Verhältnis zu den jährlichen Kosten gesetzt wird, wird die Rentabilität der Flexibilitätsoption bewertet.

Die berücksichtigten Kosten der Flexibilitätsoptionen umfassen dabei die Investitionen sowie die fixen und variablen Betriebskosten. Um wie in diesem Fall Flexibilitätsoptionen mit unterschiedlichen Lebensdauern vergleichbar machen zu können, werden alle Kosten auf jährlicher Basis erhoben, wobei die Investitionen mithilfe der Berechnung der Annuität in jährliche Kosten übersetzt werden. Dabei wird aufgrund der systemischen Perspektive eine Verteilung der gesamten Investitionen über die Lebensdauer vorgenommen. Vor dem Hintergrund einer systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung sind keine weiteren, aus Sicht der jeweiligen Akteure betriebswirtschaftlich relevanten Kosten Teil der vorliegenden Betrachtung.

5.3.2 Rangfolge der systemischen Kosten-Nutzen-Verhältnisse

Auf Grundlage der berechneten Kosten-Nutzen-Verhältnisse erfolgt für jede Einsatzoption die Aufstellung einer Rangfolge aller geeigneten Flexibilitätsoptionen absteigend nach ihrem RI. Die Rangfolge für die exemplarisch aufgegriffene Einsatzoption »Primärregelleistung« ist in *Abbildung 25* dargestellt. Für die ausgewählte Anwendungskombination mit der Flexibilitätsoption »Großbatterie-speicher« ergibt sich ein RI von 0,90.

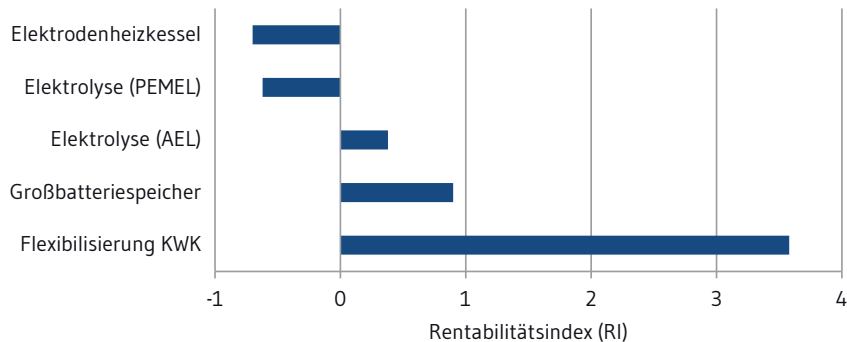


Abb. 25 Rangfolge der Kosten-Nutzen-Abschätzung der Einsatzoption »Primärregelleistung« (Annuitätzins 0,5 Prozent)

Ein positiver RI bedeutet, dass der Nutzen größer ist als die Kosten und somit ein Mehrwert für das Energiesystem erzielt werden kann, wobei ein höherer RI-Wert dabei mit einem höheren Mehrwert aus System Sicht einhergeht. Ein negativer RI wiederum stellt keineswegs ein Ausschlusskriterium dar, sondern beschreibt lediglich einen (notwendigen) Mehraufwand aus System Sicht. Für die in *Abbildung 25* betrachtete Einsatzoption stellt die Flexibilitätsoption »Flexibilisierung Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)« folglich die beste Lösung dar.

5.3.3 Kostenrahmen für industrielle Flexibilitätsoptionen

In der Praxis stehen industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen im Wettbewerb zu sonstigen Flexibilitätsoptionen. Für einen direkten Vergleich der RI-Werte gemäß dem oben beschriebenen Vorgehen sind allerdings konkrete Kostendaten erforderlich. Aufgrund zahlreicher unternehmensspezifischer Rahmenbedingungen und der hohen Heterogenität der betrachteten Prozesse liegen keine genauen Kostenaussagen vor und belastbare Annahmen können nicht getroffen werden. Zur Bewertung und Einordnung industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen in den Gesamtkontext aller betrachteten bestehenden Flexibilitätsoptionen wird daher ein Kostenrahmen für industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen ermittelt. Dieser stellt maximale und minimale Grenzwerte bereit, in die sich industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen einordnen können, um ihre Konkurrenzfähigkeit zu prüfen.

Zunächst werden, analog zu dem bereits beschriebenen Matching-Prozess, geeignete Einsatzoptionen für die industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen identifiziert. Durch Umstellen von *Gleichung 2* werden anhand der zuvor aufgestellten Rangfolge der RIs für jede relevante Einsatzoption die spezifischen Kosten der untersuchten Anwendungskombinationen des ersten sowie letzten Rangs berechnet. Für Einsatzoptionen, die die Bereitstellung von Regelleistung umfassen, ist der Kostenrahmen in €/MW angebotene Leistung angegeben. Die Kosten für Einsatzoptionen des Energy-Only-Markts sowie für die Langzeitspeicherung wurden auf die ausgespeicherte Energiemenge bezogen

und in €/MWh angegeben. Die in *Abbildung 26* für die unterschiedlichen Einsatzoptionen dargestellten Ergebnisse zeigen eine Abschätzung des Kostenrahmens industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen im Wettbewerb mit vorhandenen Flexibilitätsoptionen.

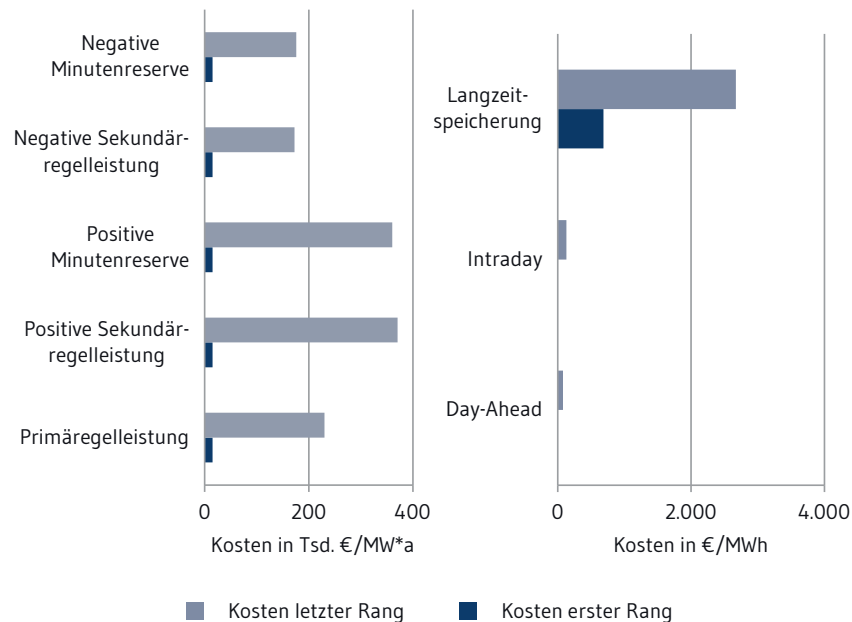


Abb. 26 Kostenrahmen für industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen je Einsatzoption

Der Kostenrahmen bezieht sich dabei stets auf die identifizierten Anwendungskombinationen und die in den Steckbriefen definierten Parameter der jeweiligen Einsatz- und Flexibilitätsoptionen. Es kann jedoch dazu kommen, dass industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen aufgrund zusätzlicher Einschränkungen (beispielsweise der zeitlichen Verfügbarkeit) nicht die gesamten vermiedenen Kosten erzielen können.

Für die aufgegriffene Einsatzoption »Primärregelleistung« beispielsweise liegt der Kostenrahmen, welcher sich durch die Rückrechnung des RI ergibt, in etwa zwischen 15.000€/MW und 230.000€/MW. Folglich müssen für Primärregelleistung geeignete industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen bei vergleichbarer zeitlicher Verfügbarkeit im unteren Bereich dieses Kostenrahmens umsetzbar sein, um mit den weiteren betrachteten Flexibilitätsoptionen konkurrieren zu können.

6 Fazit

Autoren: Gabrek · Hübner · Metzger · Neitz-Regett · Pichler · Seifermann · Tristán · Veitengruber · von Roon · Zachmann

Aus heutiger Sicht bestehen perspektivisch umfangreiche Energieflexibilisierungspotenziale der Industrie in Deutschland: Im Fall des Lastverzichts resultiert für Energieflexibilitätsmaßnahmen mit einer Abrufdauer von mindestens 15 Minuten ein Energieflexibilitätspotenzial von 10,7 GW bzw. 48 TWh/a, im Fall einer Lasterhöhung 9,0 GW bzw. 46 TWh/a. Für einen netzdienlichen Einsatz ist die regionale Verteilung der Energieflexibilitätspotenziale entscheidend. Besonders hohe Potenziale sind in den deutschen Industriezentren (Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz) erkennbar. Um entsprechende Energieflexibilitätsmaßnahmen und -potenziale systematisch zu identifizieren und zu analysieren, bietet das Energieflexibilitätsaudit den Unternehmen eine systematische Herangehensweise, mit deren Hilfe sie Energieflexibilitätsziele technisch sowie wirtschaftlich verfolgen können.

Die Analyse der Auswirkungen von industriellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Energieflexibilität von Prozessen und Technologien zeigt, dass bei hohem industriellem Klimaschutzambitionsniveau zusätzliche Energieflexibilitätspotenziale in der Industrie entstehen. Bis 2050 könnten das positive bzw. negative Energieflexibilitätspotenzial zusätzlich um 7,7 GW respektive 6,3 GW im Jahr 2050 gegenüber 2018 ansteigen. Für den Strommix im Bezugsjahr 2019 ergibt sich aus den untersuchten industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen (*Kapitel 3.1*) ein CO₂-Vermeidungspotenzial von mindestens 700.000 Tonnen CO₂. Zur Identifikation relevanter Flexibilitätsmärkte außerhalb Deutschlands wurde die Analyse der Energieflexibilitätspotenziale auf Nachbarländer sowie Länder mit vergleichbaren industriellen und technischen Rahmenbedingungen ausgeweitet. Gemessen am Gesamtstromverbrauch könnten insbesondere Polen, die Slowakei, Norwegen und Australien am stärksten von einer jeweiligen Prozessflexibilisierung profitieren.

Zur Einordnung von industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen gegenüber konkurrierenden Flexibilitätsoptionen wird im Zuge der systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung ein Kostenrahmen für industrielle Energieflexibilitätsmaßnahmen ermittelt. Die Einordnung ergibt, dass die industrielle Energieflexibilität grundsätzlich für alle untersuchten Einsatzoptionen geeignet ist; ihre Konkurrenzfähigkeit hängt in den verschiedenen Einsatzoptionen jedoch stark von den Parametern der konkreten Anwendungskombination ab.

Damit die industrielle Energieflexibilität einen positiven Beitrag zur erfolgreichen Bewältigung der Integration von erneuerbaren Energien leisten kann, sollten die aufgezeigten und erheblichen Energieflexibilitätspotenziale national wie international erschlossen werden.

7 Literatur

AUSFELDER, F., A. SEITZ und S. VON ROON, Hrsg., 2018. *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik, Potenziale, Hemmnisse*. 1. Aufl. Frankfurt am Main: DECHEMA.

AUSFELDER, F., S. VON ROON, A. SEITZ, Hrsg., 2019. *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II: Analysen, Technologien, Beispiele*. 1. Aufl. Frankfurt am Main: DECHEMA.

BUHL, H. U., N. GABREK, J. GERDES, C. KAYMAKCI, K. RAULAND, F. RICHTER, A. SAUER, C. SCHNEIDER, P. SCHOTT, S. SEIFERMANN, A. TRISTÁN, J. WAGNER, F. WAGON, M. WEIBELZAHL, J. WEISSFLOG und B. ZACHMANN, 2021. *Industrial Flexibility Options and their Applications in a Future Energy System* [online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.24406/fit-n-639062>

DIN EN 16247-1:2012-10, 2012. *Energieaudits – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Deutsche Fassung*. [Zugriff am 12. September 2021].

ENTSO-E. *ENTSO-E Transparency Platform*. [Zugriff am 25. August 2021]. Verfügbar unter: <https://transparency.entsoe.eu/>

FIEDLER, C., C. PELLINGER, 2018. *Verbundprojekt eXtremOS – Wert von Flexibilität im Kontext der europäischen Strommarktkopplung bei extremen technologischen, regulatorischen und gesellschaftlichen Entwicklungen*. München: Forschungsstelle für ENERGIEWIRTSCHAFT e.V. [Zugriff am 21. September 2021]. Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/projekte/extremos/>

FIORINI, L., M. AIELLO, 2018. Household CO₂-efficient energy management. *Energy Informatics*, S. 21–34.

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021. *Netzentgelte-Demonstrator* [online] [Zugriff am: 13.12.2021]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/netzentgelte-demonstrator>

LEADERSHIP GROUP FOR INDUSTRY TRANSITION (LEADIT), 2021. *Green Steel Tracker*. [Zugriff am 18. April 2021]. Verfügbar unter: <https://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/>

HÜBNER, T., K. METZGER, F. VEITENGRUBER, S. VON ROON, 2022. *Auswirkungen von industriellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE).

HÜBNER, T., S. VON ROON, 2020. *Modellierung kosteneffizienter Transformationspfade der deutschen Industrie*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE).

KAMMER, K., 2009. *Aluminium Taschenbuch 1*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH.

PASTOWSKIA, A., G. KOBIELA, 2020. Value chain-wide energy efficiency potentials of additive manufacturing with metals – some preliminary hypotheses. In: *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings*. Stockholm: European Council for an Energy Efficient Economy.

PELLINGER, C., T. SCHMID und andere, 2016. *Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 – Hauptbericht*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE).

POGANIETZ, W.-R., C. TIMPE, L. BECKER, T. HÖFER, M. KOCH, D. SEEBACH, A. WEISS, T. WILDGRUBE, 2019. *Entwicklungspfade aus dem ENSURE-Projekt: Transformation des Energiesystems bis zum Jahr 2030*.

ROBINIUS, M., P. MARKEWITZ, P. LOPION, F. KULLMANN, D. STOLTEN, 2020. *Wege für die Energiewende: Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*.

SAUER, A., E. ABELE und H. U. BUHL, Hg., 2019. *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

SEIFERMANN, S., L. ACKERMANN, A. DJAMALI, N. GABREK, A. NEITZ-REGETT, V. PICHLER, K. RAULAND, B. SINDER, B. ZACHMANN, 2021a. *Identifikation und technoökonomische Charakterisierung von Flexibilitätsoptionen*. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/download/charakterisierung-flexoptionen>

SEIFERMANN, S., L. ACKERMANN, A. DJAMALI, N. GABREK, A. NEITZ-REGETT, V. PICHLER, B. SINGER, B. ZACHMANN, 2021b. *Identifikation und technoökonomische Charakterisierung von Einsatzoptionen für Flexibilitätsoptionen zur Stabilisierung des Stromnetzes*. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/download/einsatzoptionen-flexoptionen-stromnetz>

STATISTISCHES BUNDESAMT, 2008. *Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen. Ausgabe 2008*. Statistisches Bundesamt (Destatis). Wiesbaden [Zugriff am: 30. September 2021]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationwz2008_erl.pdf?__blob=publicationFile

STOFFREGEN, T., 2021. *Speicherkapazität von Post-Carbon-Capture-Anlagen. Interview durch K. Metzger*. Essen: Linde AG.

TRISTÁN, A., F. HEUBERGER, A. SAUER, 2020. A Methodology to Systematically Identify and Characterize Energy Flexibility Measures in Industrial Systems [online]. In: *Energies* 13 (22), p. 5887. Verfügbar unter: DOI: 10.3390/en13225887

TRISTÁN, A., C. KAYMAKCI, A. SAUER, 2021. Mining energy consumption data of industrial systems to identify and characterize energy flexibility capabilities. In *SmartGridComm Conference*.

VDI 5207, Blatt 2: *Energieflexible Fabrik – Identifikation und technische Bewertung*. 2021.

WOLF, S., 2016. *Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme: Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung*. Stuttgart: Universität Stuttgart.





A.3

Energieflexible Modellregion Augsburg

Management Summary

Die Energieflexible Modellregion Augsburg stellt eine Demonstrator-Umgebung dar, die energieflexiblen Fabriken die Möglichkeit bietet, die Vermarktung von Energieflexibilität im Rahmen eines konzeptionellen Testbetriebs in einem regionalen Kontext zu erproben. Für die Beschreibung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg werden im *Kapitel A.3* die Grundlagen der regionalen Vermarktung von Energieflexibilität vorgestellt. Dazu werden ökonomische, technische und gesellschaftliche Lösungsbausteine untersucht. Darüber hinaus wird beschrieben, wie ein Spezialpapierhersteller, ein Gewerbeverband, elektrische Fahrzeuge, ein Landmaschinenhersteller sowie kleine und mittlere Unternehmen dazu befähigt werden können, energieflexibel zu operieren. Neben der Untersuchung, der Umsetzung und dem Test zur regionalen Vermarktung von Maßnahmen in Industrieunternehmen (z. B. energieflexible Steuerung von Ladesäulen, Lüftungsanlagen oder die energieflexible Fahrweise der Strom- und Dampferzeugung) wird das Potenzial zur Weiterentwicklung und der Übertragbarkeit auf andere Regionen aufgezeigt. Die Regionen, die hinsichtlich ihrer techno-ökonomischen Aspekte für eine Übertragung geeignet sind, umfassen zwar deutlich weniger als 20 Prozent der Fläche der Bundesrepublik Deutschland. Auf sie entfallen allerdings ca. 44 Prozent des Gesamtstromverbrauchs und rund 50 Prozent des industriellen Stromverbrauchs. Es bestehen somit weitreichende Möglichkeiten, die gewonnenen Erkenntnisse aus der Energieflexiblen Modellregion Augsburg zur Erschließung von Energieflexibilitätpotenzialen in weiteren Regionen in ganz Deutschland einzusetzen.

Autoren

Bank, Lukas
 lukas.bank@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Blöchl, Bruno
 bruno.bloechl@alouis-mueller.com
 Alois Müller GmbH
 Gutenbergstraße 12, 87781 Ungerhausen

Buhl, Hans Ulrich
 hans-ulrich.buhl@fim-rc.de
 Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
 management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
 informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
 Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Dietz, Benjamin
 b.dietz@steinbacher-consult.com
 Steinbacher-Consult
 Richard-Wagner-Straße 6, 86356 Neusäß

Ebinger, Katharina
 katharina.ebinger@forschungswende.de
 Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
 Charitéstraße 3, 10117 Berlin

Fouquet, Marcel
 marcel.fouquet@fim-rc.de
 Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
 management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
 informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
 Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Häckel, Björn
 bjoern.haekkel@fim-rc.de
 Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
 management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
 informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
 Alter Postweg 101, 86159

Hieronymus, Aljoscha
 aljoscha.hieronymus@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Jetter, Fabian
 fjetter@ffe.de
 Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
 Am Blütenanger 71, 80995 München

Jordan, Patrick
patrick.jordan@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Köberlein, Jana
info@igcv.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Koch, Carsten
carsten.koch@agcocorp.com
AGCO GmbH
Fendt-Straße 1, 86663 Asbach-Bäumenheim

Kohler, Baldur
bkohler@felix-schoeller.com
Schoeller Technocell GmbH & Co. KG
Nicolausstraße 10, 87634 Günzach

Krings, Bettina-Johanna
bettina-johanna.krings@kit.edu
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für
Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
Karlstraße 11, 76133 Karlsruhe

Mayer, Tim
t.mayer@steinbacher-consult.com
Steinbacher-Consult
Richard-Wagner-Straße 6, 86356 Neusäß

Michaelis, Anne
anne.michaelis@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Müller, Andreas
andreas.mueller@alouis-mueller.com
Alois Müller GmbH
Gutenbergstraße 12, 87781 Ungerhausen

Ober, Steffi
steffi.ober@forschungswende.de
Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
Charitéstraße 3, 10117 Berlin

Reichmuth, Marcel
marcel.reichmuth@forschungswende.de
Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
Charitéstraße 3, 10117 Berlin

Roth, Stefan
stefan.roth@igcv.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Roth, Lea
lea.roth@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Scharmer, Valerie
valerie.scharmer@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Schilp, Johannes
johannes.schilp@igcv.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Schimmelpfennig, Jens
jens.schimmelpfennig@softwareag.com
Software AG
Altenkessler Str. 17, 66115 Saarbrücken

Schott, Paul
paul.schott@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Schulz, Julia
julia.schulz@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Veitengruber, Frank
fveitengruber@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München

Vernim, Susanne
susanne.vernim@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Weißflog, Jan
jan.weissflog@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Winter, Christian
christian.winter@softwareag.com
Software AG
Uhlandstrasse 12, 64297 Darmstadt

Wuntke, Marian
marian.wuntke@forschungswende.de
Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende
Charitéstraße 3, 10117 Berlin

Zachmann, Bastian
b.zachmann@hs-mannheim.de
Hochschule Mannheim
Paul-Wittsack-Straße 10, 68163 Mannheim

Zäh, Michael
michael.zaeh@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Autoren: Jordan · Scharmer · Schulz · Vernim · Zäh

Die Energieflexible Modellregion Augsburg ist eine Umgebung, in der Potenziale, Auswirkungen, Chancen und Hemmnisse von energieflexiblen Fabriken im regionalen Zusammenhang ganzheitliche betrachtet werden. In Sauer et al. (2019) werden die technologischen, ökologischen und gesellschaftlichen Aspekte beleuchtet, die für die Unterstützung der Energiewende durch industrielle Energieflexibilität entscheidend sind. Im Folgenden werden diese aufgegriffen und um die Erkenntnisse aus der Energieflexiblen Modellregion Augsburg erweitert.

Die Energieflexible Modellregion Augsburg umfasst über die Stadt Augsburg hinaus einen großen Teil des Netzgebietes des ansässigen Verteilnetzbetreibers LVN. Die Modellregion verzeichnet eine anwachsende Anzahl an Partnern aus der Industrie, der Forschung, der Energiewirtschaft, der Informationstechnik-Branche (IT) und vielfältige Interessensgruppen (*Abbildung 1*), die eng zusammenarbeiten. Das Ziel der Energieflexiblen Modellregion Augsburg ist die Untersuchung der regionalen Vermarktung von Energieflexibilität – von der Maschinenebene in Fabriken bis hin zum Energiemarkt unter Verwendung digitaler Plattformen zur automatisierten Energiesynchronisation. Der Ansatz konzentriert sich auf die Identifikation relevanter Themenfelder und Anwendungsfälle, wobei den zugrunde liegenden Prozessen zur Flexibilitätsvermarktung eine zentrale Bedeutung zugeschrieben wird. Die Energieflexible Modellregion Augsburg dient somit als ein Umfeld für einen konzeptionellen Testbetrieb, bei dem energieflexible Fabriken die Möglichkeit haben, den Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen sowie deren Vermarktung konzeptionell zu erproben. Das Kapitel über die Energieflexible Modellregion Augsburg stellt, beginnend mit der Beschreibung der relevanten Lösungsbau- steine im ökonomischen, technischen und gesellschaftlichen Bereich (*Kapitel 2*), das Vorgehen zur Analyse und zur konzeptionellen Erprobung der industriellen Energieflexibilitätsbefähigung im regionalen Kontext dar. Davon ausgehend werden die Untersuchungen in insgesamt fünf industriellen Anwendungsfällen unterschiedlicher Entwicklungstiefe und deren konzeptioneller Testbetrieb beschrieben (*Kapitel 3*). Abschließend werden die technischen Potenziale und gesellschaftlichen Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Energieflexiblen Modellregion Augsburg beleuchtet (*Kapitel 4*).

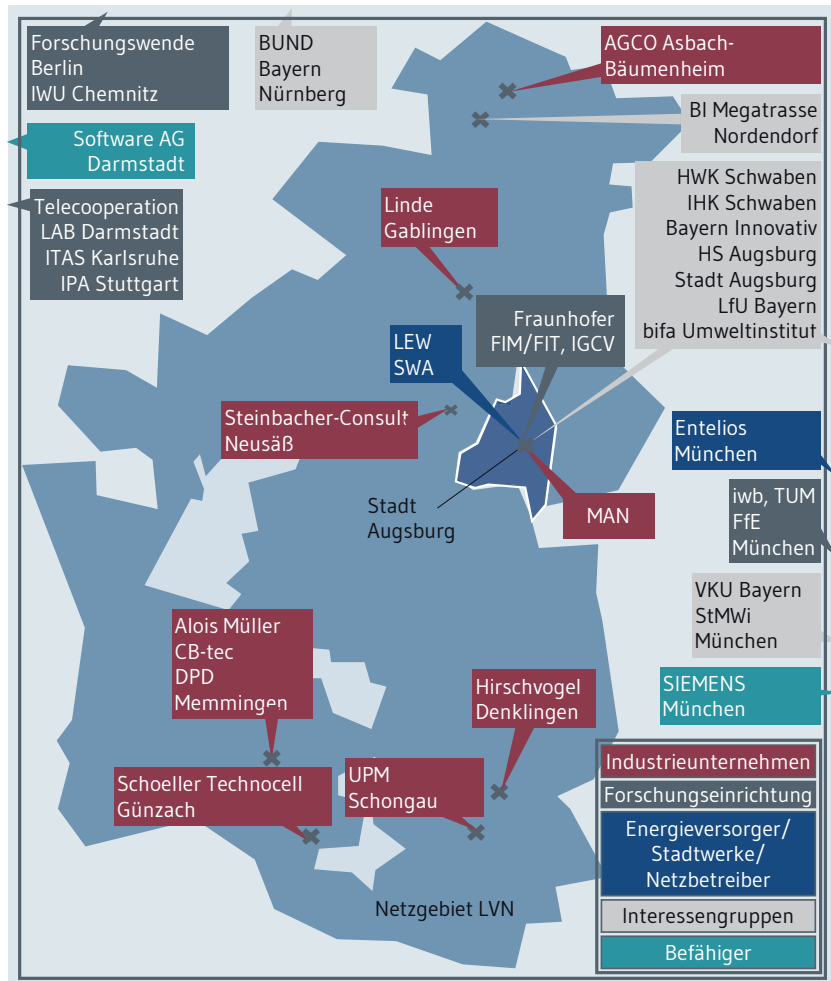


Abb. 1 Partner der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

2 Lösungsbausteine der regionalen Vermarktung von industrieller Energieflexibilität

Autoren: Bank · Buhl · Ebinger · Fouquet · Häckel · Hieronymus · Köberlein · Krings · Michaelis · Ober · Reichmuth · Roth · Roth · Schilp · Schimmelpfennig · Schott · Weißflog · Winter · Wuntke

Zur Befähigung von energieflexiblen Fabriken in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg erweisen sich unterschiedliche Lösungsbausteine als essenziell: Neben der Konzeptionierung und dem prototypischen Aufbau des lokalen Flexibilitätshandels (*Kapitel 2.1*) trägt das erarbeitete informations- und

kommunikationstechnische (IKT-)Plattformkonzept (*Kapitel 2.2*) zur Befähigung der beteiligten Industrie- und Energiewirtschaftsunternehmen bei. Darüber hinaus werden die Methoden der Organisationsentwicklung und ein systemischer Ansatz als gesellschaftliche Lösungsbausteine (*Kapitel 2.3*) angewendet.

2.1 Ökonomischer Lösungsbaustein: Lokaler Flexibilitätshandel

Bei einer zunehmenden Dezentralisierung der Stromerzeugung und einer erhöhten fluktuierenden Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien – beispielsweise aus Photovoltaik- oder Windkraftanlagen – kann der lokale Handel von Energieflexibilität auf mehreren Ebenen einen wesentlichen Beitrag leisten: Neben der kosteneffizienten Vermeidung bzw. Behebung von Netzengpässen (Netzdienlichkeit) und der Stabilisierung der Netzfrequenz (Systemdienlichkeit) kann auch ein lokaler Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage (Marktdienlichkeit) stattfinden. Daneben ist die Möglichkeit zur Vermarktung von Flexibilität (beispielsweise über einen lokalen Flexibilitätshandel) eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass Unternehmen Flexibilität bereitstellen. Für einen solchen Flexibilitätshandel bedarf es verschiedener Flexibilitätsprodukte, die zwischen den jeweiligen Stakeholdern auf regionaler Ebene gehandelt werden können. Relevante Stakeholder auf der Flexibilitätsnachfrageseite sind neben dem Verteilnetzbetreiber und Unternehmen auch weitere (private) Akteure, während angebotsseitig unter anderem Unternehmen, die industrielle Energieflexibilität vermarkten, zu nennen sind.

Aufbauend auf den Ergebnissen zum Markt- und Stromsystem (*Kapitel A.1*) sowie zur IKT (*Kapitel B.3*) wurde in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg ein Konzept für einen lokalen Flexibilitätshandel entworfen, der in dieser konzeptionell getestet wurde. Dem zugrunde liegt neben einer Anforderungsanalyse verschiedener Stakeholder (hier konkret: Verteilnetzbetreiber und Unternehmen), basierend auf einer Literaturanalyse, Steckbriefen und Interviews mit Fachpersonen, die Definition zweier beispielhafter Flexibilitätsprodukte für den lokalen Flexibilitätshandel in Anlehnung an bestehende Produkte auf den Energy-Only-Märkten. Diese beiden Produkte weisen unterschiedliche Eigenschaften auf, die die Anforderungen der Unternehmen und der Verteilnetzbetreiber berücksichtigen. Sie sind in *Tabelle 1* dargestellt.

Tab. 1 Eigenschaften der beispielhaften Flexibilitätsprodukte für den lokalen Flexibilitätshandel

Eigenschaften	FlexAhead-Produkt	IntraFlex-Produkt
Wirkrichtung der Energieflexibilität	Positiv: Verbrauchserhöhung Negativ: Verbrauchsreduktion <i>(analog zum Energieflexibilitätsdatenmodell, Kapitel B.3)</i>	Positiv: Verbrauchserhöhung Negativ: Verbrauchsreduktion <i>(analog zum Energieflexibilitätsdatenmodell, Kapitel B.3)</i>
Produktdauer/ Zeitscheiben	60 Minuten <i>(zu jeder vollen Stunde)</i>	15 Minuten <i>(zu jeder Viertelstunde)</i>
Auktionseröffnung	7 Tage vor Erbringung	1 Tag vor Erbringung
Handelsschluss	14 Uhr am Tag vor der Erbringung	15 Minuten vor der Erbringung
Preisfindung	Pay-as-Bid	Pay-as-Bid

Perspektivisch kann der lokale Flexibilitätshandel auf der Nachfrageseite auch für weitere Stakeholder wie Bilanzkreisverantwortliche geöffnet werden. Dies erhöht nicht nur die Attraktivität des lokalen Flexibilitätshandels, sondern auch die Marktliquidität. Zudem ermöglicht eine Öffnung auch weiteren Stakeholdern die Nutzung lokaler Energieflexibilität, etwa für den Bilanzkreisausgleich.

2.2 Technische Lösungsbausteine: IKT-Lösungen für regionale Nachfrageflexibilität

Die Energiesynchronisationsplattform stellt eine Lösung dar, die durch die Teilnahme von Unternehmen den Flexibilitätshandel ermöglicht. Als übergeordnetes Konzept des Zusammenwirkens von mehreren Unternehmensplattformen und einer zentralen Marktplattform zur Vermittlung verschiedener Services bildet die Energiesynchronisationsplattform ein Plattformökosystem, das den gesamten Prozess des Energieflexibilitätshandels unterstützt – von der Maschine bis zu den Vermarktungsservices, wie der Aggregator-Flexibilitätshandel von Entelios (*Kapitel B.3*). In den nächsten Abschnitten werden die Teilsysteme, die für die Energieflexible Modellregion Augsburg relevant sind, näher beschrieben. Darüber hinaus bildet die Plattformlösung die Grundlage für einen standardisierten und automatisierten Handel von Flexibilität in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg, in der das Konzept gemeinsam mit den involvierten Unternehmen in die Anwendung überführt und dort konzeptionell getestet wurde (*Kapitel 3.4*).

2.2.1 Marktplattform zur Vermittlung verschiedener Services

Die Marktplattform ist eine Meta-Plattform, die es ermöglicht, verschiedene Energieflexibilitätsmärkte und Services zu vermitteln. Services müssen zunächst auf der Marktplattform registriert werden und einen Autorisierungsprozess durchlaufen (*Kapitel B.1*). Die Services können beispielsweise zur Bewertung von Energieflexibilitätspotenzialen, zum lokalen Handel von Energieflexibilität oder zum Bezug von Strompreisprognosen genutzt werden. Der lokale Flexibilitätshandel ist prototypisch entwickelt und stellt für die Unternehmen und den Verteilnetzbetreibern eine Schnittstelle dar. So können über die jeweilige Unternehmensplattform unmittelbar Flexibilitätsangebote auf dem lokalen Flexibilitätsmarkt inseriert, aktualisiert und zurückgezogen werden. Der Verteilnetzbetreiber kann über eine Schnittstelle die angebotenen Energieflexibilitäten einsehen, buchen und aktivieren. Die Kommunikation von Flexibilitätsangeboten basiert auf dem einheitlichen Energieflexibilitätsdatenmodell (*Kapitel B.3*).

2.2.2 Unternehmensplattform zur Flexibilitätsbefähigung von Unternehmen

Die Unternehmensplattform erweitert das modulare und serviceorientierte IKT-System eines Unternehmens, das dieses zum automatisierten Energieflexibilitätshandel befähigt (Schel et al., 2018). Sie stellt die notwendigen Funktionalitäten zur Anbindung und Ansteuerung energieflexibler Produktionsprozesse und -infrastruktur bereit und unterstützt durch eine Vielzahl modular hinzufügbare Services die Analyse, Aggregation, Optimierung und Vermarktung von Energieflexibilität im Unternehmen

(Schel et al., 2018) (*Kapitel B.3*). Für den Betrieb der Unternehmensplattform sind drei verschiedene Modelle vorgesehen: (1) eine private Plattform, die im Unternehmen selbst betrieben wird, (2) ein öffentliches Betriebsmodell, bei dem die Unternehmensplattform von einem Dienstleister in der Cloud betrieben wird und (3) ein hybrides Betriebsmodell, das die zuvor genannten Alternativen verbindet (*Kapitel B.3*).

Die beteiligten Industrieunternehmen der Energieflexiblen Modellregion Augsburg nutzen im Rahmen des konzeptionellen Testbetriebs je eine von einem Dienstleister in der Cloud betriebene Plattform. In der Energieflexiblen Modellregion Augsburg werden verschiedene Konnektoren – etwa der »Smarte Konnektor« (*Kapitel B.3*) oder auf die Unternehmen maßgeschneiderte Konnektoren – genutzt, um je nach Anwendungsfall energieflexible Anlagen, Sensoren, Steuerungs- oder Planungssysteme an die Unternehmensplattform anzubinden und so die energieorientierte Steuerung zu ermöglichen. Anlagendaten und ggf. weitere Daten werden dann im Konnektor in Flexibilitätsbeschreibungen gemäß dem Energieflexibilitätsdatenmodell (*Kapitel B.3*) übersetzt. Die Energieflexibilitäten können anschließend mithilfe der Vermarktungskomponente der Unternehmensplattform vermarktet werden. Hierzu muss der Zielmarkt ausgewählt werden. Im konzeptionellen Testbetrieb der Energieflexiblen Modellregion Augsburg ist dies vorrangig der lokale Flexibilitätsmarkt. Die Vermarktungskomponente nutzt eine zielmarktspezifische Transformationskomponente, mit der sie die Flexibilität in eine marktspezifische Beschreibung überführt und an den Zielmarkt sendet.

2.3 Gesellschaftliche Lösungsbausteine

Um die Energieflexible Modellregion Augsburg weiterzuentwickeln und Energieflexibilitätspotenziale in den Unternehmen zu erschließen, muss eine starke Partizipation und Akzeptanz in der Bevölkerung erreicht werden. In diesem Kapitel werden hierfür zwei Ansätze vorgestellt: (1) Energiewende und Energieflexibilität als Thema in der Organisationsentwicklung sowie (2) die systemische Betrachtung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg.

2.3.1 Organisationsentwicklung und Akzeptanz

Technologische Innovationen spielen eine zentrale Rolle in der Energiewende. Diese Innovationen erweisen jedoch nur einen Mehrwert, wenn sie gesellschaftlich akzeptiert und unterstützt werden. Die Mitarbeitenden in den Unternehmen bringen sich aktiver in die Umsetzung von Innovationen und Energieflexibilität ein, wenn sie in die betrieblichen Transformationsprozesse einbezogen werden.

Dazu wurden bei den beteiligten Industriepartnern die Veränderungen analysiert, die im Unternehmenskontext durch die Energieflexibilität auf die Firmen der Energieflexiblen Modellregion Augsburg zukamen. Im Vordergrund stand insbesondere die regionale Zusammenarbeit mit einem Papierhersteller aus der Energieflexiblen Modellregion Augsburg und einem Landmaschinenhersteller, deren betriebliche Transformation im Rahmen der Energiewende ganzheitlich betrachtet und hier beschrieben wird. *Abbildung 2* illustriert den Prozess für das gemeinsame Vorgehen mit Schlüsselakteuren im Unternehmen, der aus vier Phasen besteht. Die vorgestellten Phasen laufen iterativ ab.

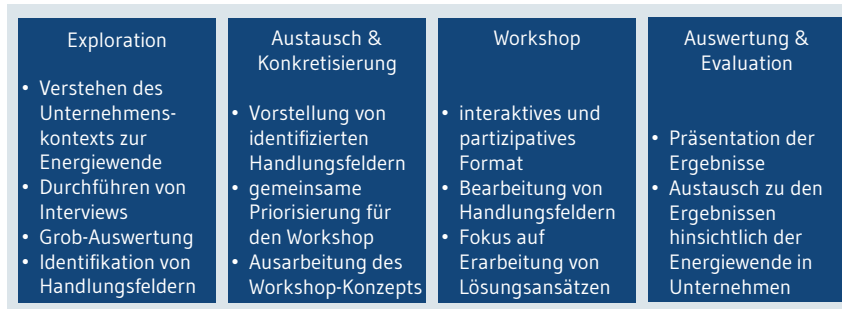


Abb. 2 Iterativer Organisationsentwicklungsprozess in Unternehmen der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

1. Durch das Erforschen der unterschiedlichen Arbeitsbereiche der Mitarbeitenden liefert die Exploration (erste Phase) einen breiten Blickwinkel und wichtige Erkenntnisse bezüglich der subjektiv betrachteten Potenziale und Hindernisse im Unternehmen in Bezug auf die Energiewende.
2. Durch die Grobauswertung (zweite Phase) können Handlungsfelder in Bezug auf die regionale Energieflexibilität pro Unternehmen konkretisiert werden. Jedes dieser Handlungsfelder kann Potenziale aufweisen, um mit neuen Ideen zur betrieblichen Entwicklung und der Implementierung der Energieflexibilität aus Sicht der Arbeitnehmer beizutragen.
3. Im Verlauf des Prozesses wird ein Handlungsfeld im Rahmen eines Workshops kollektiv bearbeitet und so ganzheitlich betrachtet (dritte Phase). Zusätzlich können durch die Integration unterschiedlicher Sichtweisen und Expertisen der Mitarbeitenden tragfähige Lösungsansätze erarbeitet werden.
4. Diese Ergebnisse müssen anschließend weiter validiert und gemeinschaftlich umgesetzt werden (vierte Phase). Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist der inklusive Gestaltungsprozess. Durch die aktive Teilhabe in den Transformationsprozessen der Belegschaft wird ein Verständnis für die betriebliche Veränderung geschaffen, und es entsteht die nötige Akzeptanz als wichtiges Element für die Agilität und Zukunftsfähigkeit eines Unternehmens in der Energiewende. In der Auswertung und Evaluation (vierte Phase) sollten Möglichkeiten zum Austausch geschaffen werden, um das Wissen und die Erfahrung der Mitarbeitenden gewinnbringend in die energiewendebedingten Veränderungsprozesse einzubinden.

Eine organisationale Transformation kann nur gelingen, wenn diese auf allen Ebenen eines Unternehmens getragen wird. Das setzt mindestens passive Akzeptanz (Meyer, 2019) bei der Mehrheit der Betriebsangehörigen voraus. Deshalb ist eine Prüfung von entwickelten Maßnahmen auf Akzeptabilität (die Möglichkeit, dass etwas akzeptiert werden »kann« (Meyer, 2019)) zwingend. Die im Kopernikus-Projekt ENavi entwickelten Bewertungskriterien für energiepolitische Maßnahmen (Quitow et al., 2018) wurden auf die entwickelten betriebliche Maßnahmen übertragen. Exemplarisch

zu nennen sind hier die Dimensionen der Resilienz (Prüfung der Maßnahmen auf Risiken), der ethischen Akzeptabilität (Prüfung der Maßnahmen beispielsweise hinsichtlich Gerechtigkeit) oder der Förderung des sozialen Zusammenhalts (Prüfung der Maßnahmen beispielsweise hinsichtlich Bereitschaft im Betrieb). Unternehmen bewerten gesamtgesellschaftliche Diskurse zur Gestaltung der Energiewende und deliberative Partizipationsprozesse überwiegend als relevant (Krings, 2019). Gleichwohl überträgt sich diese Wahrnehmung oft nicht auf innerbetriebliche Prozesse. Hier gilt es, die Unternehmen im Rahmen der Organisationsentwicklung für den Zusammenhang von Akzeptabilität, innerbetrieblichen Strukturen und Prozessen sowie Unternehmenskulturen zu sensibilisieren und ein passgenaues Angebot für die Ausgestaltung dieser zu machen.

2.3.2 Systemische Betrachtung: Die transdisziplinäre Entwicklung der Systemkarte zur Energielandschaft Augsburg

Der systemische Ansatz zur Betrachtung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg bietet methodische Instrumente, um über unmittelbare Probleme hinweg die darunterliegenden Muster zu analysieren und mögliche Hebelpunkte zu identifizieren. Es ist wichtig zu verstehen, wie in einem sich kontinuierlich weiter verändernden System gelernt werden kann. Konkret wurden in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg folgende Methoden genutzt:

- Planung von passenden Formaten (Arbeitstreffen, Workshops, Interviews), um das Wissen der Fachpersonen situativ einzusetzen
- Kommunikation der gemeinsamen Zielsetzung, des Arbeitsmodus und der Nutzung der eingesetzten Arbeitsinstrumente
- Visuelles Arbeiten (in diesem Falle im digitalen Whiteboard), um das Wissen sichtbar, konkret, diskutierbar, anschlussfähig und veränderbar sukzessive zu erschließen

Zentral für die systemische Betrachtung ist der Ansatz des Wirkgefüges, das die Abhängigkeiten zwischen den Beteiligten grafisch anschaulich darstellt. Um die vielen komplexen Beziehungen in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg zu verstehen, wurden über 50 Beteiligte aus Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik digital kartiert. Dazu wurden in Expertenrunden Teilbereiche der Karte erarbeitet, die als Ganzes von allen teilnehmenden Stakeholdern der Energieflexiblen Modellregion Augsburg ergänzt und validiert wurde. Dabei entstand eine visuelle Darstellung der Beteiligten und der Prozesse sowie deren Verbindungen untereinander in den Teilbereichen »Politische Rahmenbedingungen«, »Verteilung« und »Regionaler Energiemarkt«. Darüber hinaus wurde die digitale Ebene der Energiesynchronisationsplattform mit ihrer Integration im Industrieunternehmen im Teilbereich »Energieflexible Fabrik« dargestellt.

Durch die gemeinsame Arbeit der Projektbeteiligten in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg ergeben sich konkrete Mehrwerte. Diese umfassen folgende Aspekte:

- Förderung des transdisziplinären Wissensaustauschs zwischen den Beteiligten und Integration unterschiedlicher Perspektiven

- Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses über die Energieflexible Modellregion Augsburg sowie der digitalen Lösungen der Energiesynchronisationsplattform
- Identifikation der Wechselwirkungen zwischen den Beteiligten und den Prozessen sowie der Hebelpunkte zur Optimierung des Systems
- Entwicklung von politischen Handlungsoptionen basierend auf Wirkungspotenzialen aus den zuvor gewonnenen systemischen Erkenntnissen

Durch die visuelle Arbeit konnte implizites Wissen sichtbar und mit der vertieften Beschreibung von den Teilsystemen auch die systemischen, komplexen Zusammenhänge offengelegt werden. Im Rahmen dieses kollektiven Lernprozesses entstand nicht nur ein gemeinsames Verständnis für die Energieflexible Modellregion Augsburg, sondern auch ein Artefakt, das die Kommunikation im Projekt und darüber hinaus trotz der komplexen Thematik einfach und verständlich macht.

Auch zukünftig werden Herausforderungen einen immer höheren Grad an Komplexität mit sich bringen, der nur mit übergreifenden und kooperativen Instrumenten bearbeitet und bewältigt werden kann. Der hier vorgestellte Ansatz – die transdisziplinäre Entwicklung der Systemkarte zur Energielandschaft in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg – wurde positiv validiert und birgt große Potenziale für die weitere Zusammenarbeit und ein Gelingen der Energieflexibilitätsbefähigung.

3 Befähigung von energieflexiblen Fabriken in der Region Augsburg

Autoren: Blöchl · Buhl · Dietz · Fouquet · Häckel · Hieronymus · Jordan · Koch · Köberlein · Kohler · Mayer · Michaelis · Roth · Roth · Scharmer · Schilp · Schimmelpfennig · Schott · Schulz · Vernim · Weißflog · Winter · Zäh

Zur Anwendung und prototypischen Erprobung regionaler Energiesynchronisation mit energieflexiblen Fabriken wurde das in *Kapitel 3.1* beschriebene Vorgehen entwickelt und auf unterschiedliche Themenfelder (*Kapitel 3.2*) und industrielle Anwendungsfälle (*Kapitel 3.3*) adaptiert. Jeder der Anwendungsfälle stützt sich dabei auf ein oder mehrere beispielhafte Industrieunternehmen energieintensiver und nicht-energieintensiver Branchen.

3.1 Beschreibung des angewandten Vorgehens in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Die Arbeit innerhalb der Energieflexiblen Modellregion Augsburg zielt auf ein integratives Vorgehen ab, bei dem die regionalen Akteure im Fokus der Lösungsentwicklung stehen. So soll auch der zuletzt besonders in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) rückläufigen Akzeptanz der Energiewende entgegengewirkt werden (Hüwels, Bolay und Schorpp, 2021). Der Stakeholder-Dialog im Herbst 2018 hat gezeigt, dass den gesellschaftlichen Akteuren besonders die Erprobung und Bewertung von Marktmodellen und die Energieflexibilitätsbefähigungen in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wichtige Anliegen sind. Deshalb wurde die in *Abbildung 3* dargestellte flexible und iterative Lösungsmethodik auf die energieflexiblen Fabriken in der Region Augsburg angewendet: Dabei

wurden zunächst für die in der ersten Projektphase identifizierten Stakeholder attraktive Themenfelder bestimmt. Anhand dieser konnten mögliche Anwendungsfälle und Sollprozesse energieflexibler Fabriken definiert werden, die schließlich in einem konzeptionellen Testbetrieb mit Unternehmen der Modellregion evaluiert wurden.

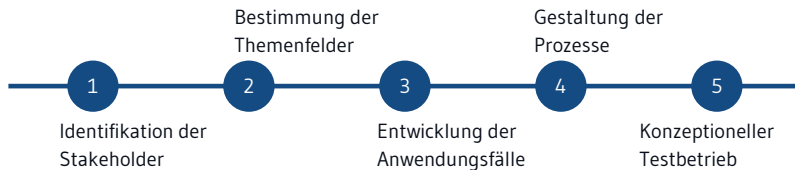


Abb. 3 Vorgehen zur Anwendung von energieflexiblen Fabriken in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Im Folgenden werden die Schritte des Vorgehens weiter ausgeführt.

- Schritt 1: Identifikation der Stakeholder (Rückblick):** In Anlehnung an Averbek-Lietz und Meyen (2016) wurde eine Fallstudienmethode durchgeführt, um im regionalen Kontext die Herausforderungen an das Energiesystem und die notwendigen Anforderungen an eine erfolgreiche IKT-Plattform zu verstehen. Dazu wurden die relevanten Stakeholder im Kontext des regionalen Markts durch eine literaturbasierte Stakeholder-Analyse identifiziert. Anschließend wurden mit den identifizierten Akteuren Stakeholder-Dialoge und Workshops durchgeführt, um die Herausforderungen der verschiedenen Stakeholder in Bezug auf die Vermarktung von Energieflexibilität zu identifizieren.

Die Arbeiten in Sauer et al. (2019) haben gezeigt, dass die Umsetzung von industrieller Energieflexibilität ganzheitlich betrachtet werden muss und nur dann erfolgreich sein kann, wenn regionale Aspekte sowie gesellschaftliche Fragestellungen berücksichtigt werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden die nächsten Schritte so gestaltet, dass die zuvor identifizierten Stakeholder stärker in den Weiterentwicklungsprozess der regionalen Vermarktung industrieller Energieflexibilität integriert wurden. Infolgedessen wurde das Ziel verfolgt, weitere Potenziale der Energieflexibilitätsbefähigung zu identifizieren, Unternehmensplattformen zur regionalen Nutzung von Energieflexibilität zu entwickeln und sowohl energieflexiblen Fabriken als auch energiewirtschaftlichen Akteuren als Flexibilitätsnachfragenden einen Zugang zu einer Marktplattform zu geben. Dazu wurden, wie in *Kapitel 2.3.2* erläutert, transdisziplinäre Betrachtungen der fabrikinternen und regionalen Prozesse notwendig, um entsprechend dem beschriebenen Vorgehen alle betroffenen Stakeholder einzubeziehen.
- Schritt 2: Bestimmung der Themenfelder:** Auf der Grundlage der identifizierten Stakeholder und Herausforderungen wurden im zweiten Schritt konkrete Themenfelder definiert (*Kapitel 3.2*). Diese Themenfelder bündeln verschiedene Herausforderungen in Bezug auf regionale Energiesysteme und umfassen Themen wie Netz vs. Markt, die Regulatorik, die betriebliche Organisation, die Sektorenkopplung und die spezifischen Herausforderungen der Energie-

flexibilität in nicht-energieintensiven Unternehmen. Mit der Entwicklung von Themenfeldern wurden die zentralen Herausforderungen der regionalen Akteure dargestellt. Somit wurde eine Basis für die zielgerichtete Entwicklung weiterer Energieflexibilitätsmaßnahmen etabliert.

- **Schritt 3: Entwicklung der Anwendungsfälle:** Basierend auf den definierten Themenfeldern wurden im nächsten Schritt für die zentralen Herausforderungen repräsentative Anwendungsfälle entwickelt (*Kapitel 3.3*). Durch die Entwicklung von Anwendungsfällen war es möglich, die Vielfalt der Interessen der verschiedenen Akteure in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg abzubilden. Dazu wurden semistrukturierte Interviews mit verschiedenen Akteuren sowie Modellierungen der Ist-Prozesse durchgeführt. Parallel dazu wurde ein Testvorgehen vorbereitet und dessen Anwendbarkeit auf den konzeptionellen Testbetrieb in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg geprüft.
- **Schritt 4: Gestaltung der Prozesse:** Die entwickelten Anwendungsfälle und Prozessmodelle wurden im nächsten Schritt verwendet, um Soll-Prozesse zu definieren und so die notwendigen Handlungsbedarfe für eine erfolgreiche Umsetzung der Flexibilitätsvermarktung auf regionaler Ebene abzuleiten.
- **Schritt 5: Konzeptioneller Testbetrieb:** Das Ziel des konzeptionellen Testbetriebs ist es zu zeigen, dass verbrauchsseitige Energieflexibilität unter Einbezug aller relevanten Stakeholder auch regional umsetzbar ist (*Kapitel 3.4*). Dabei wurden Potenziale zur Weiterentwicklung und Verbesserung des Systems auf regulatorischer, organisatorischer und technischer Ebene identifiziert und auf ihre Übertragbarkeit und Skalierbarkeit untersucht. Im konzeptionellen Testbetrieb wurde die Energiesynchronisationsplattform bei den Unternehmen der Modellregion auf ihre Anwendbarkeit geprüft, indem mehreren industriellen Anwendern und dem Verteilnetzbetreiber der Zugang zur Energiesynchronisationsplattform ermöglicht wurde.

3.2 Themenfelder der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Wie in *Kapitel 3.1* beschrieben, basiert das Vorgehen zur Befähigung von energieflexiblen Fabriken in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg auf einem integrativen Ansatz. Ein zentraler Aspekt dieses Ansatzes ist die Bestimmung von Themenfeldern (*Schritt 2, Abbildung 3*), die für die Stakeholder relevant sind. Die Themenfelder sind sehr heterogen und reichen vom Bereich des Stromnetzes bis hin zum Bereich des innerbetrieblichen Umfelds. Im Folgenden wird auf die in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg definierten aktuellen Themenfelder genauer eingegangen und im Anschluss das zukünftige Themenfeld »Vermarktung zwischen Unternehmen« beschrieben.

3.2.1 Aktuelle Themenfelder

Netz vs. Markt

Das Themenfeld »Netz vs. Markt« zeigt eine mögliche Konfliktsituation zwischen einerseits netz- bzw. systemdienlichem und andererseits marktdienlichem Verbrauchsverhalten auf. Die verfügbare Energieflexibilität der Industrie kann, angereizt durch niedrige Preise auf den Energy-Only-Märkten, marktdienlich eingesetzt werden. Darüber hinaus bietet sich für Unternehmen die Möglichkeit, ihre

Flexibilität im Sinne des Netzbetreibers netzdienlich oder systemdienlich mithilfe präqualifizierter Prozesse einzusetzen. Ein netz- oder systemdienlicher Einsatz von Energieflexibilität kann dabei im unmittelbaren Konflikt zu einem marktdienlichen Einsatz von Energieflexibilität stehen. Das Themenfeld adressiert diesen Konflikt am Beispiel eines energieintensiven Unternehmens, das mit elektrischer Eigenerzeugung und Großverbrauchern am Day-Ahead- und am Intraday-Markt handelt. Die Leistungsänderungen durch die Reaktion auf Marktsignale können eine Belastung für das Verteilnetz darstellen, die bis zu lokalen Netzengpässen führen kann, denen der Verteilnetzbetreiber entgegenwirken muss.

Regulatorik

Durch das Themenfeld »Regulatorik« werden die regulatorischen Rahmenbedingungen eines energieflexiblen Unternehmens für den konzeptionellen Testbetrieb im Hinblick auf seine Lieferantenbeziehungen und seinen Netzanschlussvertrag abgebildet. Eine Fabrik muss eine Vielzahl an regulatorischen Rahmenbedingungen beachten, z. B. die Jahreshöchstlast oder eine atypische Netznutzung. Dies kann die energieflexible Fabrik bei netz- und systemdienlichen Maßnahmen einschränken, da die statischen Rahmenbedingungen bei Abweichungen zu Kosten für die Energieflexible Fabrik führen können (*Kapitel A.1*). Die Untersuchung des Themenfelds hat das Ziel, mögliche Preissignale von Netzbetreibern und Lieferanten zu erproben und die Restriktionen für die Reaktion daraufhin zu analysieren. In einem folgenden Schritt können Ansätze zur Umgestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen untersucht werden.

Sektorenkopplung

Durch das Wachstum und die Weiterentwicklung der Elektromobilität werden immer größere Anteile von Fahrzeugflotten elektrifiziert. Insbesondere für Industrieunternehmen mit großen Fahrzeugflotten bedeutet der Umstieg auf Elektrofahrzeuge auch eine weitere Stromnachfrage – zusätzlich zu ihrem bereits hohen Energiebedarf. Das Flottenmanagement besteht dabei aus unterschiedlichen Fahrzeugkategorien diverser Nutzergruppen (Unternehmensfuhrpark, Dienstwagen zur privaten Nutzung, Fahrzeuge von Mitarbeitenden, Flurförderfahrzeuge etc.). Die Vielzahl an Fahrzeugen bietet aber auch die Möglichkeit, die zeitliche Flexibilität im Ladevorgang zu nutzen und diese energetisch in die Produktionsprozesse einzubinden. Im Themenfeld »Sektorenkopplung« wird daher geprüft, inwieweit die bekannten Erkenntnisse aus Sauer et al. (2019) auf vorhandene Potenziale sowie das erarbeitete Vorgehen zur Energieflexibilitätsbefähigung und -bewertung auf das unternehmerische Flottenmanagement von Elektrofahrzeugen übertragen werden können.

Betriebliche Organisation

Energieflexibilitätsmaßnahmen der Industrie können sich auf die Belegschaft auswirken. Ein anschauliches Beispiel hierzu stellt die Anpassung des Schichtmodells in Abhängigkeit der prognostizierten verfügbaren Strommenge und Preissituation dar. Im Themenfeld »Betriebliche Organisation« werden daher Fragestellungen der Kommunikation und Folgenabschätzungen für die Belegschaft bearbeitet. Weiterhin sind die benötigten Daten relevante Untersuchungsgegenstände für die Termin- und Kapazitätsplanung sowie für die Kommunikationsverbindung zwischen Maschinen und Anlagen als auch für ein übergeordnetes Enterprise-Ressource-Planning-(ERP-) oder Manufacturing-Execution-System (MES).

Nicht-energieintensive Unternehmen

Um dem Anspruch einer ganzheitlichen Umsetzung der Modellregion gerecht zu werden, werden verstärkt nicht-energieintensive Unternehmen sowie KMU betrachtet und im konzeptionellen Testbetrieb berücksichtigt. Dabei liegt die Herausforderung darin, geeignete Schnittstellen zu energie-wirtschaftlichen Stakeholdern zu identifizieren und mit der Energiesynchronisationsplattform zu ermöglichen, dass das Energieflexibilitätspotenzial auch für diese Unternehmen wirtschaftlich nutzbar sowie system-, netz- und/oder marktdienlich ist. Zur Umsetzung dieser Ziele wurden KMU identifiziert und kontaktiert, die an einer Analyse hinsichtlich des Energieflexibilitätspotenzials interessiert sind. Parallel zur Sammlung der Unternehmen wurde ein standardisiertes Vorgehen entwickelt, mit dem Energieflexibilitätspotenziale speziell in KMU identifiziert werden können. Nach dieser Transparenz-schaffung wurden mögliche unternehmensspezifische Energieflexibilitätsmaßnahmen abgeleitet und Handlungsempfehlungen formuliert, die zusammen mit den Mitarbeitenden der Unternehmen diskutiert und auf Umsetzung geprüft wurden.

3.2.2 Perspektivisches Themenfeld: Vermarktung von Energieflexibilität zwischen Unternehmen

Im Rahmen dieses perspektivischen Themenfeldes ist auch die Weiterentwicklung von Services der Energiesynchronisationsplattform erwähnenswert. Es handelt sich demnach um eine konzeptionelle Vermarktung von Energieflexibilität zwischen Unternehmen. Eine solche Möglichkeit könnte vor allem für Unternehmen interessant sein, welche beispielsweise über ein gemeinsames Energienetz versorgt werden, wie es in Industriequartieren (*Kapitel 3.3.2*) häufig der Fall ist.

Energieintensive Unternehmen verfügen über vielfältige Möglichkeiten zur Flexibilitätsvermarktung, beispielsweise durch das Anbieten von Systemdienstleistungen. Durch die begrenzte Kapazität des Verteilnetzes können diese teilweise eingeschränkt werden, sodass nicht das vollständige Energieflexibilitätspotenzial des Unternehmens ausgeschöpft werden kann. Damit entgehen dem Unternehmen Möglichkeiten zur Kompensation der Investitionen in Maßnahmen, die zur Energieflexibilitätsbefähigung der Produktion ergriffen wurden. Zugleich entgehen dem elektrischen Energieversorgungssystem die erforderlichen anpassbaren Verbrauchslasten bei der Integration von erneuerbaren Energien.

Weil mehrere Unternehmen durch einen Netzabschnitt versorgt werden und die jeweils zulässige Verbrauchslast mit Sicherheitsaufschlägen durch den Netzbetreiber begrenzt wird, ist es möglich, dass in bestimmten Zeitfenstern das Anbieten von Systemdienstleistungen eingeschränkt wird, obwohl im Verteilnetz Kapazität verfügbar wäre. *Abbildung 4* zeigt diese statische Betrachtung von verfügbaren Netzkapazitäten und der zugewiesenen Kapazität des Netzes im oberen Teil des Bildes.

Die konkreten Verbräuche der Unternehmen sind zeitlich nicht detailliert aufgelöst. Über die Unternehmensplattformen können die betroffenen Unternehmen auf der Marktplattform Flexibilitätsinsetrate einstellen, die vorrangig von Netzbetreibern, Lieferanten oder Bilanzkreisverantwortlichen bezogen werden (*Kapitel 2*). Mit voranschreitender Erzeugung durch fluktuierende Erzeugungsanlagen und der damit verbundenen Dynamik des Netzbetriebs ist die Einbindung der verfügbaren

verbrauchsseitigen Energieflexibilität von großer Bedeutung. Es bietet sich daher ein Themenfeld, in dem ein Unternehmen die Nutzung der verfügbaren Netzkapazität in bestimmten Zeitfenstern erhöht; in der gleichen Zeit wird jedoch ein Flexibilitätsinserat von anderen Unternehmen bezogen. Beide Unternehmen sind in diesem Fall im gleichen Netzgebiet verortet. So kann das Unternehmen, das als Käufer der Flexibilität auftritt, die Netzkapazität für Systemdienstleistungen erweitern, indem es ungenutzte Netzkapazität über die Marktplattform erwirbt. Das Unternehmen, das als Verkäufer auftritt, kann wiederum Erlöse erzielen, indem nicht benötigte Kapazität an benachbarte Unternehmen veräußert wird. Die Energiesynchronisationsplattform bietet in diesen Vorgängen strukturierte und automatisierte Informationsflüsse sowie eine nachvollziehbare Dokumentation. Die Services »Prognosedienste für Märkte und Netze« sowie »Lokaler Flexibilitätshandel« können Unternehmen bei der Allokation der Netzkapazitäten unterstützen, indem sie Prognosedienstleistungen bereitstellen bzw. Energieflexibilitätsmaßnahmen inserieren und vermarkten.

Weiterhin sind regionale Vermarktungsmechanismen zur Abbildung der jeweiligen Geschäftsmodelle zu entwickeln und die Skalierbarkeit des Ansatzes zu überprüfen, indem seine Relevanz in verschiedenen Netzgebieten mit abweichenden Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen betrachtet wird.

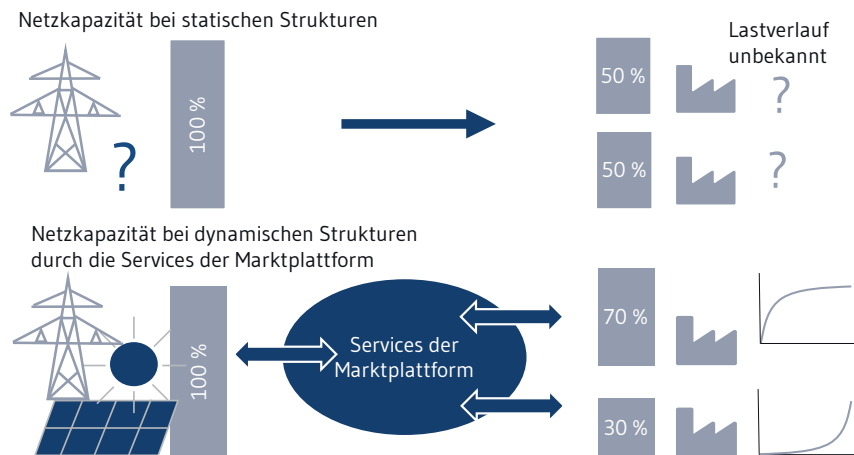


Abb. 4 Vermarktung von Flexibilität zwischen zwei Industrieunternehmen als schematische Darstellungen; Status quo mit statischen, gedeckelten Netzkapazitäten (oben) und Nutzung der Energiesynchronisationsplattform zur erweiterten und dynamischen Nutzung verfügbarer Netzkapazität (unten)

3.3 Anwendungsfälle in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Ausgehend von den beschriebenen Themenfeldern wurden fünf Anwendungsfälle betrachtet, für die geeignete Prozesse zur lokalen Flexibilitätsvermarktung erarbeitet und eingeführt wurden (Schritt 3 und 4, *Abbildung 3*). Im Folgenden werden die Anwendungsfälle beschrieben.

3.3.1 Energieflexibilität in der Spezialpapierherstellung

Das weltweit tätige Familienunternehmen Felix Schoeller Group entwickelt und produziert Spezialpapiere. Am Standort Günzach fertigt das Tochterunternehmen Schoeller Technocell auf drei komplementären Produktionslinien Dekorpapier für die Holzverarbeitende Industrie sowie Tapetenvlies. Zur Bereitstellung des im Prozess notwendigen Dampfes für die Trocknung sowie eines Teils des benötigten elektrischen Stroms stehen am Standort eine Gasturbine mit Abhitzeessel sowie ein weiterer Dampfkessel zur Verfügung.

Zur Abschätzung des technischen Potenzials der Spezialpapierherstellung wurde das Vorgehen nach VDI-Richtlinie 5207 (5207:2020) angewendet. Hierzu wurde die notwendige Transparenz auf Werks-ebene durch eine Auswertung von Energie- und Produktionsdaten geschaffen und vielversprechende Bereiche zur Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen identifiziert. Zu den Bereichen mit den höchsten Potenzialen zählten die »energieorientierte Produktionsplanung«, die »Energieflexibilitätsbefähigung der Vorprozesse« und die »energieflexible Fahrweise der Strom- und Dampferzeugung«. Diese Bereiche werden im Folgenden näher ausgeführt.

Die hohe Variantenvielfalt und die kleinen Losgrößen in der Spezialpapierherstellung, welche mit einer sortenabhängigen Leistungsaufnahme einhergehen, ermöglichen Energieflexibilität durch eine energieorientierte Produktionsplanung. Dies bietet Freiheitsgrade für eine Anpassung des Werkslastgangs an Marktsignale, ohne Produktionsziele maßgeblich zu beeinflussen. Durch die Verknüpfung von Energie- und Produktionsdaten wurden für jede Papiervariante Leistungsniveaus gebildet, die von der Durchflussrate für die Mahlstraße und den durchschnittlichen Leistungsniveaus der übrigen Prozessschritte abhängen. Darüber hinaus wurde in Form einer Sortentauschmatrix identifiziert, für welche Sorten eine Anpassung der Reihenfolge ohne erhöhtes Ausschussrisiko möglich ist.

Die (geringe) zeitliche Entkopplung der Vorprozesse im Pulper sowie der Mahlstraße von der kontinuierlichen Produktion in den Papiermaschinen durch Stoffspeicher ermöglicht darüber hinaus die Energieflexibilitätsbefähigung der Vorprozesse. Aufgrund der deutlich höheren bezogenen Leistung der Mahlstraße im Vergleich zu den übrigen Aggregaten wurde der Fokus der weiteren Analyse auf die Energieflexibilitätsmaßnahme »Unterbrechung des Mahlprozesses« gelegt. Mit dieser Maßnahme sind auch kurzfristige Unterbrechungen zur Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse bei entsprechenden finanziellen Anreizen und geringem Ausschussrisiko denkbar.

Der Dampf- und Strombedarf des Unternehmens kann sowohl über eine Gasturbine, die in Kombination mit einem Abhitzeessel Wärme und elektrischen Strom erzeugt, als auch über einen gasbetriebenen Dampfkessel in Kombination mit Netzbezug gedeckt werden. Dies ermöglicht eine energieflexible Fahrweise der vorhandenen Strom- und Dampferzeuger. Bei einem Überangebot an erneuerbaren Energien im Netz kann die Gasturbine heruntergefahren werden, der zusätzliche Dampfbedarf über den Dampfkessel gedeckt und Strom aus dem Netz bezogen werden.

Aufgrund des deutlich höheren Energieflexibilitätspotenzials der Strom- und der Dampferzeugung im Vergleich zu den prozessnahen Maßnahmen, der Möglichkeit zur vollständigen Automatisierung von Energieflexibilitätsvermarktung und -abruf und der grundsätzlich im Betrieb unbegrenzten Abrufdauer in diesem Anwendungsfall wurde die Gasturbine mit ihrer Energieflexibilität zur Anbindung an die Unternehmensplattform ausgewählt (*Kapitel 3.4*)

Die Unternehmensplattform ist als Cloud-Service implementiert. Bei dem Unternehmen sind zwei Open Platform Communications Server (OPC-Server) vorgelagert aufgesetzt worden, welche die Produktions- und Energiedaten erfassen, um daraus Energieflexibilitätspotenziale abzuleiten (*Abbildung 5*). Das Unternehmen greift über eine REST-Schnittstelle auf die Unternehmensplattform zu. Über diese Schnittstelle werden Signale wie die aktuelle und die theoretische Last der Gasturbine, Informationen über die Betriebsbereitschaft der Anlagen sowie Grenzwerte an die Unternehmensplattform gesendet. Auf der Plattform werden aus diesen Werten konkrete Flexibilitätsräume abgeleitet und im Energieflexibilitätsdatenmodell abgebildet. Hieraus werden Angebote für den lokalen Flexibilitätsmarkt abgeleitet und dort inseriert. Bei Abruf einer Energieflexibilität werden auf der Unternehmensplattform die aus der vermarkteten Energieflexibilität resultierende Last-Sollwertvorgabe und die Abrufzeit der Maßnahme über die REST-Schnittstelle an das firmeninterne Netzwerk zurückgespielt. Die Regelung und Steuerung der Anlagen erfolgen über das bestehende Leitsystem.

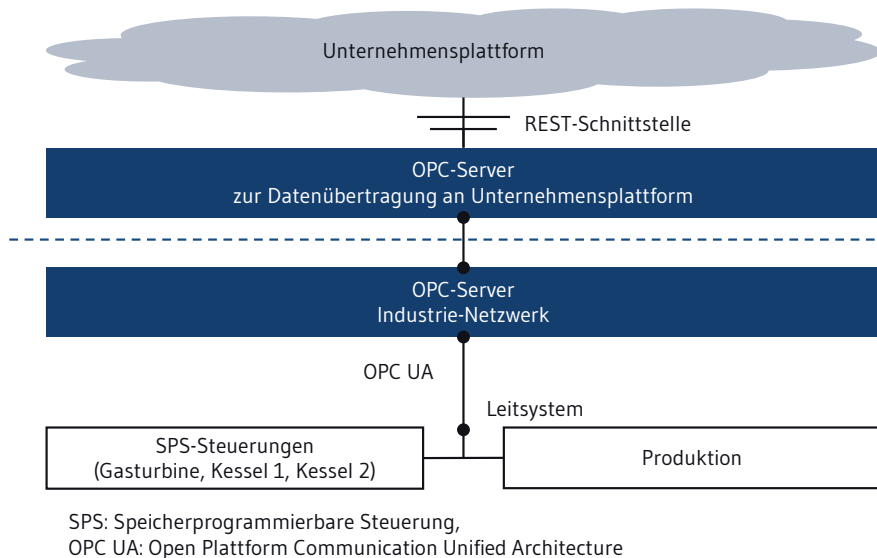


Abb. 5 Komponenten der IT-Infrastruktur bei Schoeller Technocell

Obwohl der Fokus auf der Energieflexibilität der Erzeugungsanlagen am Standort lag, konnte durch Simulationsexperimente gezeigt werden, dass in der Spezialpapierherstellung durch eine energieorientierte Planung sowie den energieflexiblen Betrieb der Mahlstraße Energieflexibilität bereitgestellt werden kann, ohne dass hierdurch Produktionsziele gefährdet werden. Bei entsprechenden finanziellen Anreizen kann dieses Potenzial gehoben werden. Jedoch sind hierzu weiterführende Untersuchungen insbesondere zur Bewertung und Minimierung des Ausschussrisikos vorzunehmen.

3.3.2 Energieflexibilität im Gewerbeverbund

Die Alois-Müller-Gruppe ist als mittelständisches Unternehmen mit über 600 Mitarbeitenden an zwölf Standorten Spezialist für Energie- und Gebäudetechnik (Heizung, Lüftung, Sanitär, Kälte, Elektro) sowie für den industriellen Anlagenbau. Der vorgestellte Anwendungsfall wurde in Zusammenarbeit mit dem Werk in Ungerhausen, der »Green Factory«, erarbeitet. Hier produziert das Unternehmen mobile Energiezentralen in Containerbauweise sowie Energiemodulsysteme und versorgungstechnische Komponenten des Anlagenbaus wie Rohrleitungssysteme aus Stahl und Edelstahl. Das Werk deckt als »Green Factory« bereits einen Großteil des Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) aus regenerativer Eigenerzeugung und versorgt darüber hinaus benachbarte Unternehmen im Gewerbeverbund mit Wärme. Der Anwendungsfall umfasst daher das werksübergreifende und automatisierte Management und die externe Vermarktung von Energieflexibilität des Gewerbeverbunds nicht-energieintensiver Unternehmen.

Zunächst wurden im Rahmen eines Energieflexibilitätsaudits (*Kapitel A.2*) die Energiedaten aller Verbraucher, Speicher und Erzeuger innerhalb des Werks sowie Wärmeflüsse zu den angebotenen Unternehmen analysiert. In der Feinanalyse wurden 27 technische Systeme charakterisiert. Anhand der Größen »Steuerbarkeit«, »Prozesskontinuität« und »Abhängigkeit zu anderen Prozessen« wurde die Eignung für den energieflexiblen Betrieb bewertet. Für die Entwicklung des Anwendungsfalls wurden nur die Maßnahmen mit einem hohen Potenzial (hohe Leistung und gute Eignung) berücksichtigt und innerhalb eines Energieflexibilitätsdatenmodells erfasst. Die ausgewählten energieflexiblen Systeme sind in *Abbildung 6* vereinfacht innerhalb des Strom- und Wärmenetzes von Alois Müller inklusive angeschlossener Unternehmen im Gewerbeverbund dargestellt.

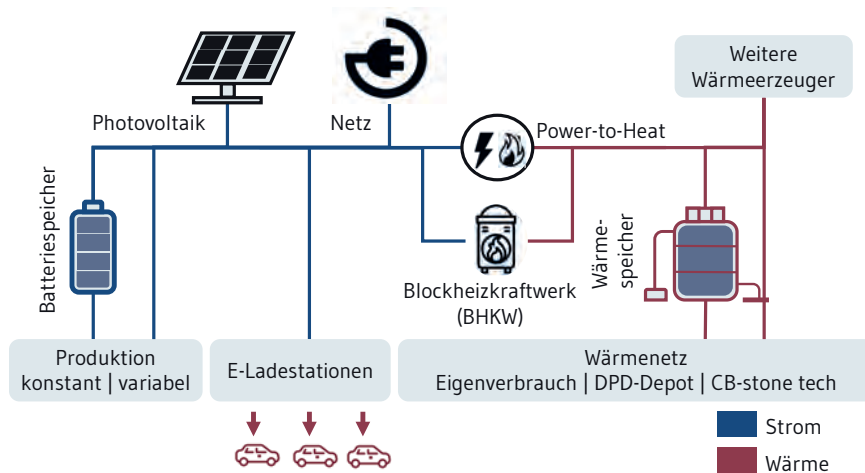


Abb. 6 Energieflexible Systeme im Strom- und Wärmenetz bei Alois Müller inkl. der angeschlossenen Unternehmen im Gewerbeverbund

Überschüssiger Strom aus Eigenerzeugung (abzüglich des Werksverbrauchs) wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist, in der Batterie gespeichert oder zum Laden der Elektroautos verwendet. Es besteht eine Kopplung zwischen Strom- und Wärmenetz durch Wärme- und/oder Stromerzeugung aus Power-to-Heat-Anlagen und dem Blockheizkraftwerk (BHKW). Das Wärmenetz weist weitere Wärmeerzeuger (Pelletöfen und Gaskessel) sowie einen Wärmespeicher auf, aus welchem angeschlossene Verbraucher im Gewerbeverbund versorgt werden. Abhängig vom Wärmeverbrauch des Gewerbeverbunds und der Kapazität des Wärmespeichers sind der Betrieb und die Wärmeerzeugung von BHKW und Power-to-Heat-Anlagen begrenzt, weshalb eine Beeinflussung des Stromnetzes durch die angeschlossenen Unternehmen vorliegt. Unter Berücksichtigung der PV-Erzeugung sowie des Verbrauchs innerhalb des Gewerbeverbunds sind folgende Energieflexibilitätsmaßnahmen der Systeme möglich:

- Energiebezug anpassen über die Power-to-Heat-Anlage oder das BHKW
- Energie speichern im Batteriespeicher und im Wärmepuffer
- Prozess der Elektro-Ladestationen unterbrechen

Als Anwendungsfall wird das externe Anbieten (Inserieren auf dem lokalen Flexibilitätsmarkt) dieser Energieflexibilitäten sowohl am Tag vor der Leistungserbringung (Vortag) als auch des laufenden Tages betrachtet. Dabei stellen die Wechselwirkungen innerhalb des Strom- und Wärmenetzes sowie die Komplexität derselben eine besondere Herausforderung dar.

Das Werk in Ungerhausen verfügt über ein umfangreiches Energie- und Lastmanagement, in welchem die technisch flexiblen Systeme regel- und steuerbar eingebunden sind. Das Lastmanagement ist auf Lastspitzenreduktion ausgelegt. Eine darüber hinausgehende Nutzung der bestehenden Flexibilitäten zur Vermarktung ist nicht implementiert. Im Rahmen der Befähigung wurde daher ein Steuerungs- und Regelungskonzept entwickelt, welches die Bereitstellung der Flexibilität innerhalb des bestehenden Lastmanagements mit geregelter Lastspitze ermöglicht. Dabei berechnet das Konzept – basierend auf prognostizierten und aktuellen Werten des Verbrauchs im Gewerbeverbund und der PV-Stromerzeugung – einen Flexibilitätskorridor, der die maximal mögliche Leistungsänderung durch Energieflexibilitätsmaßnahmen begrenzt und die Lastspitze berücksichtigt. Innerhalb des Korridors werden die jeweils möglichen Energieflexibilitätsmaßnahmen berechnet und geplant. Das Konzept basiert auf analytischen Modellen, die eine energetische Berechnung der einzelnen Systeme sowie der aktuellen Energieflexibilitätsmaßnahmen ermöglichen. Beispielsweise wird anhand aktueller Sensordaten zur Temperaturverteilung des Wärmespeichers dessen aktueller Ladezustand ermittelt und die mögliche zuführbare Wärmeenergie aus einem flexiblen BHKW oder einer Power-to-Heat-Anlage als Energieflexibilitätsmaßnahme berechnet. Dabei werden als Randbedingungen neben der PV-Erzeugung und dem Verbrauch innerhalb des Gewerbeverbunds die Minimal- und Maximaltemperaturen des Zu- und Ablaufs berücksichtigt. Der Prozess zur Inserierung von Flexibilitäten ist in *Abbildung 7* dargestellt.

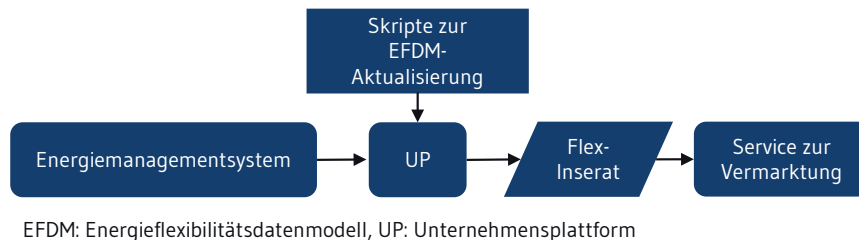


Abb. 7 Prozess der Inserierung von Flexibilitäten durch die Unternehmensplattform (UP) bei Alois Müller

In der Umsetzung ist die Unternehmensplattform als Cloud-Service bei einem externen Dienstleister implementiert und greift von dort direkt auf die Berechnungsmodelle zur Flexibilitätsberechnung und Inserierung zurück. Über einen FTP-Server werden Daten aus dem Energiemanagement an die Unternehmensplattform gesendet, welche die Energieflexibilitätspotenziale berechnet und auf dem lokalen Flexibilitätsmarkt inseriert. Die Regelung und Steuerung der Anlagen erfolgt somit vollständig über das bestehende Energiemanagement des Unternehmens. Bei Abruf einer Flexibilität am regionalen Markt wird das eingehende Signal von der Unternehmensplattform an das Energiemanagementsystem weitergeleitet.

3.3.3 Energieflexibilität beim Management von elektrischen Fahrzeugen

Die Zielsetzung der Arbeit der Ingenieurgesellschaft Steinbacher-Consult besteht in der Erforschung des intelligenten, energetischen Flottenmanagements. Das Unternehmen nutzt bereits die Flexibilitäten der firmeneigenen Fahrzeugflotte und testet dabei, inwieweit diese vermarktungsfähig sind. Das energetische Flottenmanagement umfasst die Steuerung der Ladevorgänge der elektrischen Fahrzeuge eines (Industrie-) Unternehmens. Neben Elektroautos fallen auch Transportfahrzeuge wie elektrische Flurförderfahrzeuge sowie Lastenräder unter den Fahrzeugbegriff. Die Ziele der Steuerung umfassen im konkreten Anwendungsfall die Möglichkeit zur Behebung bzw. Vermeidung lokaler Netzengpässe, eine strompreisorientierte Lastverteilung und die Vermarktung der entstehenden Flexibilität durch einen Aggregator. Dieser Anwendungsfall lässt sich auf weitere Industrieunternehmen übertragen, womit die industrielle Energieflexibilität um die Komponente des energetischen Flottenmanagements angereichert werden kann. Somit ergibt sich mit zunehmender Elektrifizierung von Fahrzeugflotten ein steigendes Potenzial für industrielle Energieflexibilitäten. Die Fahrzeuge einer Flotte können je nach Höhe des Potenzials zur Flexibilitätserbringung in verschiedene Gruppen eingeordnet werden (*Abbildung 8*). Da die Fahrzeugflotte und die Dienstfahrzeuge das höchste Potenzial aufweisen, wurde die Befähigung dieser beiden Gruppen detaillierter betrachtet.

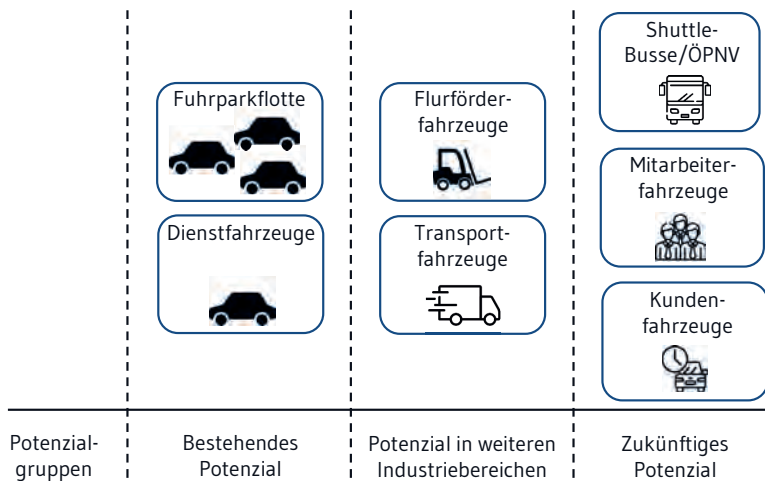


Abb. 8 Nutzergruppen der elektrischen Fahrzeuge, eingeteilt in Potenzialgruppen

Zur Energieflexibilitätsbefähigung der Ladevorgänge elektrischer Fahrzeuge wurde ein IT-System entwickelt. Dieses besteht aus der Ladesäule, einer App zur Abfrage von Nutzerdaten und der Steuereinheit der Ladeinfrastruktur (*Abbildung 9*). Die Steuereinheit wurde an die Unternehmensplattform angebunden. Nach dem Ankoppeln eines Fahrzeugs an einen Ladepunkt wird auf der Basis des Ladezustands der Fahrzeugbatterie, der Batteriekapazität sowie der Nutzerpräferenzen – gewünschter

Abfahrtszeitpunkt, Wunschladezustand bei Abfahrt, Bereitschaft zur Energieflexibilitätsbefähigung des Ladevorgangs – die verfügbare Flexibilität ermittelt. Dies erfolgt mithilfe des Energieflexibilitätsdatenmodells, sodass die verfügbare Flexibilität als Flexibilitätsraum auf der Unternehmensplattform beschrieben werden kann. Auf Basis dieses Flexibilitätsraums können Flexibilitätsangebote nach Vorgaben des lokalen Flexibilitätshandels in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg erstellt werden (Kapitel A.2). Das Flexibilitätsinserat der Fahrzeugflotte wird anschließend über eine IKT-Schnittstelle auf dem lokalen Flexibilitätsmarkt inseriert. Dieser Prozess – vom Ankoppeln des Fahrzeugs bis zur Platzierung des Flexibilitätsinserats – wird automatisch durch das entwickelte IT-System geleistet.

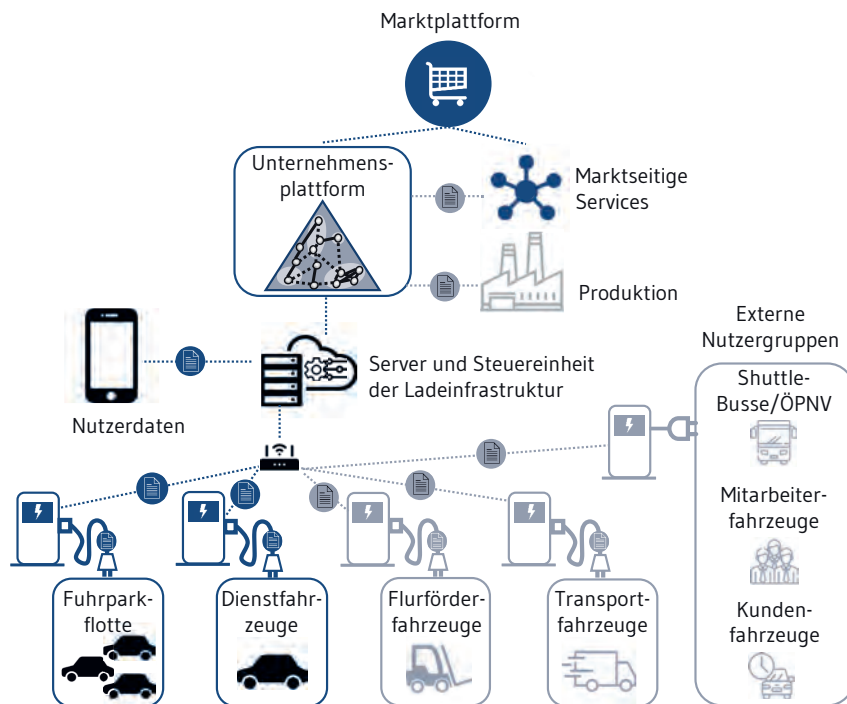


Abb. 9 Komponenten der IT-Infrastruktur bei Steinbacher-Consult

Perspektivisch können durch Aggregation auch größere und damit auf weiteren Flexibilitätsmärkten handelbare Energieflexibilitätsmaßnahmen vieler einzelner Flexibilitäten realisiert werden. Durch beispielsweise den über die Marktplattform vermittelten Aggregator-Service können diese Maßnahmen dann auch auf den etablierten Strommärkten vermarktet werden. Das dynamische und feingranular einstellbare Leistungsprofil der Energieflexibilitätsmaßnahmen aus den steuerbaren Ladevorgängen legt eine Vermarktung am Intraday-Markt oder an den Regelenenergimärkten nahe.

In der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wird derzeit die Vermarktung auf einem lokalen Flexibilitätsmarkt konzeptionell getestet. Die Flexibilität des energetischen Flottenmanagements stellt eine sinnvolle und wertvolle Ergänzung zur Industrieflexibilität dar, die den Handlungsspielraum komplementär ergänzt und erweitert. Zu beachten ist jedoch, dass die vorgegebenen, im vorherigen Absatz genannten Parameter stets zu berücksichtigen sind (beispielsweise die geplante Abfahrtszeit eines Fahrzeugs).

3.3.4 Energieflexibilität bei einem Landmaschinenhersteller

Das Landtechnikunternehmen ACGO-Fendt gehört zu den weltweit größten Herstellern von Landmaschinen. Die hier vorgestellten Anwendungsfälle basieren auf einer Kooperation mit dem Werk in Asbach-Bäumenheim, welches auf die Herstellung von Fahrkabinen und Karosserie-Anbauteilen spezialisiert ist. Der Standort kann als nicht-energieintensives Unternehmen eingestuft werden.

Für die Analyse der Energiedaten des Produktionswerks wurde ein Top-Down-Ansatz gewählt, bei welchem, ausgehend vom Energieverbrauch des Gesamtwerks, die Verbräuche pro Werkshalle und anschließend auf Maschinenebene ermittelt wurden. Nach Abwägung der technischen Potenzialabschätzung und der notwendigen Investitionen wurden zwei Anwendungsfälle mit einem hohen zu realisierenden Potenzial identifiziert, die im Folgenden vorgestellt werden: Zunächst wird die Energieflexibilitätsbefähigung der Lüftungsanlagen im Bereich des Kabinenrohbaus beschrieben, bevor näher auf die Energieflexibilitätsbefähigung des Ladeprozesses von Sekundärbatterien von Flurförderfahrzeugen eingegangen wird.

Im Prozess des Kabinenrohbaus entstehen durch Schweißvorgänge Rauchgasemissionen, die über Lüftungsanlagen auf die Zielwerte des Unternehmens reduziert werden. Die Luftqualität der beiden Schweißlinien steht im direkten Zusammenhang mit den Zu- und Abluftströmen der Lüftungsanlagen, welche wiederum in direktem Zusammenhang mit der elektrischen Leistungsaufnahme stehen. Über eine bedarfsgerechte Steuerung hinaus kann durch die bestehende Überkapazität der Lüftungsanlagen der Zu- bzw. Abluftstrom energieorientiert angepasst und die Leistung der Anlagen vor dem Eintreten eines prognostizierten Strompreispeaks bis zum Optimum der Luftqualität maximiert werden (*Abbildung 10*). Während des eigentlichen Strompreispeaks können die Lüftungsanlagen dann bis zum definierten Grenzwert im Regelbetrieb betrieben werden. Ein ähnliches Szenario kann zur Ausnutzung von negativen Strompreisen verwendet werden.

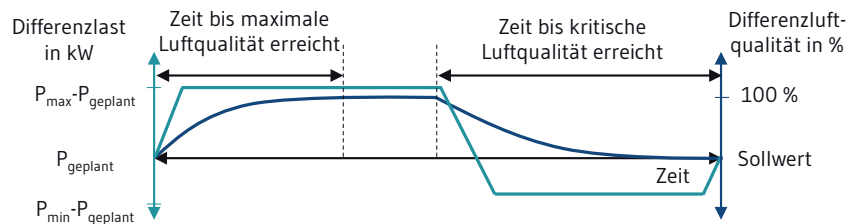


Abb. 10 Verhalten der Luftqualität in Abhängigkeit des Betriebs der Lüftungsanlage (schematische Darstellung)

Neben dem flexiblen Betrieb der Lüftungsanlagen wird beim energieflexiblen Lademanagement der Sekundärbatterien von Flurförderfahrzeugen eine große Anzahl kleinerer Verbraucher integriert. Flurförderfahrzeuge müssen antizyklisch zu den Produktionsprozessen geladen werden, um eine ausnahmslose Bedienung der intralogistischen Bedarfe zu gewährleisten. Aus diesem Grund muss neben der maximal möglichen Ladeleistung die maximal mögliche Dauer der Lastverschiebung ermittelt werden. Zwei Faktoren begrenzen die maximal mögliche Dauer einer Lastverschiebung: Zum einen wird sie durch den freien Ladezeitraum der Flurförderfahrzeuge beschränkt, zum anderen ist die Lastverschiebung durch den zu speichernden Energiegehalt bei konstanter Leistung limitiert.

Durch Anpassung der Prozessparameter, z. B. einer Verzögerung des Ladestarts, eines kurzzeitigen Unterbrechens des Ladevorgangs oder eines Ladens bei reduzierter Leistung, kann die Dauer der Lastverschiebung zur Energieflexibilitätsbefähigung des Energiebedarfs genutzt werden. Darüber hinaus kann über den Vehicle-to-Factory-Ansatz eine bidirektionale Ladelösung geschaffen werden, bei der die Traktionsbatterie sowohl Energie aufnehmen als auch abgeben kann. Zur Steuerung der Ladeprozesse ist es weiterhin notwendig, den aktuellen State-of-Charge (SOC) ermitteln zu können und eine bidirektionale Kommunikation mit der Unternehmensplattform zu gewährleisten. Die beiden beschriebenen Anwendungsfälle werden durch deren IKT-Anbindung zur Energieflexibilität befähigt (Abbildung 11), um über den lokalen Flexibilitätshandel vor allem im Bereich des Netzengpassmanagements des Verteilnetzbetreibers nutzbar zu sein. Den Kern der Kommunikationsarchitektur bildet die im Werk Asbach-Bäumenheim vorhandene Gebäudeleittechnik. Die Lüftungssteuerung wurde so angepasst, dass sie aktuelle Kennzahlen über die Luftqualität und die Lüftungsleistung bereitstellt und sich über diese Kennzahlen steuern lässt. Hierbei wird sichergestellt, dass der Luftqualitätsgrenzwert nicht unterschritten wird. Da die Lüftungssteuerung und die Gebäudeleittechnik keine kompatiblen Schnittstellen aufweisen, wird die Kommunikation durch ein zwischengeschaltetes Gateway ermöglicht.

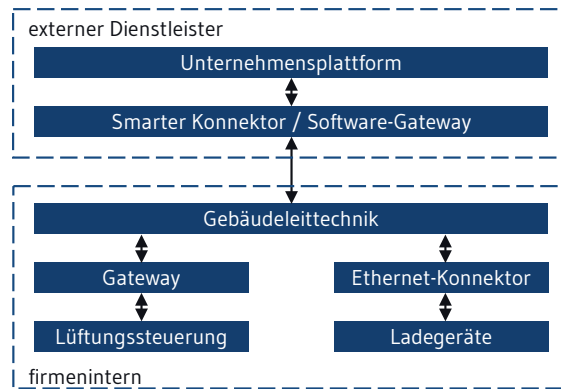


Abb. 11 Informations- und kommunikationstechnische Anbindung der Anwendungsfälle bei einem Landmaschinenhersteller

Die gesammelten Informationen werden über eine Schnittstelle zwischen der Gebäudeleittechnik und der Unternehmensplattform ausgetauscht. Diese ist als Cloud-Service bei einem externen Dienstleister implementiert. Durch die Aggregation in der Gebäudeleittechnik wird (unabhängig von der Anzahl der angebundenen Steuerungen) nur eine Schnittstelle mit der Unternehmensplattform benötigt.

3.3.5 Einbezug von kleinen und mittleren Unternehmen in die Betrachtung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

KMU sind neben der energieintensiven Industrie ein wesentlicher Bestandteil in der Unternehmenslandschaft der Energieflexiblen Modellregion Augsburg. Deshalb werden in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg auch die Anforderungen der KMU mit einem vergleichsweise geringen Energiebedarf aufgenommen und analysiert, um auch auf sie zugeschnittene Lösungskonzepte erarbeiten zu können und damit eine Möglichkeit der Partizipation an der Energiewende zu geben. Insgesamt wurden zehn Unternehmen aus den Bereichen Maschinenbau, Kunststoffbearbeitung, Elektronik-Fertigung und Futtermittelherstellung mit meist zwischen 50 und 200 Mitarbeitenden betrachtet. *Abbildung 12* zeigt das Vorgehen bei der Analyse des technischen und wirtschaftlichen Potenzials bei der Energieflexibilitätsbefähigung des Energieverbrauchs in KMU. Die Gegebenheiten und Rahmenbedingungen der teilnehmenden KMU wurden über einen Fragebogen sowie semi-strukturierte Interviews erfasst. Die Ergebnisse wurden zum einen aggregiert und anonymisiert analysiert. Zum anderen wurden sie separat aufbereitet, um den Unternehmen individuelle Handlungsempfehlungen und einen Benchmark hinsichtlich energiewirtschaftlicher Kennzahlen zur Verfügung zu stellen.

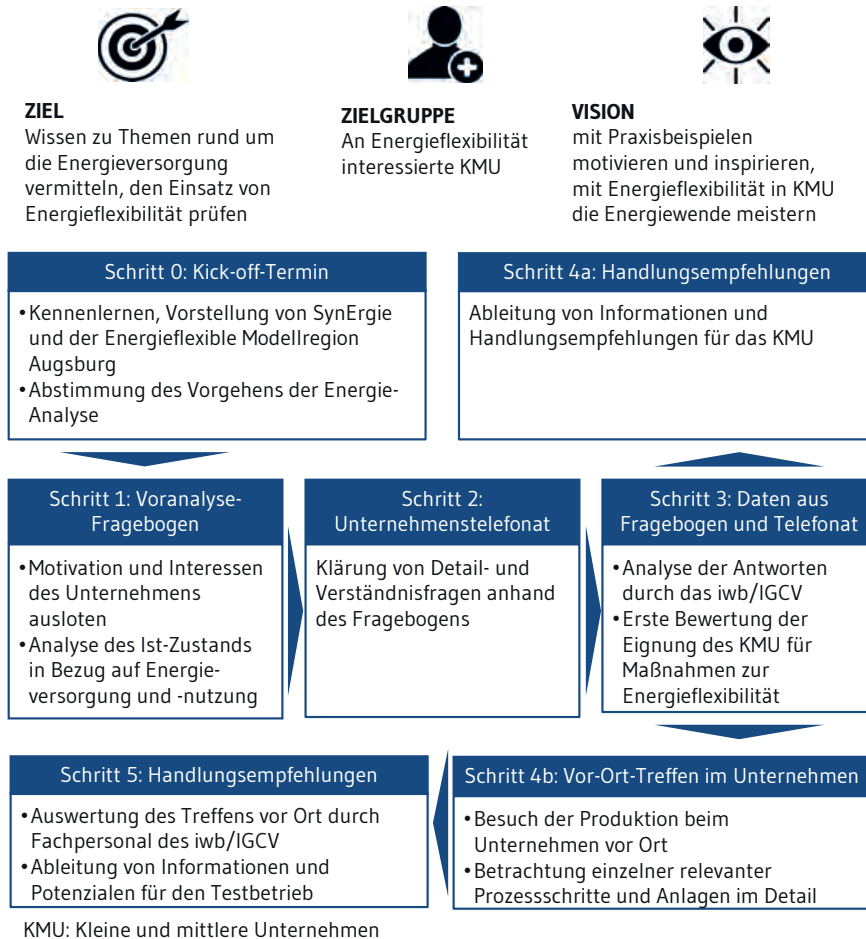
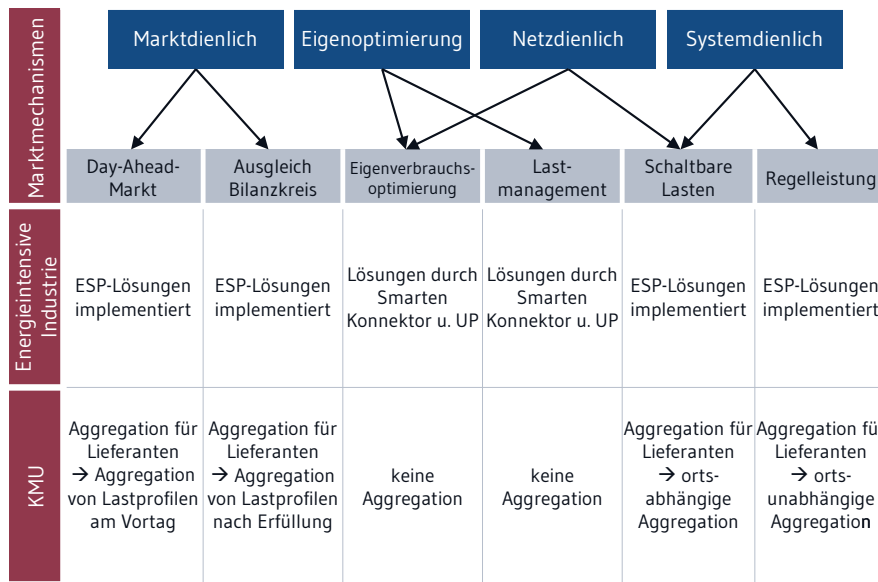


Abb. 12 Vorgehen zur Analyse der Energieflexibilitätpotenziale von KMU in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Zusammenfassend hat die durchgeführte Untersuchung folgende Erkenntnisse geliefert:

- Die untersuchten KMU weisen eine große Heterogenität hinsichtlich der Branchenzugehörigkeit und folglich hinsichtlich der Produktionsprozesse auf.
- Der Strombedarf liegt zwischen 0,2 MWh/a und 4,4 MWh/a. Die Spitzenlasten liegen zwischen 70 kW und 1 MW.
- Überwiegend herrschte ein geringer Automatisierungsgrad vor. ERP oder MES werden nur teilweise eingesetzt.
- Die untersuchten Unternehmen zeigen überwiegend eine geringe Energiedatentransparenz.
- Erneuerbare Eigenerzeugung ist bereits verbreitet.
- Energiedatenmanagementsysteme sind in einer Vielzahl der Unternehmen zur Effizienzverbesserung im Einsatz.
- Der Energiekostenanteil bezogen auf den jährlichen Umsatz liegt bei der untersuchten Unternehmensgruppe zwischen 0,1 Prozent und 6,2 Prozent.

Abbildung 13 zeigt zukünftige Vermarktungsoptionen für Energieflexibilitätspotenziale von KMU auf. Die Herausforderungen zur Integration der Energieflexibilitätspotenziale liegen darin, dass diese eine vergleichsweise kleine Größenordnung aufweisen und dezentral im oder über mehrere Unternehmen hinweg verteilt vorliegen. Der Aufwand zur Implementierung einer unternehmensindividuellen Instanz der Unternehmensplattform ist daher vor dem wirtschaftlichen Nutzen abzuwägen. Die vorliegenden Energieflexibilitätspotenziale können allerdings in aggregierter Form zur Vermarktung und als Systemdienstleistung angeboten werden, z. B. mithilfe des Service zur Aggregation und Disaggregation von Energieflexibilität (Service der Unternehmensplattform) oder des Service Aggregator-Flexibilitätshandel (Service der Marktplattform).



KMU: Kleine und mittlere Unternehmen, ESP: Energiesynchronisationsplattform, UP: Unternehmensplattform

Abb. 13 Perspektivische Vermarktungsoptionen für Energieflexibilitätpotenziale in KMU

3.4 Konzeptioneller Testbetrieb der Anwendungsfälle

Um in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg die Anwendbarkeit der entwickelten IKT-Lösungen (Kapitel 2.2) und identifizierten Anwendungsfälle (Kapitel 3.3) ganzheitlich zu evaluieren, wurde ein konzeptioneller Testbetrieb durchgeführt (Abbildung 3, Schritt 5). In diesem Rahmen wurde die durchgängige Kommunikationsfähigkeit zwischen einem Flexibilitätsanbieter und einem Flexibilitätsnachfrager über den lokalen Flexibilitätshandel getestet.

Für den konzeptionellen Testbetrieb wurde der Anwendungsfall des systemdienlichen Verbraucherverhaltens einer regionalen energieflexiblen Fabrik im Zusammenspiel mit einem Verteilnetzbetreiber durchgeführt (roter Fall, Abbildung 14). Im vorliegenden konzeptionell durchgeführten Anwendungsfall kann Energieflexibilität durch das Zuschalten eines elektrisch betriebenen Dampfkessels kurzfristig angeboten werden, sodass der Verteilnetzbetreiber im Überlastfall keinen Lastabwurf durchführen muss. Eine genauere Beschreibung des Anwendungsfalls ist in Kapitel 3.3.1 beschrieben.

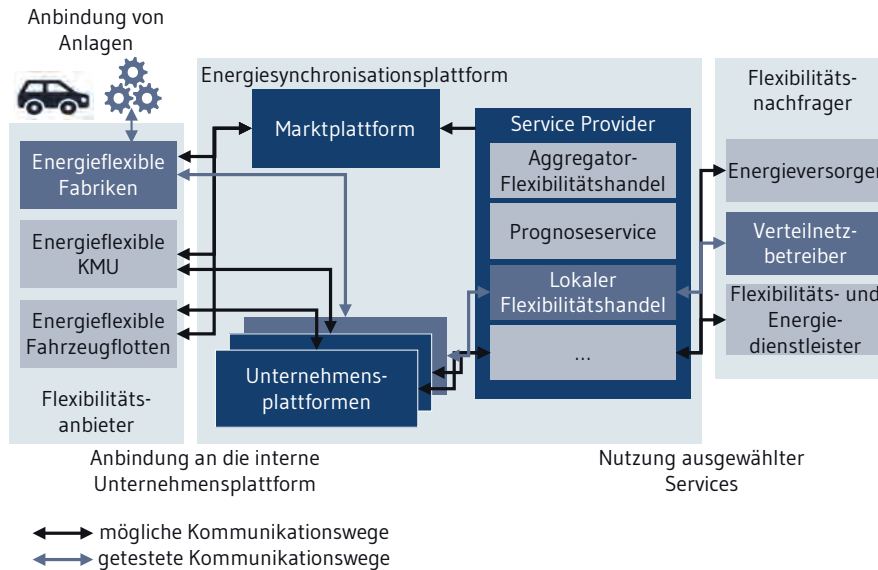


Abb. 14 Akteure und Ablauf des konzeptionellen Testbetriebs in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Folgende Erkenntnisse konnten durch den konzeptionellen Testbetrieb gewonnen werden:

- Eine individuelle Visualisierung des Testfalls, wie sie in *Abbildung 14* dargestellt ist, unterstützt die Nutzer der Energiesynchronisationsplattform bei der Entwicklung eines Gesamtverständnisses für die Plattformlösung.
- Es ist eine durchgehende Kommunikation von Anlagenebene bis hin zum Verteilnetzbetreiber möglich.
- Die Plattformlösung wird als zusätzliches Tool zur Bereitstellung und Buchung von Energieflexibilität gesehen. Eine Automatisierung des Prozesses steht im Vordergrund.
- Die Energiesynchronisationsplattform könnte den Handlungsspielraum des Verteilnetzbetreibers vergrößern, da Energieflexibilität einfach und kurzfristig beschafft werden könnte.
- Zusätzliche Informationen wie beispielsweise eine geografische Einordnung der verfügbaren Flexibilität sowie Schnittstellen zu Redispatch 2.0 sollten in der Plattform ergänzt werden.

4 Weiterentwicklung und Übertragung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Autoren: Ebinger · Jetter · Krings · Ober · Reichmuth · Roon · Veitengruber · Wuntke · Zachmann

Die erarbeiteten Erkenntnisse aus den Anwendungsfällen in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wurden hinsichtlich ihrer Energieflexibilitätspotenziale, ihrer Übertragbarkeit und ihrer Weiterentwicklungsmöglichkeiten geprüft. Die Energieflexibilitätspotenziale der Industriepartner in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg werden in *Kapitel 4.1* hinsichtlich ihrer Leistung und ihres CO₂-Vermeidungspotenzials bewertet. Die technische Perspektive (*Kapitel 4.2*) beleuchtet hierbei die für die Energieflexibilitätsbefähigung relevanten energetischen Charakteristika der Energieflexiblen Modellregion Augsburg sowie weiterer Typregionen in Deutschland. Im Rahmen von Untersuchungen zur gesellschaftlichen Perspektive (*Kapitel 4.3*) wurden unter anderem die für die Erkenntnisübertragung relevanten Schlüsselakteure identifiziert.

4.1 Energieflexibilitätspotenzial und CO₂-Einsparung

Für die Industriepartner der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wurde erstmals im Rahmen des Projektes deren Energieflexibilitätspotenzial bestimmt. Bei einer Abrufdauer von 15 Minuten liegt im Fall einer Lasterhöhung eine flexibilisierbare Leistung von ca. 38 MW vor, im Fall des Lastverzichts ca. 37 MW.

Die industriellen Energieflexibilitätsmaßnahmen leisten damit nicht nur einen systemischen Beitrag zum Erfolg der Energiewende, sondern können zusätzlich durch eine Verschiebung von Arbeit aus Zeiträumen hoher spezifischer Emissionen in Zeiträume niedriger spezifischer Emissionen auch einen direkten Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten (Emissionsausstoß, gemessen in CO₂-Äquivalenten, wird nachfolgend vereinfacht als CO₂ bezeichnet). Zur Abschätzung der CO₂-Vermeidung wird dabei auf Basis einer unterjährigen Zeitreihe spezifischer CO₂-Emissionen der Stromerzeugung die mögliche CO₂-Vermeidung für jede Viertelstunde ermittelt und unter Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen auf einen jährlichen CO₂-Vermeidungswert aggregiert (*Kapitel A.2*). Folglich resultiert für das ermittelte Energieflexibilitätspotenzial der Energieflexiblen Modellregion Augsburg ein jährliches CO₂-Vermeidungspotenzial von über 8.000 Tonnen CO₂. Dies entspricht dem durchschnittlichen CO₂-Ausstoß von ca. 1.000 Einwohnern der Stadt Augsburg (Stadt Augsburg, 2020).

4.2 Technische Übertragbarkeit auf weitere Regionen

In der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wird eine Plattform zur ganzheitlichen Betrachtung der Potenziale, Auswirkungen, Chancen und Hemmnisse von energieflexiblen Fabriken erprobt. Es stellt sich die Frage, inwieweit sich Erkenntnisse aus der Energieflexiblen Modellregion Augsburg auch auf andere Regionen Deutschlands übertragen lassen. Die Voraussetzung dafür ist die Identifikation von Regionen, die sich für die Übertragbarkeit eignen. Damit wäre ein Grundstein gelegt, um die dringend benötigte Flexibilität in erheblichem Umfang zu erschließen.

Aus technischer Perspektive sind für die Übertragbarkeit insbesondere Regionen relevant, die eine ähnliche Stromerzeugungs- und Verbrauchsstruktur wie die Energieflexible Modellregion Augsburg aufweisen und somit vor gleichen oder ähnlichen Herausforderungen bei der Integration von erneuerbaren Energien und industrieller Flexibilität stehen. Durch einen gezielten Vergleich der Stromerzeugungs- und Verbrauchsstruktur jener mit der Energieflexiblen Modellregion Augsburg, auch mit Blick auf die Residuallast (entspricht dem Verbrauch abzüglich der volatilen Erzeugung aus erneuerbaren Energien zu jedem Zeitpunkt), wurden relevante Regionen identifiziert (dunkelblaue Regionen, *Abbildung 15*).

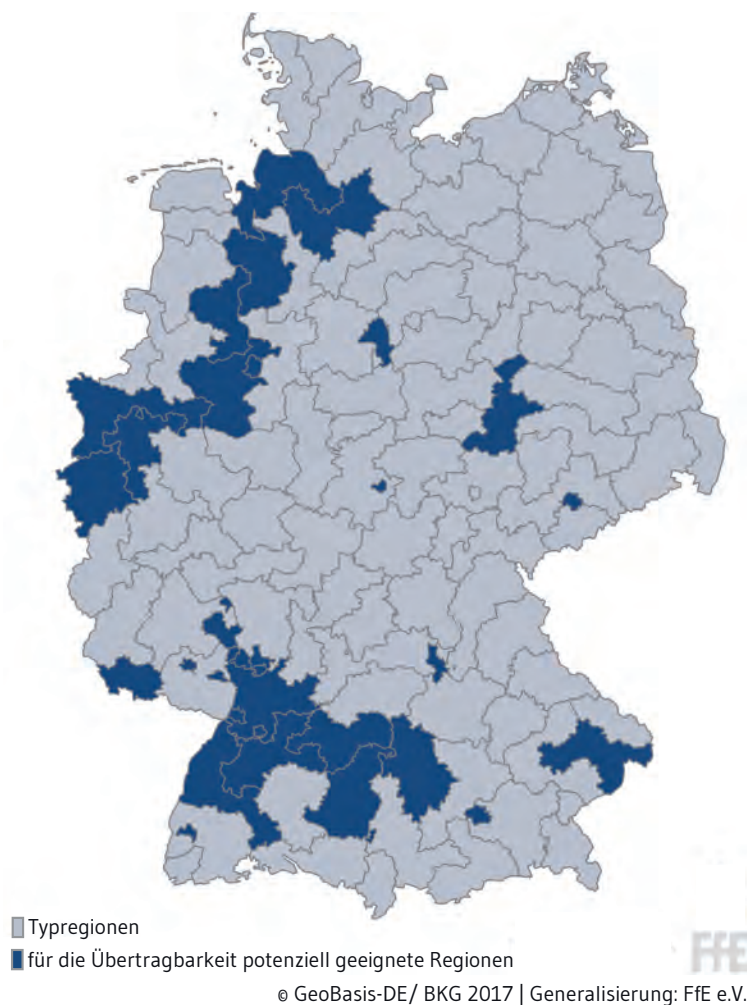


Abb. 15 Potenziell geeignete Regionen für die Übertragbarkeit

Die identifizierten Regionen sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- In den Regionen gibt es große Schwankungen in der Stromerzeugung. Grund dafür ist die umfangreiche Versorgung mit erneuerbaren Energien.
- Die Regionen weisen eine vergleichsweise hohe Stromnachfrage aus der Industrie auf.
- Weil die Versorgung mit erneuerbaren Energien unregelmäßig, aber die Stromnachfrage eher konstant ist bzw. phasenverschoben schwankt, fluktuiert auch die Menge an Energie, die entweder zur Deckung der Stromnachfrage aus nicht erneuerbaren Quellen eingespeist oder in andere Regionen transportiert werden muss (hohe Schwankungen der Residuallast).

Diese Eigenschaften sind deutlich in den zugrunde liegenden Erzeugungs- und Verbrauchsprofilen dieser Regionen zu erkennen. In *Abbildung 16* sind diese für die Energieflexible Modellregion Augsburg und eine Region in Niedersachsen exemplarisch dargestellt für den Zeitraum einer Sommerwoche.

Hierbei weisen beide Regionen eine relativ hohe Stromnachfrage in der Industrie sowie eine hohe Stromerzeugung durch erneuerbare Energien auf. Die daraus resultierenden Schwankungen der Residuallast treten in der Region in Niedersachsen gegenüber der Energieflexiblen Modellregion Augsburg aufgrund der hohen Stromerzeugung durch Windkraft stärker und unplanmäßiger auf, wohingegen die Schwankungen in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg aufgrund der volatilen Stromerzeugung durch überwiegend PV in den Nachtstunden wegfallen. In beiden Fällen kann Energieflexibilität auf der Nachfrageseite dazu beitragen, Schwankungen der Residuallast auszugleichen und somit die volatilen erneuerbaren Energien besser in das Stromsystem zu integrieren.

Das »Regionalisierte Energiesystemmodell der FfE« bildet die Datenbasis sowohl für diese Untersuchung als auch für die vorausgegangenen Analysen (Corradini et al., 2017). Diese beinhaltet u. a. regional und zeitlich aufgelöst die Stromerzeugung und den Stromverbrauch nach Energieträgern und Wirtschaftszweigen (Gotzens et al., 2021; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2020b; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2020a).

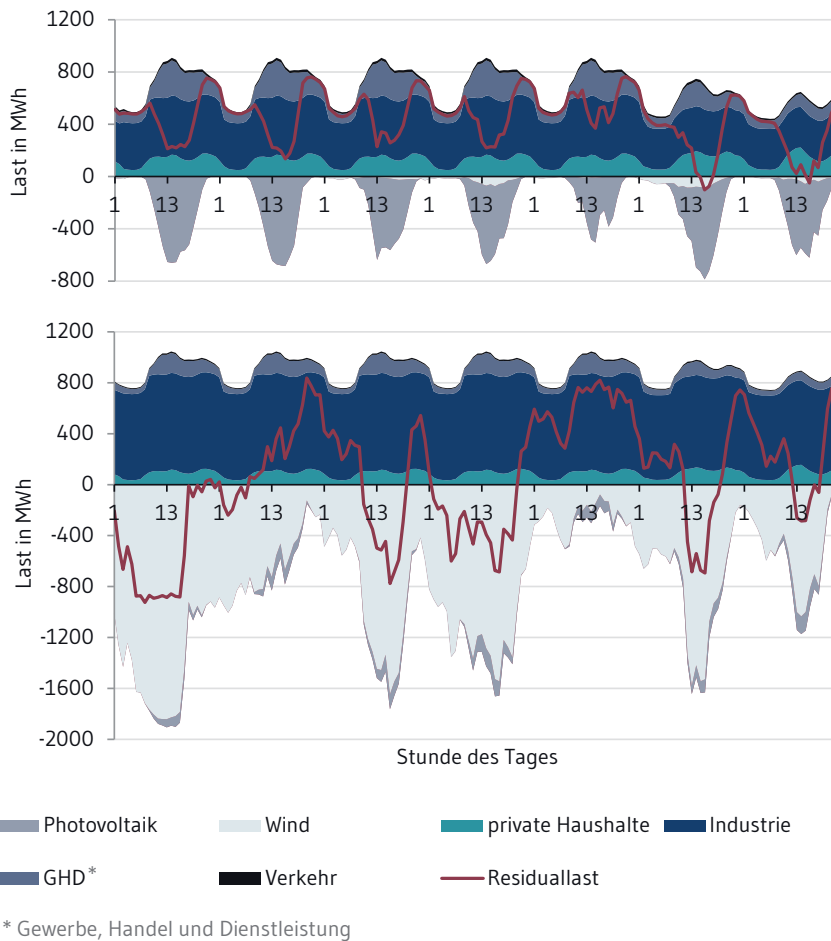


Abb. 16 Stromverbrauch und volatile Stromerzeugung in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg (oben) und in einer Region in Niedersachsen (unten) während einer Sommerwoche

Die Regionen, die hinsichtlich ihrer techno-ökonomischen Aspekte für eine Übertragung geeignet sind, machen deutlich weniger als 20 Prozent der Fläche der Bundesrepublik Deutschland aus. Aber: In diesen Regionen leben rund 38 Prozent der Bevölkerung, auf die ca. 44 Prozent des Gesamtstromverbrauchs und rund 50 Prozent des industriellen Stromverbrauchs (Abbildung 17) entfallen.

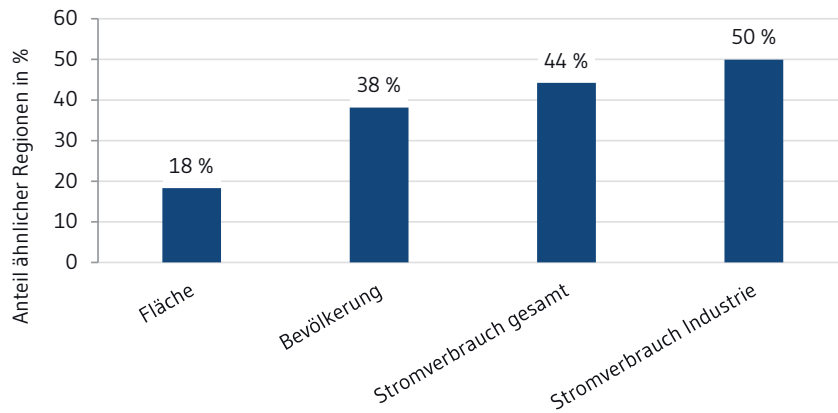


Abb. 17 Anteil relevanter Regionen nach verschiedenen Kriterien

Basierend auf diesen Ergebnissen weist die Energieflexible Modellregion Augsburg aus technischer Perspektive geeignete Rahmenbedingungen für die Übertragung von praxisnahen Erkenntnissen hinsichtlich des Einsatzes von Energieflexibilität auf andere Regionen Deutschlands auf.

4.3 Gesellschaftliche Perspektive zur erfolgreichen Weiterentwicklung

Die Transformationsprozesse im Rahmen der Energiewende sind höchst komplex und bergen dabei die Herausforderung, individuelles sowie kollektives und öffentliches Handeln ganzheitlich auszurichten. Die Transformation kann nur gelingen, wenn die gesellschaftlichen Akteure nicht nur informiert werden, sondern die Transformation von vornherein mitgestalten können. Besonders mit Blick auf die Weiterentwicklung und eine mögliche Übertragung der Modellregion auf (eine) weitere Region(en) ist die Einbindung der gesellschaftlichen Akteure von großer Relevanz (*Kapitel 4.1* und *Kapitel 4.2*). Wie in *Kapitel 2.3.2* beschrieben, wurden Methoden und Instrumente der vorgestellten systemischen Betrachtung adaptiert, um die Energieflexible Modellregion Augsburg weiterzuentwickeln und gesellschaftlich relevante Kriterien für eine erfolgreiche Übertragung zu identifizieren. Mithilfe der erarbeiteten Systemkarte wird die Expertise der verschiedenen Akteure der Modellregion transdisziplinär integriert und nutzbar macht. Dabei können kritische Stakeholder, die Multiplikatoren und die geografische Vielfalt als Kriterien für eine erfolgreiche Weiterentwicklung identifiziert werden.

Die sogenannten kritischen Stakeholder sind die Schlüsselpersonen, die für eine Weiterentwicklung in Richtung Energieflexibilität besonders wichtig und daher unverzichtbar sind. Für den Transfer von technologischen Erkenntnissen in andere Regionen spielen diese kritischen Stakeholder eine zentrale Rolle, insbesondere auf politischer Entscheidungsebene. Eine der wichtigsten Voraussetzungen hierfür wird es sein, dass die regulatorischen Rahmenbedingungen (*Kapitel A.1*) angepasst werden und so Energieflexibilität insgesamt attraktiver und wirtschaftlicher gestaltet werden kann. Auf die

Nachbesserung der regulatorischen Rahmenbedingungen und die dafür notwendigen Schlüsselbeteiligten soll in diesem Abschnitt nicht weiter eingegangen werden. Für die Weiterentwicklung sowie den Transfer sind neben politischen Stakeholdern weitere kritische Stakeholder relevant. Diese werden im Folgenden genauer vorgestellt.

- **Unternehmen & Change Agents:** Für die Weiterentwicklung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg sowie für eine Übertragung ist die Zusage und das Engagement relevanter Unternehmen unabdingbar. In den Unternehmen selbst spielen die Geschäftsführung und die Personen, die für die Energieversorgung zuständig sind, als Schlüsselakteure der Transformation eine besondere Rolle. Zum einen muss im Unternehmen ein Bewusstsein für die Dringlichkeit einer Transformation vorhanden sein, zum anderen müssen die Unternehmen Zeit, Ressourcen und Geld zur Verfügung stellen, um den Wandel konsequent voranzutreiben. Wenn diese Voraussetzungen gegeben sind, verändert sich das Unternehmen aus eigenem Antrieb. Für die interne Transformation ist eine geplante und geführte Organisations- und Unternehmensentwicklung notwendig, um alle Potenziale zu heben. Diese Entwicklung sollte vom Unternehmen nicht nur geduldet, sondern aktiv unterstützt werden, beispielsweise durch die nötigen Ressourcen und das Einbinden entscheidungsrelevanter Personen. Für die Überzeugungsarbeit im Unternehmen sind sogenannte Change Agents erforderlich. Das sind Personen, die im Unternehmen genügend Einfluss haben und so gut vernetzt sind, dass sie eine kritische Masse an Verantwortlichen erreichen und überzeugen können. Die Umsetzung im Unternehmen erfolgt anhand klar formulierter und ambitionierter Ziele für die Transformation. Für die Weiterentwicklung in der Modellregion sind diese Unternehmen ein entscheidender Baustein, um die gesamtgesellschaftliche Transformation zu ermöglichen. Eine gute Zusammenarbeit zwischen den Forschenden (mit ihrem technischen Wissen) und den Change Agents im Unternehmen (mit ihrem Transformationswissen) ist unabdingbar. Die Begleitung des internen Transformationsprozesses im Unternehmen ist notwendig, um alle Potenziale und Handlungsräume effizient zu nutzen.
- **Personen aus der Forschung, der Koordination und der Prozessbegleitung:** Wissenschaftliche Institutionen begleiten und koordinieren die Prozesse zwischen allen Beteiligten sowie die interne Transformation in den Unternehmen; das betrifft sowohl technische als auch organisatorische Veränderungen. Voraussetzung ist, dass die Forschenden technisches Wissen sowie Prozess- und Transformationswissen besitzen. Es sollte sich also um ein Netzwerk von Forschenden verschiedener Fachrichtungen handeln, wie es in der Modellregion Augsburg der Fall ist. Eine Modellregion aufzusetzen ist eine komplexe Aufgabe, die sehr unterschiedliche Wissensformen erfordert. Gefragt sind Systemwissen, Wissen über Prozessmanagement, Expertise in der transdisziplinären Projekt-Governance und im Projektmanagement sowie die Fähigkeit, Menschen für eine neue Idee zu begeistern. Erfahrungsgemäß funktioniert dieses Zusammenspiel am besten in bestehenden Forschungsverbänden und -netzwerken. Für die Weiterentwicklung einer Modellregion hat sich gezeigt, dass eine gute Kommunikation Grundlage für das Zusammenspiel der Akteure ist. Gefragt für die Weiterentwicklung einer Modellregion sind zudem transdisziplinär erfahrene Projektbeteiligte, die den Transformationsprozess mit Geduld, Empathie und Prozessgestaltungskompetenz erfolgreich führen können.

- **Beteiligte in Kommunen:** Vertretungen von Landkreisen und Kommunen sind ebenfalls kritische Stakeholder. Sie können eine proaktive Rolle einnehmen und als Fürsprecher und zur Verbreitung des Themenbereichs Energieflexibilität beitragen. Durch ihre Kontakte zu regionalen Firmen und Kontaktpersonen können die relevanten Unternehmen in der Region identifiziert und gewonnen werden. Bei der Weiterentwicklung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg helfen die Kommunen, die Akzeptanz für die Energieflexibilität innerhalb der Kommune selbst zu steigern.
Nur wenn die kritischen Stakeholder der Kommunen frühzeitig in die Mitgestaltung eingebunden werden, können sie überhaupt ein Verständnis für Energieflexibilität und die nötige Transformation entwickeln. Bei der Übertragung kann das Wissen und vor allem das Netzwerk der Kommunen aktiv genutzt werden, um die Transformation zur energieflexiblen Region anzustoßen. Die Netzwerke dienen als großer Multiplikator und Kommunikator. Innerhalb der Kommunen sind es viele Verantwortliche, die in die Prozesse der Weiterentwicklung, aber auch der Übertragung eingebunden werden sollten. Hierzu zählen politische Vertretungen aus Gremien und Parteien, aber auch kommunale Energieagenturen, die Stadt- und Regionalplanung sowie die Verwaltung. Sie verantworten gemeinsam den Klimaschutz in ihrer Region und können oftmals auf bereits bestehenden Aktivitäten und Strukturen aufbauen.
- **(Verteil-)Netzbetreiber:** Als weiterer wichtiger und kritischer Stakeholder für die Weiterentwicklung und Übertragung in andere Regionen wurden die Verteilnetzbetreiber identifiziert. Hier ist es notwendig, dass auf einer übergeordneten Ebene (Bundesnetzagentur, politische Ebene) und den anderen Netzebenen (z. B. Übertragungsnetz) dafür geworben wird, dass sich die Rollen der Verteilnetzbetreiber ändern. Die Energieflexibilitätsbefähigung des Energiemarkts verlangt auch eine Energieflexibilitätsbefähigung der Akteure. Hier sollte mehr Kommunikation, Organisationsentwicklung und Unterstützung für die Transformation erfolgen.

Neben den kritischen Stakeholdern bilden Personen, die Informationen und Wissen weitergeben, einen relevanten Faktor. In weiteren Modellregionen sollten bereits Forschungs- und Ansprechpersonen vorhanden sein, die mit Energieflexibilität in Verbindung stehen. Durch die Multiplikator-Effekte können denn die regionalen Potenziale genutzt werden. Solche Personen können insbesondere in bestehenden Forschungsverbänden gefunden werden. Es existieren noch weitere Projekte und Netzwerke, die sich mit Klimaschutz und Energietransformation beschäftigen und nach denen aktiv gesucht werden sollte. In diesen Netzwerken sollten zunächst die oben beschriebenen kritischen Stakeholder sowie Industrieunternehmen mit einem hohen Digitalisierungsgrad bzw. einer proaktiven Digitalisierungsstrategie identifiziert werden. Diese bringen ein besonders hohes Eigeninteresse an der Transformation hin zur Energieflexibilität mit und dienen so als Fürsprecher in der Region. Solche Fürsprecher können auch in engagierten Industrieunternehmen gefunden werden.

Um eine bundesweite Skalierung der energieflexiblen Industrie gut vorzubereiten, ist die geografische Vielfalt möglicher Erprobungsräume von großer Relevanz. Nur so können soziale, ökonomische, technologische und kulturelle Unterschiede identifiziert und verstanden werden. Durch vielfältige Perspektiven können auch Hindernisse für eine spätere Übertragung identifiziert werden. Hierbei sollte aus den Regionen, die potenziell geeignet sind (dunkelblaue Regionen, *Abbildung 15*), gezielt

eine Region gewählt werden, die komplementär ist zur Modellregion Augsburg. Eine solche Region könnte im Norden Deutschlands angesiedelt sein, der im Vergleich eine höhere Stromerzeugung aus Windkraftanlagen in Kombination mit einer geringeren industriellen Stromnachfrage aufweist.

5 Fazit und Ausblick

Autoren: Jordan · Scharmer · Schulz · Vernim · Zäh

Ausgehend von der Auseinandersetzung hinsichtlich der Öko-, Sozio- und Technosphäre in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg fokussierten die Arbeiten auf die Befähigung von energieflexiblen Fabriken. Die industrielle Energieflexibilitätsbefähigung in der regionalen Vermarktung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wurde konzeptionell erprobt. Folgende Voraussetzungen haben sich für die erfolgreiche Potenzialerhebung sowie konzeptionelle Umsetzung und Anwendung von energieflexiblen Fabriken als essenziell erwiesen:

- Die kontinuierliche und aktive Projekteinbindung aller in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg vertretenen Organisationen im Rahmen regelmäßiger, interaktiver Workshops sowie durch Berichte zum Projektfortschritt ist entscheidend, um weithin akzeptierte Lösungen für die Energiewende und insbesondere für energieflexible Fabriken zu erarbeiten.
- Die enge Zusammenarbeit und der kontinuierliche Austausch mit Partnern, insbesondere aus den Bereichen der IKT-Systeme und den verschiedenen Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilität, ermöglichen die zielgerichtete Umsetzung und Anwendung von erarbeiteten Lösungsbausteinen in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg.

Neben den Voraussetzungen zu Partizipation und Zusammenarbeit sind folgende Aspekte ein wichtiges Resümee:

- Die regionale Nutzung industrieller Energieflexibilität spielt eine entscheidende Rolle zur nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems in Deutschland.
- Die ausgewählten Anwendungsfälle zeigen, dass die übergreifend entwickelten IKT-Systeme unter den in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg gegebenen Rahmenbedingungen technisch und funktional anwendbar sind.
- Um Übertragungsmöglichkeiten zu identifizieren, wurde analysiert, welche Regionen ähnlich volatile Stromerzeugungs- und vergleichbare Stromverbrauchsstrukturen mit hohen Schwankungen in der Residuallast wie die Modellregion Augsburg aufweisen und somit vor ähnlichen Herausforderungen bei der Integration von erneuerbaren Energien stehen und als Lösungsbaustein industrielle Energieflexibilität nutzen können und sollten.

Die vielfältige inhaltliche und rollenbezogene Zusammensetzung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg bietet nicht zuletzt aufgrund ihrer übertragbaren Ergebnisse eine gelungene Grundlage zur Weiterentwicklung der industriellen Energieflexibilitätsbefähigung als Baustein einer erfolgreichen Energiewende sowohl in der Region Augsburg als auch in ganz Deutschland. Zukünftige energie-

wirtschaftliche Herausforderungen im Zuge der Dekarbonisierung erfordern die Betrachtung und Einordnung energieflexibler Fabriken vor dem Hintergrund unterschiedlicher Transformationspfade in allen Sektoren.

6 Literatur

AVERBECK-LIETZ, S. und M. MEYEN, 2016. Handbuch nicht standardisierte Methoden in der Kommunikationswissenschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-01655-5.

CORRADINI, R., C. KONETSCHNY und T. SCHMID, 2017. FREM – Ein regionalisiertes Energiesystemmodell. et – Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 1/2. et – Energiewirtschaftliche Tagesfragen.

FORSCHUNGSSTELLE FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT E.V., 2020a. eXtremOS – Wert von Flexibilität im Kontext der europäischen Strommarktkopplung bei extremen technologischen, regulatorischen und gesellschaftlichen Entwicklungen [online] [Zugriff am: 8. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/735>

FORSCHUNGSSTELLE FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT E.V., 2020b. The FfE Open Data Portal [online] [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: <http://opendata.ffe.de/>

GOTZENS, F., B. GILLESSEN, S. BURGESS, W. HENNINGS, J. MÜLLER-KIRCHENBAUER, S. SEIM, P. VERWIEBE, T. SCHMID, F. JETTER und T. LIMMER, 2021. DemandRegio – Harmonisierung und Entwicklung von Verfahren zur regionalen und zeitlichen Auflösung von Energienachfragen [online]. Abschlussbericht [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-STE/DE/Projekte/DemandRegio_Abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile

HÜWELS, H., S. BOLAY und J. SCHORPP, 2021. Energiewende-Barometer 2021 der IHK-Organisation. Unternehmensumfrage zur Umsetzung der Energiewende [online]. DIHK – Bereich Energie, Umwelt, Industrie [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.dihk.de/resource/blob/58460/aca53ba cc14cea080320089a6c57214b/energiewende-barometer-2021-data.pdf>

KRINGS, B.-J., 2019. Die Gestaltung der Energiewende aus Sicht der Unternehmen – Passive, aktive oder gesamtgesellschaftliche Partizipation? In: C. Fraune, M. Knodt, S. Gözl und K. Langer, Hg. Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 231 – 249. ISBN 978-3-658-24759-1.

MEYER, T., 2019. Zur ethischen Relevanz von Akzeptanz und Akzeptabilität für eine nachhaltige Energiewende. In: C. Fraune, M. Knodt, S. Gözl und K. Langer, Hg. Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 45 – 60. ISBN 978-3-658-24759-1.

QUITZOW, R., A. BANGERT, D. DÜBER, C. FRAUNE, A. FRICKE, H. GASCHNIG, S. GÖSSLING-REISEMANN, O. KALTENEGGER, J. KEMMERZELL, J. KOPFMÜLLER, A. LÖSCHEL, T. MEYER, L. OLLIER, O. RENN, S. SCHLACKE, D. SCHNITTKER, V. STELZER, P. THIER und M. ZECCOLA, 2018. Multikriterieller Bewertungsansatz für eine nachhaltige Energiewende: Von der Analyse zur Entscheidungsfindung mit ENavi.

SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

SCHEL, D., D. BAUER, F.G. VAZQUEZ, F. SCHULZ und T. BAUERNHANSL, 2018. IT Platform for Energy Demand Synchronization Among Manufacturing Companies [online]. Procedia CIRP, 72, 826–831. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2018.03.237

STADT AUGSBURG, 2020. Klimaschutzbericht 2020. Evaluierung Klimadialog, CO₂-Minderungsziele, Maßnahmen und Klimawandel-Anpassungsstrategie.

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.



Managementsysteme für energieflexible Fabriken

- B.1 Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung
- B.2 Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung
- B.3 Integration der Flexibilitätsvermarktung







B.1

Werkzeuge für die energetische
Flexibilisierung

Management Summary

Das Kapitel zeigt Möglichkeiten und Anwendungsfälle aus Forschung und Industrie zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken anhand der sechsstufigen Methodik nach VDI (2021). Dazu werden für jeden einzelnen der sechs sequenziell zu durchlaufenden Schritte der Methodik – Potenzialanalyse, Konzeption & Planung, Umsetzung & Implementierung, Operative Energieflexibilitätsvermarktung, Controlling & Monitoring sowie Betriebsoptimierung – entsprechende Werkzeuge vorgestellt. Deren Funktionsweise und Anwendung wird anhand mehrerer Anwendungsfälle aus Forschung und Industrie demonstriert. Es werden Handlungsempfehlungen für die praktische Umsetzung der energetischen Flexibilisierung von Fabriken abgeleitet und ein Bezug der Forschungsergebnisse zur Praxis hergestellt.

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
f_{Netz}	Netzfrequenz	Hz
f_{MG}	vom Messgerät erfasste Netzfrequenz	Hz
P	Leistung	kW
P_{el}	Elektrische Leistung	kW
n	Anzahl der Prognosewerte	–
Y_i	Beobachtungswerte	–
\hat{Y}_i	Prognosewerte	–

Autoren

Bauer, Dennis
 dennis.bauer@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Benedik, Felix
 felix.benedik@campus-schwarzwald.de
 Centrum für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit
 Schwarzwald gGmbH
 Herzog -Eberhard-Straße 56, 72250 Freudenstadt

Bianchini, Isabella
 isabella.bianchini@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Borst, Fabian
 f.borst@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

da Silva, Carina
 dasilva@ismd.tu-darmstadt.de
 Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), Technische
 Universität Darmstadt
 Franziska-Braun-Str. 3, 64287 Darmstadt

Dietrich, Bastian
 b.dietrich@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Emde, Alexander
 alexander.emde@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Fuhrländer-Völker, Daniel
 d.fuhrlaender-voelker@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Hofmann, Philipp
 philipp.hofmann@daimler.com
 Mercedes-Benz AG
 Benzstraße Tor 7, 71059 Sindelfingen

Ilieva-König, Svetlina
 svetlina.ilieva-koenig@trimet.de
 TRIMET Aluminium SE
 Aluminiumallee 1, 45356 Essen

Kaymakci, Can
 can.kaymakci@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Lindner, Martin
 m.lindner@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Moog, Daniel
 d.moog@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Retzlaff, Jan
 jan.retzlaff@de.kaercher.com
 Alfred Kärcher SE & Co. KG
 Eberhard-Herzog-Straße 12–20, 74423 Obersontheim

Riethmüller, Tobias
 tobias.riethmueller@campus-schwarzwald.de
 Centrum für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit
 Schwarzwald gGmbH
 Herzog -Eberhard-Straße 56, 72250 Freudenstadt

Sauer, Alexander
 alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Schillinger, Christof
 christof.schillinger@campus-schwarzwald.de
 Centrum für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit
 Schwarzwald gGmbH
 Herzog -Eberhard-Straße 56, 72250 Freudenstadt

Seyed Sadjjadi, Bijan
 bijan.seyed.sadjjadi@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Sossenheimer, Johannes
 j.sossenheimer@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

van Stiphoudt, Christine
 christine.vanstiphoudt@uni.lu
 SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
 Trust, University of Luxembourg
 Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxemburg

Weber, Thomas
 t.weber@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Weigold, Matthias
 weigold@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Wenninger, Simon
 simon.wenninger@fim-rc.de
 Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
 management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
 informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
 Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

1 Einleitung

Autoren: Lindner · Sossenheimer · Wenninger · Bauer · Kaymakci · Weigold

Energieflexible Fabriken bieten große Potenziale bei der Realisierung einer flexiblen Energienachfrage auf der Verbrauchsseite. Die erfolgreiche Umsetzung industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen kann damit einen zentralen Beitrag zur zukünftigen Stabilität und Dekarbonisierung des Stromsystems leisten (Seifermann et al., 2019). Daher gilt es, schnellstmöglich einen großen Anteil der gesamten Industrie zu einem energieflexiblen Fabrikbetrieb zu befähigen. Ein methodisches Vorgehen zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken wird in der Handlungsempfehlung VDI (2021) aufgezeigt, wonach die sechs Schritte Potenzialanalyse, Konzeption & Planung, Umsetzung & Implementierung, Operative Flexibilitätsvermarktung, Controlling & Monitoring sowie Betriebsoptimierung sequenziell durchlaufen werden (Abbildung 1).

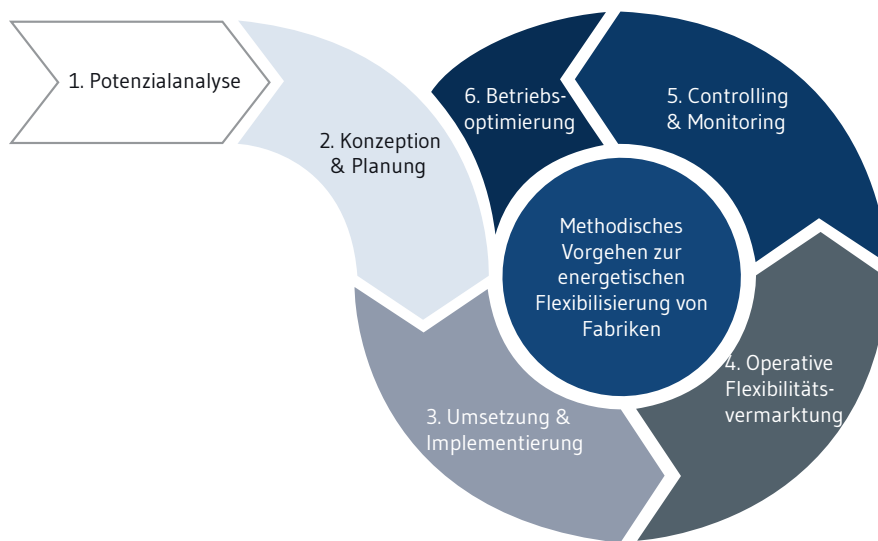


Abb. 1 Methodisches Vorgehen zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken (nach VDI, 2021)

- Zur Befähigung eines Industrieunternehmens zum energieflexiblen Betrieb ist im ersten Schritt die Identifikation und Bewertung vorhandener Energieflexibilitätspotenziale und damit möglicher Energieflexibilitätsmaßnahmen erforderlich.
- Im zweiten Schritt wird die Umsetzung der zuvor priorisierten Energieflexibilitätsmaßnahmen konzipiert und geplant. Diese Konzeption und Planung kann sich auf einzelne Anlagen, aber auch ganze Systeme wie die Kälte- und Wärmeversorgung beziehen.

- Wurden Energieflexibilitätspotenziale identifiziert und konzeptionell geplant, müssen diese für einen automatisierten energieflexiblen Fabrikbetrieb an die IT-Infrastruktur angeschlossen werden. Dies ermöglicht schließlich die Vermarktung der Energieflexibilität.
- Nach erfolgreicher Implementierung der Energieflexibilitätsmaßnahmen kann das Controlling und Monitoring zum Beispiel durch ein Last- und Flexibilitätsmanagement durchgeführt werden.
- Für übergreifende Systeme kann zudem eine kosten- und energieeffiziente Betriebsoptimierung der flexibilisierten Anlagen auf Basis eines umfassenden Monitorings umgesetzt werden.

Mit der dargestellten Methodik nach VDI (2021) werden Unternehmen schnell und zielführend bei der individuellen Energieflexibilitätsbefähigung von Fabriken unterstützt. Im Folgenden werden die im Kopernikus-Projekt SynErgie entwickelten Werkzeuge vorgestellt, die die sechs Schritte nach VDI (2021) unterstützen. Die Werkzeuge wurden in der Praxis auf Anwendbarkeit erprobt und können Industrieunternehmen bereits heute und in Zukunft bei der erfolgreichen Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unterstützen.

2 Werkzeuge zur Energieflexibilitätspotenzialanalyse

Autoren: Sossenheimer · Lindner · van Stiphoudt · Weigold

2.1 Grundlagen

Ziel des ersten Schritts der Methodik nach VDI (2021) ist, Energieflexibilitätspotenziale zu identifizieren und zu bewerten. Hierzu wurden die Werkzeuge Schnell-Check-Tool, Energieflexibilitätsaudit, E-Flex-Scanner sowie das Flexibilitätseinsatzplanungstool entwickelt. Diese vier Werkzeuge sind praktische Hilfsmittel, um Industrieunternehmen grundlegende Informationen über Energieflexibilität bereitzustellen, Energieflexibilitätspotenziale bzw. -maßnahmen zu identifizieren und diese technisch und ökonomisch zu bewerten.

- Das Schnell-Check-Tool bietet Industrieunternehmen die Möglichkeit, sich grundlegend über Energieflexibilität und deren Einsatzmöglichkeiten zu informieren.
- Das Energieflexibilitätsaudit unterstützt Industrieunternehmen dabei, Energieflexibilitätsmaßnahmen für Produktionsmaschinen und -anlagen zu identifizieren, zu charakterisieren und zu bewerten.
- Zur Bewertung von Produktionsinfrastrukturanlagen empfiehlt sich der E-Flex-Scanner, welcher eine simulierte Betriebsoptimierung durchführt, um das technische und wirtschaftliche Energieflexibilitätspotenzial zu bestimmen.
- Mithilfe des Flexibilitätseinsatzplanungstools können abschließend, basierend auf historischer Energiepreisdaten, die Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlichen Vermarktungsoptionen quantifiziert und bewertet werden.

2.2 Schnell-Check-Tool

Das Schnell-Check-Tool bietet sowohl Unternehmen als auch der Öffentlichkeit eine erste Anlaufstelle, um sich über das Thema industrielle Energieflexibilität zu informieren. Neben einer Einführung in die Grundlagen der Energieflexibilität werden Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität in Deutschland aufgezeigt. Nutzer des Schnell-Check-Tools haben darüber hinaus die Möglichkeit, grundlegende Potenzialabschätzungen über die Umsetzung möglicher Energieflexibilitätsmaßnahmen zu erhalten. Dazu werden verschiedene Einsatzmöglichkeiten von Energieflexibilität aufgezeigt. Diese beinhalten die Netzentgeltoptimierung, die Nutzung von Preisunterschieden am Spotmarkt, die Eigenerzeugung sowie das Anbieten von Systemdienstleistungen (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2022b).

2.3 Energieflexibilitätsaudit

Das Energieflexibilitätsaudit ist eine Methodik zur Identifikation und zur techno-ökonomischen Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen eines Industrieunternehmens oder -standorts und wird ausführlich in *Kapitel A.2* sowie in Tristán, Heuberger und Sauer (2020) beschrieben. Das Energieflexibilitätsaudit analysiert alle relevanten industriellen Systeme eines Unternehmens oder des jeweiligen Standorts und identifiziert systematisch Energieflexibilitätsmaßnahmen und deren Energieflexibilitätspotenziale.

Die Ergebnisse des Energieflexibilitätsaudits werden im Energieflexibilitätsmaßnahmen-Katalog (EFM-Katalog) und in der Energieflexibilitätsmaßnahmen-Scorecard (EFM-Scorecard) zusammengestellt. Der EFM-Katalog gruppiert alle identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen und ihre Charakterisierungsparameter inkl. der jeweiligen Energieflexibilitätspotenziale. Die EFM-Scorecard vergleicht die technische und wirtschaftliche Eignung der identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Verfolgung der einzelnen industriellen Energieflexibilitätsziele sowie deren Umsetzungs- und Nutzungsrisiken.

2.4 E-Flex-Scanner

Der E-Flex-Scanner unterstützt Energieverantwortliche in Industrieunternehmen dabei, Energieflexibilitätspotenziale in der Produktionsinfrastruktur zu nutzen. Der E-Flex-Scanner kann über eine Webapplikation aufgerufen werden, die von jedem internetfähigen Endgerät erreichbar ist. Angelehnt an das Vorgehen der VDI 5207-2:2021 (2021) unterstützt der E-Flex-Scanner bei der Bestandsaufnahme, Potenzialanalyse und Bewertung des Energieflexibilitätspotenzials auf Anlagenebene.

In einem ersten Schritt hilft der E-Flex-Scanner bei der Festlegung von unternehmensseitigen Energieflexibilitätszielen, die in VDI 5207-1:2020 (2020) näher beschrieben werden. In den folgenden Schritten ermittelt der E-Flex-Scanner das technische Potenzial vielversprechender Anlagen und ermöglicht zudem die Abschätzung wirtschaftlicher Erlöspotenziale. Hierfür werden die zugrundeliegenden Speicher-Wandler-Systeme und bivalenten Anlagen wie in *Abbildung 2* dargestellt vereinfacht, sodass

bereits mit wenigen verfügbaren Systeminformationen eine simulierte Betriebsoptimierung, basierend auf historischen Spotmarktdaten (Day-Ahead-Strompreise) der vergangenen Jahre, durchgeführt werden kann. Neben den wirtschaftlichen Erlöspotenzialen der letzten Jahre kann auch der Aufwand für die Befähigung zum energieflexiblen Betrieb der Anlagen abgeschätzt werden, was die Berechnung der statischen Amortisationsdauer ermöglicht.

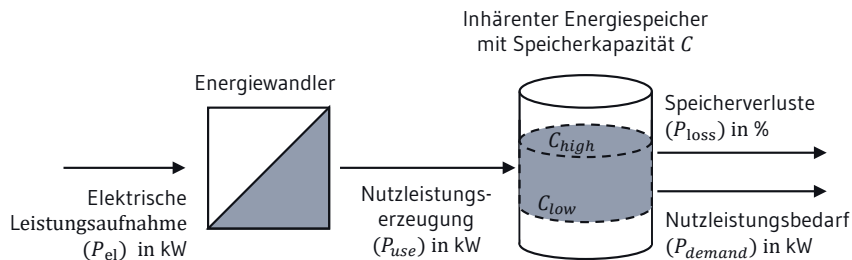


Abb. 2 Vereinfachte Darstellung eines Speicher-Wandler-Systems, bestehend aus dem Energiewandler, der Strom in die vom Produktionsprozess benötigte Nutzenergieform umwandelt, und dem Nutzenergiespeicher, über den der Nutzenergiebedarf der Produktionsprozesse gedeckt wird (nach Strobel et al., 2020)

Die Deutsches Milchkontor (DMK) Group, die Badische Staatsbrauerei Rothaus und die Evonik Industries AG nutzen den E-Flex-Scanner bereits, um die eigenen Energieflexibilitätspotenziale zu bewerten. Alle Unternehmen verwenden die vorhandenen prozessinternen Temperatur- bzw. Drucktoleranzen, um einen virtuellen Nutzenergiebedarfsspeicher zu erstellen (Abbildung 2). Dieser kann abhängig von den schwankenden Strompreisen energieflexibel geladen werden. Konkret bedeutet dies, dass die Kältespeicher heruntergekühlt werden oder der Druck des Dampfnetzes erhöhet wird, wenn der Strom gerade günstig ist (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2021). Die Ergebnisse der Potenzialanalysen mit dem E-Flex-Scanner für die genannten Anwendungsfälle werden detailliert in Kapitel C.7 beschrieben.

2.5 Flexibilitatseinsatzplanungstool

Das Flexibilitatseinsatzplanungstool (Flex-Tool) unterstützt Unternehmen bei der Vermarktungsentscheidung ihrer Energieflexibilität. Als Input können beispielweise die mit dem Energieflexibilitätsaudit oder dem E-Flex-Scanner identifizierten Energieflexibilitätspotenziale genutzt werden. Das Ziel des Flexibilitatseinsatzplanungstools ist es, aus verschiedenen Energieflexibilitätsoptionen die Energieflexibilitätsmaßnahme auszuwählen, mit der die größten Erlöse bzw. ein kostenminimaler Einsatz erreicht werden können. Dazu wird mithilfe einer Optimierung der Energieflexibilitätseinsatz auf die schwankenden Strompreise an den Spot- und Systemdienstleistungsmarkten ausgerichtet. Das Flex-Tool wird ausführlich in Kapitel A.1 vorgestellt (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2022a).

3 Werkzeuge zur Konzeption und Planung

Autoren: Moog · Borst · da Silva · Weigold

3.1 Grundlagen und Anwendungsbeispiel

Eine zunehmend immer wichtiger werdende Aufgabe in der Fabrikplanung liegt in der optimierten und übergreifenden Gestaltung der Energiesysteme, da die im Betrieb bestehenden Erlöspotenziale maßgeblich durch die vorausgelagerte Planung determiniert werden. Aufgrund der zunehmenden Volatilität der Energiepreise wird die Energieflexibilität künftig einen entscheidenden Faktor im Planungsprozess industrieller Energiesysteme darstellen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei Wärme- und Kälteversorgungssysteme, welche nach Panten (2019) zehn bis 40 Prozent des gesamten Energiebedarfs einer Fabrik ausmachen. Verschiedenen Studien zufolge weisen industrielle Systeme zur Kälte- und Wärmeversorgung signifikante Potenziale zur Energieflexibilitätsbereitstellung auf (Gruber, 2017; Steurer, 2017; Kleinertz et al., 2019). Die Planung solcher Systeme erfolgt in der Praxis als Teil der Fabrikplanung anhand bereits etablierter Richtlinien und Vorgehensmodelle, wie beispielsweise der VDI 5200:2011 (2011) und der Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI) nach Bundesgesetzblatt I (2013). Diese weisen jedoch bislang keinen Bezug zur Energieflexibilität auf.

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel ein digitales Werkzeug zur energieflexiblen Planung industrieller Wärme- und Kälteversorgungssysteme vorgestellt, im folgenden Planungsplattform genannt. Diese Webapplikation ermöglicht die Bewertung technischer (thermische Leistung und Temperaturniveaus) und ökonomischer Kriterien (Investitionen und energiegebundene Betriebskosten) verschiedener Designvarianten unter Berücksichtigung von Energieflexibilität.

Die Planungsplattform erfüllt die folgenden Kernanforderungen nach Flum et al. (2020):

- Möglichkeit zur Entwicklung verschiedener Gestaltungsalternativen ohne vertiefte Simulationskenntnisse
- Intuitive Bedienbarkeit
- Einfache Erweiterbarkeit hinsichtlich verschiedener Wärme- und Kälteerzeugungstechnologien
- Methodische Kompatibilität zu etablierten Planungsprozessen
- Kompatibilität zu gängigen Modellierungs- und Simulationsumgebungen

Nachfolgend wird zunächst die technische Umsetzung beschrieben. Anschließend erfolgt die Darstellung erster Umsetzungsergebnisse. Die Ausführungen enden mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf geplante Erweiterungen.

3.2 Technische Umsetzung

Der Aufbau der Planungsplattform und deren technische Umsetzung ist in *Abbildung 3* schematisch dargestellt. Die zentralen Elemente der Planungsplattform sind eine grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) im Frontend sowie modulare Simulationsmodelle industrieller Kälte- und Wärmeversorgungstechnologien, ein Programmkern und verschiedene Datenquellen im Backend. Im Folgenden werden die einzelnen Elemente sowie deren Zusammenspiel näher erläutert.



Abb. 3 Schematische Darstellung der zentralen Elemente der Planungsplattform und der Nutzerschnittstellen

Die Planungsplattform umfasst einen vierstufigen Planungsprozess. Der Nutzer spezifiziert im ersten Schritt verschiedene Rahmenbedingungen des Planungsprojekts (z. B. Lastdaten wie Volumenströme, Vorlauftemperaturen etc.). Im zweiten Schritt werden mögliche technische Varianten konfiguriert. Im dritten Schritt erfolgt die Parametrierung der Designvarianten und die Festlegung der Berechnungseinstellungen (z. B. zeitlicher Betrachtungshorizont). Im vierten und letzten Schritt erfolgt die Berechnung und Visualisierung relevanter technischer (z. B. Massenströme und Temperaturen) und wirtschaftlicher Ergebnisse (z. B. Annuität, betriebsgebundene Energiekosten, Investitionen). Im Backend verfügt die Planungsplattform über Simulationsmodelle von Technologiemodulen zur Kälte- und Wärmeversorgung. Ein Technologiemodul ist ein Subsystem, das aus einer Erzeuger- bzw. Verbrauchereinheit und Hydraulikkomponenten (Pumpen, Ventile etc.) besteht. Die Modellierung erfolgt dabei mit der Software Dymola.

Ein ähnliches Konzept wurde erstmals im Bereich der Gebäudesimulation von Matthes et al. (2019) verfolgt. In Anlehnung an VDI 2073:2014 (2014) sowie VDI 6018:2018 (2018) wurden die Technologiemodule in die Funktionsbereiche Erzeugung, Rückkühlung, Entkopplung, Verbraucher und Wärmerückgewinnung strukturiert. Bei der Modellierung wurde auf die Modellbasis der freien Modelica Standard Library sowie der ETA Factory Simulation Library nach Panten et al. (2020) zurückgegriffen und letztere entsprechend erweitert. *Abbildung 4* verdeutlicht das modulare Konzept und zeigt beispielhaft den schematischen Aufbau eines Moduls zur Kälteerzeugung.

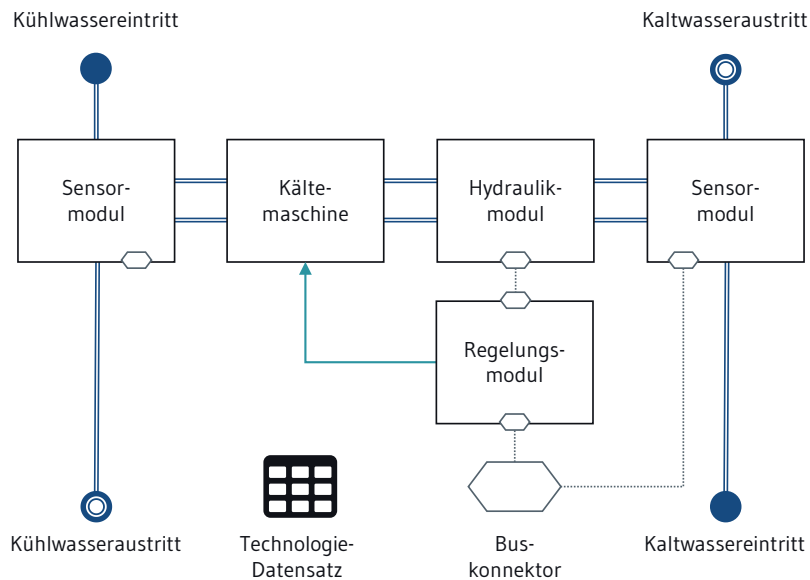


Abb. 4 Schematische Ansicht eines thermohydraulischen Moduls zur Kälteerzeugung (nach Moog et al., 2021)

Die Kompatibilität der Planungsplattform zu gängigen Modellierungs- und Simulationsumgebungen wurde durch das Aufgreifen des zunehmend etablierten Functional Mock-up Interface (FMI)-Standards zum softwareübergreifenden Modellaustausch nach Modelica Association (2020) realisiert. Die Technologie bietet großes Potenzial zur Vereinfachung simulationsgestützter Planungsprozesse mit unterschiedlichen Softwarewerkzeugen und verschiedenen Planungsbeteiligten (Réhault et al., 2017). Die originären Modelica-Module wurden mittels spezieller Schnittstellen in das Functional Mock-up (FMU)-Modellformat gemäß FMI-Standard 2.0 überführt und im Backend der Planungsplattform gekoppelt. Die Beschreibung der Systemtopologie zur Modellkopplung erfolgt mithilfe eines struktur-basierten Ansatzes (nach XML-Datenschema) zur teilautomatisierten Systemmodellerstellung. Die Simulation der zusammengesetzten FMU-Verbundmodelle erfolgt als Co-Simulation. Hierdurch wird die Kompatibilität bei der Modellierung in unterschiedlichen Simulationsumgebungen sichergestellt, was einen kollaborativen Planungsprozess verschiedener Fachplaner ermöglicht. Für detaillierte Ausführungen hierzu sei auf Moog, Borst und Weigold (2021) verwiesen. Die Parametrierung der

Modelle erfolgt anhand standardisierter Datensätze. Die Datensätze enthalten Technologieparameter wie elektrische und thermische Nennleistungen, Nennmassenströme, Betriebsgrenzen und thermische Kennfelder zur Modellierung des Betriebsverhaltens der Technologien. Weiterhin wurden Kostenfunktionen zur Abschätzung der Investitionshöhen basierend auf Gebhardt et al. (2002) ergänzt. Darüber hinaus sind Funktionalitäten zum Einlesen und Verarbeiten verschiedener Nutzereingaben (z. B. thermische Lastprofile im Tabellenformat), zur Ausgabe interaktiver Ergebnisdarstellungen sowie die Dokumentation des Programmcodes für Entwickler implementiert.

3.3 Beispielhafte Demonstration der Anwendung

Die Demonstration der Planungsplattform erfolgt anhand eines zentralen Kälteversorgungssystems mit reduzierter Komplexität. Dieses besteht aus einer zentralen Kälteerzeugungseinheit, einem Rückkühlmodul mit Freikühloption, einem Pufferspeicher und einem Verbrauchermodul. Optional kann eine Wärmerückgewinnung ergänzt werden. Dabei werden zwei Varianten mit Pufferspeichern unterschiedlicher Dimension verglichen. Nach Spezifikationen der Randbedingungen (Wetterprofile, Strompreiszeitreihen, zulässige Betriebstemperaturen und thermische Lastprofile) werden verschiedene Designvarianten des zu planenden Systems entwickelt (Abbildung 5). Zur Festlegung der Systemtopologie können die Modulverbindungen in der Weboberfläche flexibel gesetzt werden, oder es kann eine Systembeschreibung über die XML-Schnittstelle eingelesen werden.

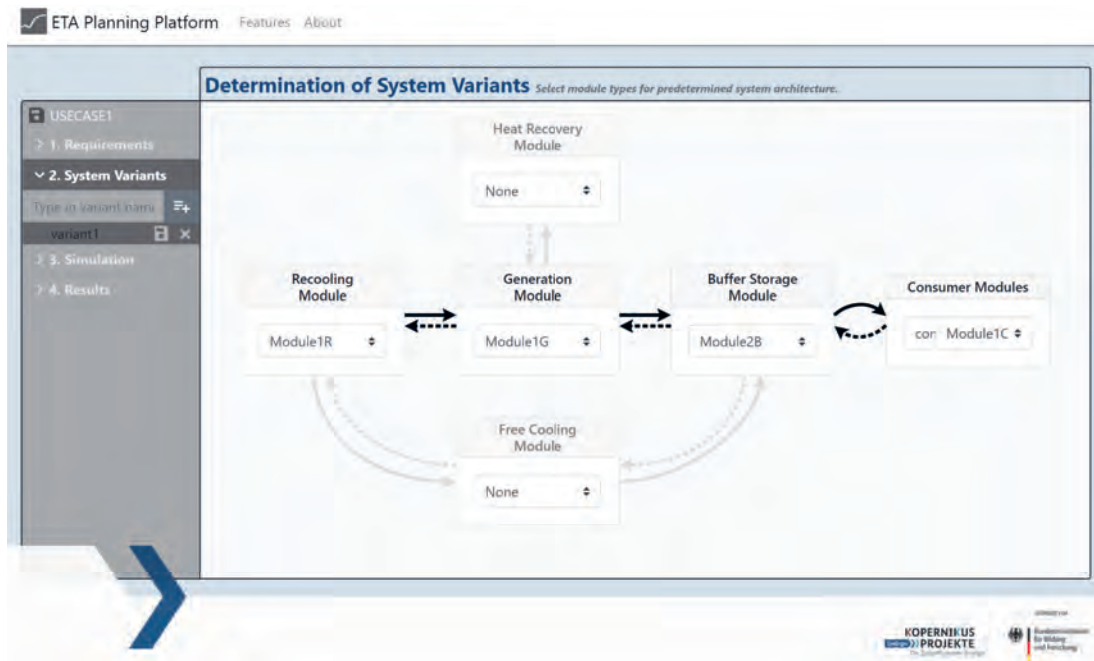


Abb. 5 Auswahl-Oberfläche zur Entwicklung von Designvarianten

Anschließend werden die Einstellungen für die Berechnung festgelegt und die Designvarianten parametrisiert, woran sich die Berechnung sowie die Darstellung der technischen und ökonomischen Zielgrößen anschließt (Abbildung 6 bzw. Abbildung 7). Hierbei lässt sich anhand der technischen Zielgrößen für jede Systemvariante bewerten, ob und über welchen Zeitraum hinweg ausreichend Kälteleistung im zulässigen Temperaturbereich bereitgestellt werden kann. Sofern diese technischen Randbedingungen erfüllt sind, ermöglicht die Visualisierung der ökonomischen Zielgrößen die Variantenbewertung anhand volatiler Energiepreise. Hierbei werden sowohl Investitionen als auch betriebsgebundene Energiekosten betrachtet. Für das vorliegende Beispiel zeigen die Ergebnisse, dass die Betriebskostenreduktion, die mit der Vergrößerung des Speichers einhergeht, die Investition nicht kompensieren kann.

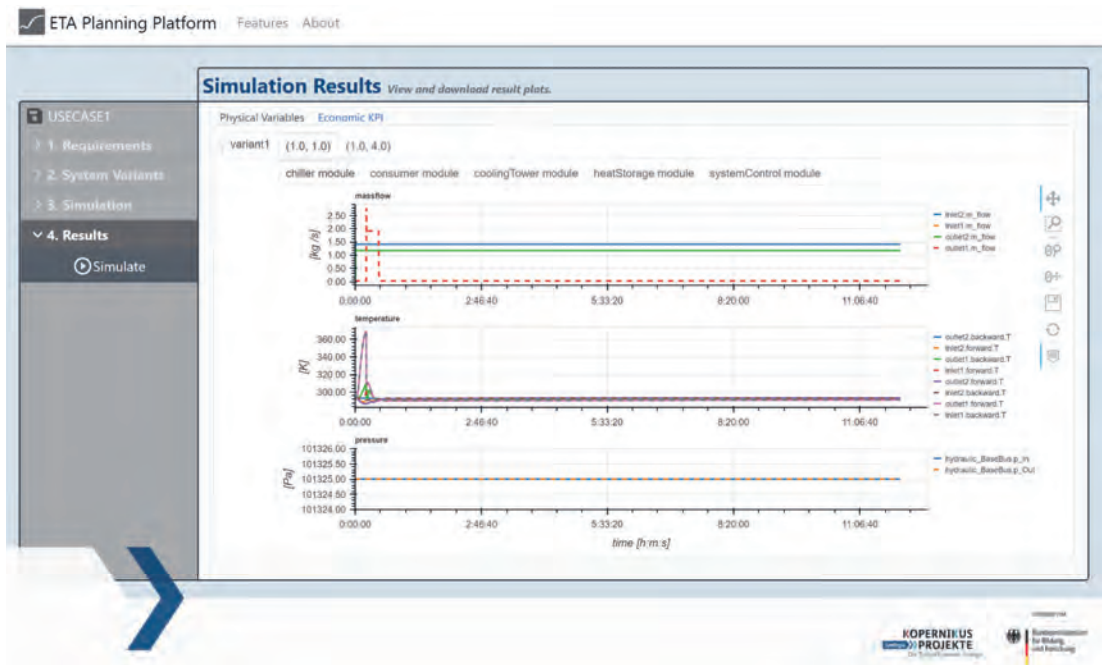


Abb. 6 Visualisierung der strömungsmechanischen Ergebnisse (Massenstrom, Temperatur und Druck)

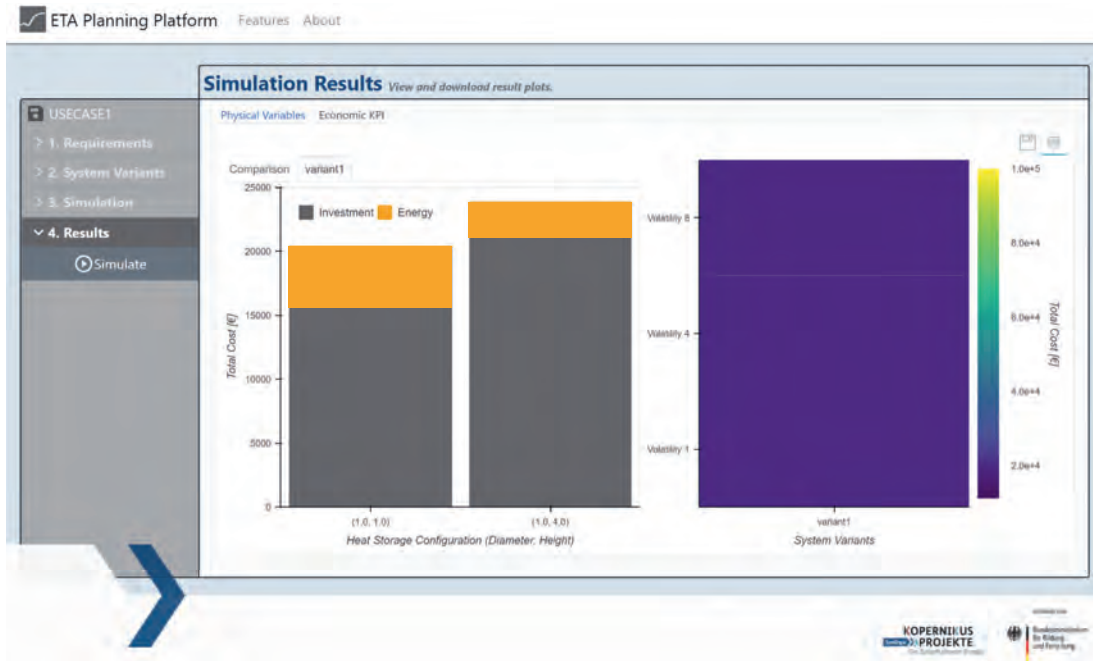


Abb. 7 Visualisierung der ökonomischen Zielgrößen (Investitionen und energiegebundene Betriebskosten)

3.4 Zusammenfassung

Die entwickelte Planungsplattform stellt ein webbasiertes Werkzeug zur Unterstützung der Planung energieflexibler Kälte- und Wärmeversorgungs-systeme in Industrieunternehmen dar. Die Zielgruppe der Planungsplattform sind Fachexperten wie Planungsingenieure oder Energieberater. Die Benutzeroberfläche umfasst einen vereinfachten Planungsprozess, der zu etablierten Vorgehensmodellen der Fabrikplanung kompatibel ist. Da die Bewertung zeitabhängiger Energieflexibilitätsmaßnahmen den Einsatz dynamischer Simulationen erfordert, ermöglicht deren Integration in ein webfähiges digitales Werkzeug die techno-ökonomische Bewertung verschiedener Designvarianten in der Planungsphase.

4 Umsetzung und Implementierung am Beispiel von Speicher-Wandler-Systemen

Autoren: Fuhrländer-Völker · Lindner · Weigold

4.1 Digitaler Retrofit für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen

Kälteanlagen werden häufig über Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID-Regler) auf eine vorgegebene Zieltemperatur geregelt, um die passende Kälteleistung für Kälteverbraucher zu erzeugen. Dabei wird Strom in Kälteleistung umgewandelt; ein energieflexibler Betrieb ist nicht möglich. Eine Erweiterung des Kühlsystems um einen thermischen Kältespeicher schafft die thermohydraulischen Voraussetzungen und ermöglicht somit einen energieflexiblen Betrieb. Je nach Betriebsstrategie kann abhängig von Strombereitstellung oder Strompreis der Speicher durch die Kälteanlage geladen, der Verbraucher direkt versorgt oder der Verbrauch über den geladenen Speicher gedeckt werden, sodass die Kälteanlage im letzten Betriebsmodus ausgeschaltet bleiben kann. Durch die intelligente Ansteuerung dieses Aufbaus entsteht ein smartes Speicher-Wandler-System. Es besteht aus einem thermischen Speicher, dem Wandler (Kältemaschine), einem thermischen Speicher und einer kommunikationsfähigen Industriesteuerung, mit der eine anlagennahe energieflexible Regelung (basierend auf Optimierungs- und Prognosealgorithmen) realisierbar ist.

4.1.1 Grundlagen

Für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen ist die Nutzung einer modellprädiktiven Regelung sinnvoll (VDI, 2021; Kohne et al., 2020). Für die Regelung wird ein mathematisches Optimierungsproblem aufgestellt mit der Zielfunktion, die zukünftigen Energiekosten zu minimieren. Dabei wird der Betriebspunkt der Kältemaschine in den nächsten Zeitschritten als Optimierungsvariable modelliert. Aus dem Stromverbrauch der Anlage, der aus dem Betriebspunkt resultiert, sowie dem zukünftigen Strompreis werden die prognostizierten Energiekosten ermittelt. Diese gilt es für einen festgelegten Zeitbereich in die Zukunft, zum Beispiel für die nächsten 24 Stunden, zu minimieren. Als Randbedingung muss der Kältebedarf der Produktion immer gedeckt sein. Die Optimierung wird zyklisch ausgeführt, zum Beispiel viertelstündlich. Bei jedem Zyklus wird nur der zeitlich erste Wert der Optimierungsvariablen für die Ansteuerung übernommen und die Maschine entsprechend geschaltet. Die anderen Zeitschritte werden verworfen. Durch das zyklische Ausführen wird der Regelkreis geschlossen, da in jedem Zyklus die Ist-Werte der Anlage sowie Strompreise und Verbrauchsprognosen aktualisiert werden.

Für die Regelung wird eine Prognose des Kältebedarfs benötigt, um zu garantieren, dass immer der benötigte Kältebedarf gedeckt werden kann. Mithilfe dieser Prognose ist eine Optimierung, abhängig von Strompreis, Kältebedarf und Speicherladestand, möglich. Die Algorithmen zur Prognose und Optimierung werden in *Kapitel B.1.7* im Detail erläutert. Der Fokus dieses Abschnitts besteht darin, die technischen Voraussetzungen für die Ausführung der Programme und der nötigen Interaktion mit der Maschine zu beschreiben.

Das Ausführen von Kältebedarfsprognose und Regelung kann auf einer von drei Ebenen erfolgen. Die Programme werden als Edge-Anwendung direkt auf einem Industrie-PC (IPC) ausgeführt. Die Ausführung erfolgt auf einem mit dem Netzwerk verbundenen PC innerhalb des Unternehmens (Edge-Cloud) oder auf einer unternehmensexternen Cloud, zu der eine Internetverbindung besteht. Für die letzten beiden Varianten können ein IPC oder eine einfachere, aber kommunikationsfähige Industriesteuerung eingesetzt werden. Beide Hardware-Varianten werden nachfolgend als Internet-of-Things-Steuerung (IoT-Steuerung) bezeichnet.

Bei der Entscheidung zwischen Edge-, Edge-Cloud- oder Cloud-Lösung sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Bei einer Implementierung auf der Edge entsteht keine größere Belastung des Fabriknetzwerks, da über das Netzwerk lediglich der Strompreis zwischen der IoT-Steuerung und dem Energieanbieter oder einem Dienstleister ausgetauscht wird. Außerdem besteht in diesem Fall die Möglichkeit, dass der Anlagenhersteller die Algorithmen direkt auf der Maschine bereitstellt. Dies vereinfacht den Anschluss durch Anwender. Dem steht entgegen, dass für die Edge-Variante die Algorithmen auf die niedrigere Leistungsfähigkeit eines IPC anzupassen sind. Bei der Edge- und der Edge-Cloud-Variante verbleiben die Daten der Algorithmen im Unternehmen, während sie bei der Cloud-Variante mit der externen Cloud ausgetauscht werden müssen. Da die Cloud-Variante eine ständige Kommunikation über das Internet erfordert, ist diese Lösung aufgrund der Anfälligkeit für Cyberangriffe am sicherheitskritischsten. Des Weiteren führt ein Ausfall der Konnektivität dazu, dass keine Regelung des Systems mehr möglich ist. Dem steht gegenüber, dass bei der Edge-Cloud und der Cloud-Variante aufwändige Rechenprozesse einfacher umsetzbar sind, da hier leistungsfähigere Hardware zum Einsatz kommen kann. Außerdem ist es bei diesen beiden Varianten möglich, mehrere Speicher-Wandler-Systeme von einem PC aus zu steuern.

Alle drei Lösungsvarianten setzen im ersten Schritt die Ansteuerbarkeit der Kälteanlage durch eine IoT-Steuerung voraus. Die in *Kapitel 4.1* erwähnten PID-Regler sind meist auf einfachen und kostengünstigen Mikrocontrollern implementiert, die nicht für den aufwändigen Einsatz der modellprädiktiven Regelung oder von Kältebedarfsprognosen geeignet sind. Für das Lösen des beschriebenen mathematischen Optimierungsproblems werden meist aufwändige numerische Lösungsansätze genutzt. Ebenso können Verbrauchsprognosen größere Rechenleistungen beanspruchen, z. B. solche auf der Grundlage neuronaler Netze. Außerdem sind zugehörige Anwendungen meist in Hochsprachen der Informationstechnologie geschrieben (z. B. Python, C++), die den Einsatz eines Betriebssystems wie Windows oder Linux erfordern (Fuhrländer-Völker et al., 2021). Dies ist als Edge-Anwendung auf modernen IPCs möglich, die aus einem Operational-Technology-Teil (OT-Teil) für die Funktionalität als speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit harter Echtzeitanforderung und einem IT-Teil, der die Ausführung der beschriebenen Anwendungen in Hochsprachen auf dem Betriebssystem ermöglicht, bestehen. Alternativ besteht die Möglichkeit, den IT-Teil auf einen über das Netzwerk verbundenen Server-PC (Edge-Cloud) oder über das Internet an einen externen Cloud-PC auszulagern. Dann ist eine kommunikationsfähige Industriesteuerung einsetzbar, welchen den OT-Teil übernimmt und die Kommunikation zwischen OT und IT über Netzwerkkommunikation ermöglicht.

Der zweite Schritt besteht in der Bereitstellung der Datenpunkte aus dem OT-Teil an den IT-Teil. Im OT-Teil erfolgt die Anbindung der Kältemaschine über analoge (z. B. Stromimpulse) oder digitale Datenkommunikation. Diese Daten müssen den Algorithmen zur Regelung und Prognose des Kälte-

bedarfs zur Verfügung gestellt werden. Außerdem muss das Schreiben von Stellsignalen durch die Algorithmen ermöglicht werden. Dabei sind die Datenpunkte im OT-Teil so zu strukturieren und freizugeben, dass sie von den Algorithmen im IT-Teil nutzbar sind. Die Kommunikation zwischen OT und IT kann beispielsweise auf der Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) oder Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) basieren.

Als letzter Schritt müssen die Prognose- und Optimierungsalgorithmen an die (von klassischen PCs abweichenden) Hardwarevoraussetzungen von IPCs angepasst werden, damit sie auf dem IPC ausführbar sind. Erst dann kann die Installation und Ausführung auf dem IPC erfolgen. Dieser Schritt ist nur erforderlich, wenn das System als Edge-Variante umgesetzt wird.

4.1.2 Technische Anforderungen

Für die Umsetzung des smarten Speicher-Wandler-Systems müssen die folgenden technischen Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Neben der Kälteanlage zur Versorgung eines Systems muss ein Kältespeicher und somit ein Speicher-Wandler-System vorhanden sein.
2. Die Anbindung der Kälteanlage an eine IoT-Steuerung ist technisch realisierbar. Entweder muss die bestehende Steuerung der Kälteanlage hierfür eine industrielle Kommunikationsschnittstelle zur IoT-Steuerung besitzen, oder es muss die Möglichkeit geben, die bisherige Steuerung durch eine IoT-Steuerung zu ersetzen. Für beide Lösungsvarianten müssen elektrische Installationsarbeiten vorgenommen werden.
3. Es müssen Temperaturdatenpunkte des Kälteverbrauchers, im Kältespeicher und in der Kälteleitung zur Prognose des Kältebedarfs vorhanden sein. Hierfür sind Temperatursensoren entweder bereits installiert oder können nachgerüstet werden. Außerdem müssen die Temperaturdaten von der neuen IoT-Steuerung erreichbar sein. Das heißt, dass die Datenwerte über eine Kommunikationsschnittstelle von der bestehenden Steuerung weitergegeben werden oder dass die Temperatursensoren direkt an die IoT-Steuerung angeschlossen werden.
4. Ein IPC, Server-PC oder ein Cloud-PC (mit einem aktuellen Betriebssystem Windows oder Linux) wird benötigt, auf dem in Hochsprache geschriebene Programme und Machine-Learning-Algorithmen ausführbar sind. Dieser PC muss die Hardwarevoraussetzungen zur Ausführung dieser Programme erfüllen, um die modellprädiktive Regelung und Kälteprognose zu ermöglichen.

Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann mit der Umsetzung und dem Umbau zu einem smarten Speicher-Wandler-System begonnen werden.

4.2 Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel für eine erfolgreiche Implementierung von Maßnahmen zur Befähigung von Energieflexibilitätpotenzialen dient die Kälteversorgung des Klimaraums in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt.

4.2.1 Aufbau des Anwendungsbeispiels

Das Anwendungsbeispiel besteht aus einer Kälteanlage des Herstellers BKW als Kälteerzeuger, dem Klimaraum als Kälteverbraucher, einem Kältespeicher, der zwischen Erzeuger und Verbraucher geschaltet ist, und einem IPC zur Ansteuerung des Speicher-Wandler-Systems als Edge-Lösung.

Die Kälteanlage besteht aus den Teilkomponenten Verdichter, Frequenzumrichter, Wärmetauscher, einer Pumpe zur Bereitstellung des nötigen Volumenstroms des Mediums und Umschaltventilen. Der Frequenzumrichter wird über einen ab Werk installierten PID-Regler gesteuert, der auf einem Mikrocontroller implementiert ist. Die hydraulischen Verbindungen zwischen den einzelnen Teilkomponenten sowie die Position von Sensoren und Aktoren im hydraulischen System ist in dem R&I-Fließschema in *Abbildung 8* dargestellt.

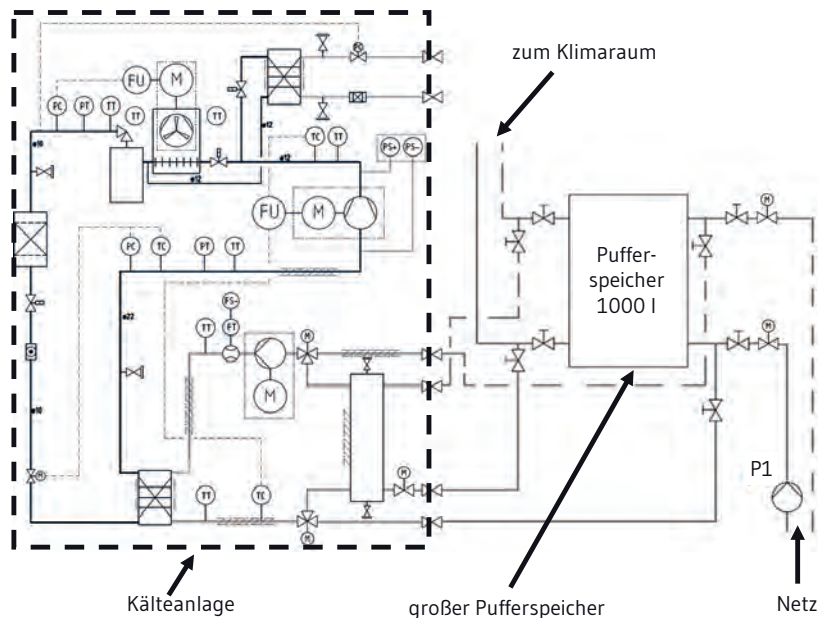


Abb. 8 R&I-Fließschema des smarten Speicher-Wandler-Systems, bestehend aus dem Wandler (Kälteanlage, schwarz umrahmt), einem thermischen Pufferspeicher und dem zu versorgenden System (Klimaraum)

Die Kälteanlage ist mit einem 1000-l-Wasserspeicher als Kältespeicher und mit dem Klimaraum als Verbraucher selbst verbunden. Der Kältespeicher ermöglicht den energieflexiblen Betrieb des Systems. Mit Umschaltventilen kann zwischen zwei Betriebsmodi umgeschaltet werden: (1) Direktbetrieb, das direkte Kühlen des Klimaraums durch die Kältemaschine und (2) Speicherladen, das Kühlen des Speichers und die Versorgung des Klimaraums aus dem Kältespeicher.

Ziel war es zu untersuchen, welche Anpassungen vorgenommen werden müssen, um bestehende Prognose- und Optimierungsalgorithmen auf einem IPC ausführen zu können. Im Anwendungsfall wurde die Implementierung als Edge-Lösung ausgewählt. In einem nächsten Schritt wurde der IPC an das Netzwerk angebunden, sodass auch eine Ansteuerung des Speicher-Wandler-Systems über das Netzwerk als Edge-Cloud-Lösung möglich ist. Der IPC kommuniziert mit der Mikrocontroller-Steuerung der Kälteanlage über Modbus RTU. Die Temperatursensoren für die Kälteprognose sind über analoge Inputklemmen direkt mit dem IPC verbunden. Der Anschluss des IPCs zur informationstechnischen Anbindung des Systems und für die Bereitstellung der Optimierungs- und Prognosealgorithmen ist in *Abbildung 9* dargestellt. Die Grafik zeigt das Zusammenspiel des OT-Teils des IPCs mit dem IT-Teil über eine OPC UA Server-Client Architektur. Die Installation eines OPC UA Servers auf dem OT-Teil des IPC ermöglicht auch die einfache Netzwerkanbindung externer PCs über TCP/IP und digitalen bzw. analogen Input/Output (DI/O bzw. AI/O) Schnittstellen.

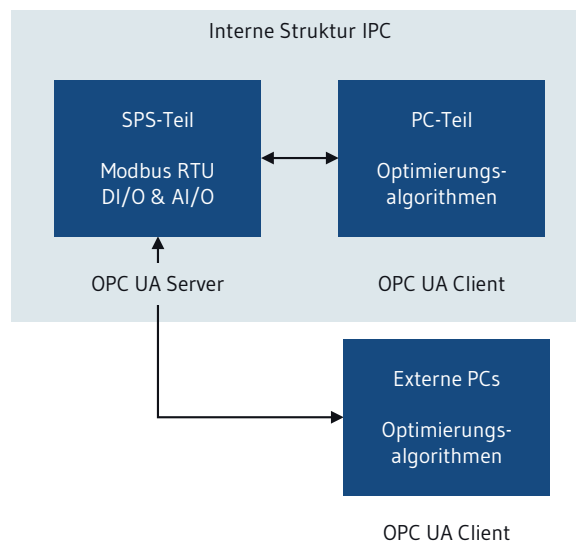


Abb. 9 Aufbau der IT/OT-Kommunikation des smarten Speicher-Wandler-Systems

4.2.2 Implementierung der Algorithmen

Um eine Implementierung und spätere Ausführung (*Kapitel B.1.7*) der bestehenden Optimierungs- und Prognosealgorithmen zu ermöglichen, werden die Algorithmen angepasst. Die Struktur für die Implementierung ist wie folgt:

Für beide Optimierungs- und Prognosealgorithmen wird das Python-Paket TensorFlow verwendet. Das Trainieren des neuronalen Netzes, auf dem die Kälteprognose basiert, erfolgt mit historischen Daten auf einem normalen PC. Die Datenerfassung für die historischen Daten in eine Datenbank erfolgt als Edge-Cloud-Lösung über das Netzwerk. Das trainierte Modell wird dann als Datei auf den IPC übertragen und dort nur noch ausgeführt, sodass die Optimierung das Prognosemodell zur Ermittlung des Kältebedarfs unter Berücksichtigung aktueller Temperaturwerte nutzen kann. Für die Übertragung und Ausführung des Modells wurden die Formate ONNX und TensorFlow Lite getestet. Die Laufzeitumgebungen zum Ausführen der beiden Formate sind speziell an die geringere Leistung von IPCs angepasst und somit dort ausführbar. Beide Formate sind geeignet für den Einsatz im smarten Speicher-Wandler-System. Mit dem gewählten Setup kann im Schritt »Betriebsoptimierung« der VDI-Methodik die energieflexible Regelung des Speicher-Wandler-Systems erfolgen.

4.3 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde dargestellt, wie ein Speicher-Wandler-System zu einem smarten Speicher-Wandler-System erweitert werden kann. Als Anwendungsfall wurde die Kältemaschine der ETA-Fabrik verwendet, die mit einem Pufferspeicher verbunden ist und einen Klimaraum als Kälteverbraucher versorgt. Es wurde beschrieben, welche Schritte nötig sind, um ein Standard-Kälteversorgungssystem durch Installation zusätzlicher Hardware und der Implementierung von Kälteprognose- und energieflexiblen Regelungsalgorithmen zu einem smarten Speicher-Wandler-System zu erweitern. Die Anpassung hin zu einem smarten Speicher-Wandler-System stellt einen wichtigen Schritt bei der Energieflexibilitätsbefähigung von industriellen Versorgungssystemen dar.

5 Operative Energieflexibilitätsvermarktung

Autoren: Ilieva-König · Lindner · Weigold

5.1 Die Plattform »Flexys« zur Vermarktung von Energieflexibilität

Der im Rahmen der Energiewende entstandene Paradigmenwechsel in der deutschen Energieversorgung stellt insbesondere die energieintensive Industrie vor neue Herausforderungen. Strom – als essenzielle Inputgröße vieler Herstellungsprozesse, z. B. der Aluminiumelektrolyse – wird zunehmend aus nachhaltigen Energiequellen gewonnen. Für das weltweit einzige Verfahren zur Herstellung von Primäraluminium, den Hall-Héroult-Prozess, stellt die Nutzung der Energie aus volatilen erneuerbaren Energiequellen die bislang größte Herausforderung dar. Nachfolgend wird dargestellt, wie und unter welchen Rahmenbedingungen eine energieflexible Herstellung von Primäraluminium möglich ist.

Dafür wurde durch die Firma TRIMET eine Universal-Plattform zur Vermarktung von Energieflexibilitäten mit dem Namen »Flexys« entwickelt, die es ermöglicht, die Stromabnahme der Elektrolyse um den Arbeitspunkt herum von ± 25 Prozent jeweils bis zu 48 Stunden zu variieren.

5.2 Forschungs- und Vermarktungsansätze

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen, der Bundesrepublik Deutschland und der Europäischen Union ist am TRIMET-Standort Essen im laufenden Betrieb eine Aluminiumelektrolyse mit einer Lastverschiebekapazität von $\pm 22,5$ MW und einer virtuellen Speicherkapazität von 2.160 MWh entstanden. Dies entspricht ungefähr der Speicherkapazität von zwei großen Pumpspeicherkraftwerken (Heimerl und Kohler, 2017).

Die flexible Aluminiumelektrolyse bietet die Möglichkeit, neben der Erbringung von Regelreserve neue Forschungsansätze zur Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen an den Spotmärkten (z. B. kontinuierlicher Intraday-Handel) zu erproben und ihre technischen, betriebs- und volkswirtschaftlichen Auswirkungen zu überprüfen. Um einen detaillierten und aussagekräftigen Vergleich der unterschiedlichen Konzepte im Hinblick auf die Prozessauswirkungen sowie die Amortisation der Investitionen in Energieflexibilitätsmaßnahmen zu realisieren, ist es notwendig, die Gesamtenergieflexibilität ($\pm 22,5$ MW) in mehrere Lastbänder aufzuteilen und für jeden Vermarktungspartner ein eigenes Energieflexibilitätsband zu reservieren. Die Reservierung der Lastbänder für die einzelnen Vermarktungspartner schließt eine Doppelvermarktung von Energieflexibilität aus. Weiterhin wird eine Fehlerzuteilung bei nicht korrekter Erbringung ermöglicht. Dabei erfordert die Kommunikation einen sicheren bidirektionalen Datenaustausch zwischen TRIMET und jedem Partner.

5.3 Plattform-Konzept zur Vermarktung von Energieflexibilität

Bei Produktionsanlagen zur Primäraluminiumerzeugung existieren grundsätzlich keine Kommunikationsstrukturen zum Zweck der Energieflexibilitätsvermarktung, und die bestehenden SPS-Laststeuerungseinheiten sind nicht für diese Aufgaben ausgelegt. Die Komplexität steigt mit der Anzahl der Partner und der Diversität der Kommunikationswege. Um dieses Problem zu adressieren, wurde ein informations- und kommunikationstechnisches Konzept (IKT-Konzept) erstellt, in dem die Anforderungen an die Kommunikationswege, die Schnittstellen, die Datensteuerung für die relevanten Produktarten und Partner sowie die Art der Daten beschrieben sind. Es wurde ein virtueller Server bereitgestellt, der als zentrales Element des IKT-Konzepts dient. Um die Daten- und die Energieflexibilitätsteuerung auf dem Server sowie zwischen dem Server, der Kopf-SPS (Eingang-SPS) und den externen Partnern gezielt vornehmen und die notwendigen Einstellungen und Reservierungen durchführen zu können, wurde eine Steuerungs- und Visualisierungssoftware entwickelt. Der Server, die Software und zugehörige Gateways bilden eine Universal-Plattform zur Vermarktung von Energieflexibilitäten: »Flexys«. Diese Plattform kommuniziert mit der Unternehmens- und Marktplattform (Abbildung 10).

5.4 Funktionsweise und Einsatz von »Flexys«

Jeder Partner hat über ein speziell parametrisiertes Gateway Zugriff auf die Universal-Plattform »Flexys«. Dort können Daten (z. B. Sollwerte und Fahrpläne) abgelegt oder über das Gateway Ist-Werte und Batteriekapazitätsstände ermittelt werden. Für die korrekte Identifizierung und Zuteilung der auf »Flexys« eingehenden Daten werden diese beim Versand vom Partner mit einer ID gekennzeichnet, sodass die Plattform den Partner und das vermarktete Produkt (z. B. Primär- oder Sekundärregelenergie) erkennt und auf Plausibilität überprüfen kann.

Die angeforderten Lastwerte aus den geprüften Daten werden anschließend an die Kopf-SPS der Produktionshalle weitergeleitet und dem für den jeweiligen Partner reservierten Energieflexibilitätsband zugewiesen. Von der Kopf-SPS wird über eine redundant ausgelegte Leitung eine Rückmeldung über die Erbringung zum Server gesendet und an den Partner übermittelt.

Die Kommunikationswege und Schnittstellen zwischen der Partnerinfrastruktur und TRIMET können individuell ausgestaltet werden. Die Datenwerte (z. B. Sollwerte und Fahrpläne) sind direkt über einen VPN-Tunnel oder über die eigene Infrastruktur der Partner austauschbar. Viele etablierte Dienstleister für die Vermarktung von Energieflexibilität haben spezielle Kommunikationswege oder Hardware, die beim Kunden installiert wird.

Eine besondere Lösung stellt die Verbindung der Universal-Plattform mit der Energiesynchronisationsplattform dar. Letztere ist über einen Smarten Konnektor (Flexys-Konnektor) mit »Flexys« verbunden und besteht aus Unternehmens- und Marktplattform. Seitens der Unternehmensplattform sorgt der Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS) für die Übertragung der relevanten Daten. So kann beispielsweise das Flexibilitätseinsatzplanungstool eine marktübergreifende Optimierung der Energieflexibilität vornehmen und einen optimierten Fahrplan zurückgeben.

Treten kritische Netzsituationen mit schnellen Änderungen der Netzfrequenz (f_{Netz}) bei z. B. Prognosefehlern der Energieerzeugungsanlagen oder einem Kraftwerksausfall auf, erhält die Kopf-SPS von einem lokalen Frequenzmessgerät (MG) die Frequenzabweichung (f_{MG}) und ermöglicht somit über die Kommunikation mit dem Energiedatenmanagementsystem (EMS bzw. EDMS) einen direkten Abruf von Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Stabilisierung des Stromnetzes. Die Universalplattform »Flexys« informiert die Übertragungsnetzbetreiber automatisch über die erbrachte Energieflexibilitätsmaßnahme. Eine weiterführende Beschreibung des TRIMET-Anwendungsfalls findet sich in *Kapitel C.5*.

elektrischen Energiebezugs zu verstehen. In diesem Kapitel werden zwei Beispiele des Last- und Energieflexibilitätsmanagements vorgestellt, eines für die Kunststoffproduktion und eines im Bereich der Automobilindustrie.

6.1.2 Umsetzung

Grundlage des Last- und Energieflexibilitätsmanagements ist die umfangreiche Erfassung von Hauptstromverbrauchern und die Extrapolation der Verbräuche von wenigen gemessenen mittelgroßen Verbrauchern auf deren Gesamtheit. Durch die Verknüpfung dieser Daten mit den Daten eines Manufacturing Execution Systems aus der Fertigung über einen definierten Zeitraum kann sichergestellt werden, dass die Verbrauchsflexibilisierung nicht die Produktivität verringert.

Das Last- und Energieflexibilitätsmanagement wird in die hierarchische Steuerungsstruktur der Fabrik integriert (Siepmann und Graef, 2016). Das ermittelte Optimum des Systems wird zum Zweck der Umsetzung an die untergeordneten lokalen Steuerungssysteme übergeben. Falls eine Durchführung der Energieflexibilitätsmaßnahmen nicht planmäßig erfolgt, wird dies dem übergeordneten Last- und Energieflexibilitätsmanagement mitgeteilt. Daraufhin wird die Planung der Energieflexibilitätsmaßnahmen angepasst und die erforderlichen alternativen Energieflexibilitätsmaßnahmen werden aktiviert.

6.2 Last- und Flexibilitätsmanagement in der Kunststoffproduktion

Eine dynamische Lastreduzierung lässt sich beim Kunststoffspritzgießen nur sehr schwer realisieren, da die Qualität des zu fertigenden Bauteils nicht beeinträchtigt werden darf. Eine Prozessparameteranpassung beeinflusst direkt die Qualität sowie die Anzahl der produzierten Bauteile. Diese Abhängigkeit der Dimensionen Qualität, Quantität und Energie muss innerhalb definierter Toleranzgrenzen eingehalten werden. Eine mögliche Energieflexibilitätsmaßnahme stellt vor diesem Hintergrund die Verschiebung des Produktionsstarts dar, die im Anwendungsfall mithilfe eines Simulationstools dargestellt wird.

6.2.1 Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen zur Umsetzung des Simulationstools wurden gemeinsam mit den Konsortialpartnern definiert. Als Ausgangspunkt dient die Spritzgießmaschine ARBURG Allrounder 370E 600-100, die im Labor des Campus Schwarzwald verortet ist. Die Datenakquisition wurde mit Energiemesssystemen durchgeführt, um Messwerte für elektrische Spannung, elektrischen Strom, Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie den Phasenverschiebungswinkel messtechnisch zu ermitteln.

Als technische Anforderungen an das Simulationstool wurden funktionale und nicht-funktionale Anforderungen definiert.

Funktionale Anforderungen

- Eingabe: Betriebspunkt der spezifischen Maschine
- Ausgabe: benötigte Aufheizzeiten und -energien, Energiebedarf im Betrieb
- Definition von peripheren Einheiten mit identischer Funktionalität
- Zustandsdokumentation
- Datenintegration realer erneuerbarer Energiequellen
- Integration generischer Energiespeichermodelle
- Virtuelles Produktionsabbild, d.h. Kombination der Prozesse unter energetischen Aspekten

Nicht-funktionale Anforderungen

- Bestmögliche Abbildung der Prozesse
- Erweiterbarkeit
- Einfache Bedienung (UX)
- Open-Source bzw. keine proprietäre Software
- Hosting über Cloud

6.2.2 Simulationstool

Das entwickelte Simulationstool konzentriert sich auf drei Aspekte:

- Die energetische Modellierung und grafische Darstellung der Energieverbräuche einer Spritzgießmaschine inkl. deren Skalierung zu einem Maschinenverbund.
- Die Implementierung von generischen Energiespeichermodellen, die als Pufferspeicher zwischen dem Versorgungsnetz und den Verbrauchern in der virtuellen Produktion fungieren. Das Energiespeichermodell kann verschiedene Energiespeichertechnologien (Kondensator, Schwungmassenspeicher, Bleibatterie, Lithium- und Redox-Flow-Batterie) und Kapazitäten berücksichtigen.
- Der Import von realen elektrischen Leistungsdaten regenerativer Energiequellen. Mit der Synchronisation dieser Aspekte lässt sich eine virtuelle Produktion unter den Gesichtspunkten der Energiebereitstellung und -nutzung modellieren und visualisieren.

Das Simulationstool gliedert sich in verschiedene Funktionalitäten bzw. Module:

1. Das Modul **»Explore Database«** dient zur Sichtung der Rohdaten und bietet einen Überblick über die Datenbasis. Dabei können unterschiedliche Datenbanken sowie Darstellungsformen ausgewählt werden.
2. Im Modul **»Segment Data«** werden die Rohdaten segmentiert und in die einzelnen Prozesszyklen und Prozessphasen eingeteilt.
3. Die im vorangegangenen Modul definierten Zyklen und Prozessphasen können im Modul **»Compare Measurement Cycles«** bezüglich ihrer Leistungsaufnahme und Prozessdauer verglichen werden, wodurch sich Unterschiede in den einzelnen Versuchsreihen aufzeigen lassen.
4. Im Modul **»Physical Simulation«** wird unter Eingabe der Prozessparameter der elektrische Energieverbrauch der spezifischen Spritzgießmaschine simuliert.
5. Das Modul **»Simulate Factory«** bildet die Grundlage für die Simulation eines Maschinenverbands. Dabei werden eine oder mehrere Simulationen ausgewählt und vervielfältigt. Durch Anpassen von z. B. Startzeitpunkten lässt sich der Maschinenverbund zeitlich dynamisch variieren und der Energieverbrauch somit flexibilisieren.
6. Im Modul **»Simulate Renewable Energies«** werden Daten von regenerativen Energieträgern in der Simulation berücksichtigt. Weiterhin wird ein generischer Energiespeicher implementiert. Dieser ermöglicht den Abgleich der durch erneuerbare Energien bereitgestellten Netzleistung mit dem Energiebedarf der Spritzgießproduktion. Somit dient das Tool der Veranschaulichung einer Kunststoff-Spritzgießproduktion und zeigt Möglichkeiten der realen Umsetzung auf.
7. Mithilfe des Moduls **»Simulate Heating Process«** kann der energieintensive Aufheiz- und Anfahrprozess einer Spritzgießmaschine dargestellt werden. Dazu werden an der Maschine Heizbänder mit einem Regler angesteuert, bis die Solltemperatur im Schneckenzyylinder erreicht ist. Für eine beispielhafte Maschine wurde dieser Anfahrprozess in einem Modell nachgebildet. Durch Auswählen der gewünschten Solltemperaturen der einzelnen Zylinderheizzonen kann bestimmt werden, wie lange der Aufheizprozess dauert und welchen Energiebedarf dieser Vorgang hat.

6.2.3 Simulation eines Spritzgießzyklus

Ein Spritzgießzyklus gliedert sich in unterschiedliche Betriebsphasen mit verschiedenen Einstellparametern. Um eine Simulation durchzuführen, müssen verschiedene Parameter (z. B. Werkzeug- und Einspritzgeschwindigkeiten, verschiedene Kunststoffe) definiert werden. Nach erfolgter Parametereingabe wird ein energetisches Modell eines solchen Zyklus generiert und grafisch sowie tabellarisch dargestellt. Weiterhin findet eine Simulation der Zykluszeit statt, wodurch eine erste Abschätzung der benötigten Zeit eines solchen Zyklus getroffen werden kann. Außerdem kann der Zyklus energetisch sowie zeitlich optimiert werden. In *Abbildung 11* ist eine solche Simulation exemplarisch dargestellt.



Abb. 11 Ergebnisse einer Simulation des Spritzgießzyklus anhand von eingegebenen Maschinenparametern

6.2.4 Simulation eines Maschinenverbunds

Die Spritzgießproduktion besteht aus einem Verbund mehrerer Spritzgießmaschinen mit sehr großer Produktvielfalt, sodass nicht jede Maschine dasselbe Bauteil herstellt. Um dieses Problem abzubilden, lassen sich die einzelnen Maschinen, die im Rahmen der Simulation definiert wurden, zu einem Maschinenverbund zusammenführen. Des Weiteren lassen sich die Startzeitpunkte der einzelnen Spritzgießmaschinen variieren. Als Ergebnis der Simulation erhält man die aufsummierte Leistung der einzelnen Spritzgießmaschinen. Die Simulation eines solchen Maschinenverbunds aus drei Maschinen ist in *Abbildung 12* dargestellt.

1	Simulation_A	0
2	Simulation_A	2
3	Simulation_B	4

Showing 1 to 3 of 3 entries

Previous Next

Simulation results - plot

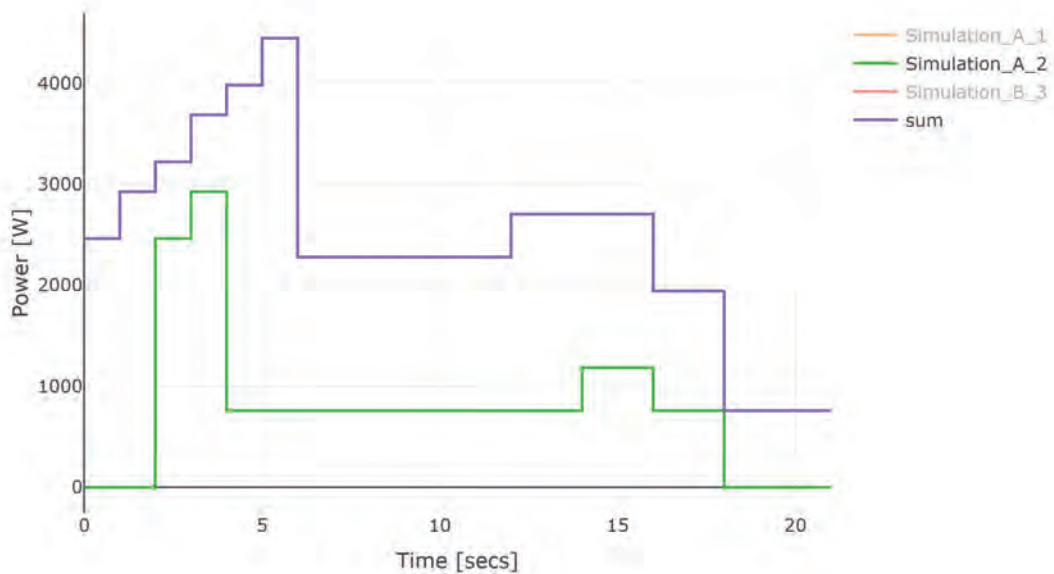


Abb. 12 Ergebnis der Simulation mehrerer Spritzgießmaschinen (Simulation A_1 und B_3 zur leichten Verständlichkeit ausgeblendet)

6.2.5 Lastspitzenreduktion durch verschobene Anfahrvorgänge

Es besteht die Möglichkeit, das Lastprofil des Maschinenverbunds zu optimieren. Das Ziel ist es, die zeitliche Anordnung der Lastprofile der einzelnen Maschinen so zu variieren, dass die Summe der Lastspitzen reduziert und die Variation der Startzeitpunkte einzelner Maschinen minimiert wird. Das bietet die Möglichkeit, die Produktion an die entsprechenden Startzeitpunkte anzupassen und einen konstanten Leistungsbedarf der Maschinen zu gewährleisten.

6.3 Last- und Flexibilitätsmanagement in der Automobilindustrie

Die Mercedes-Benz AG nahm 2020 unter dem Leitmotiv »digital, flexibel und nachhaltig« mit der Factory 56 in Sindelfingen die bisher modernste Montagehalle des Konzerns in Betrieb. Um das Ziel eines energiekostenoptimierten Betriebs der Komponenten zu erreichen, wird ein Last- und Energieflexibilitätsmanagement eingesetzt. Konkret verfolgt die Mercedes-Benz AG das Ziel, durch das Lastmanagement eine Reduktion oder Verschiebung von Lastspitzen (Peak-Shaving oder Peak Shifting), eine Steigerung des durch Photovoltaik eigenerzeugten Stroms, eine Verbesserung der Versorgungssicherheit (z. B. durch die Überbrückung von Ausfällen der elektrischen Versorgung) und Erlöse durch Stromhandel bei zunehmender Volatilität des Energieangebots und der Energiepreise zu generieren (z. B. durch die Teilnahme an Regelenergie- oder Spotmärkten).

Die Problemstellung der optimalen Durchführung und Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) ist vielschichtig, da werksinterne Zustände (Eigenschaften der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen und Eigenschaften des Gesamtsystems), die Verfügbarkeit der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen sowie externe Einflüsse (z. B. die Vermarktungsmöglichkeiten an Regelenergie- oder Spotmärkten) einen Einfluss auf die Optimierung haben. Diese stehen als Eingangsdaten zur Verfügung. Das Resultat des Last- und Energieflexibilitätsmanagements ist eine maximierte Kostenreduktion unter Berücksichtigung der Erlöse aus der Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen.

6.3.1 Konzept des Last- und Energieflexibilitätsmanagements

Der Prozessablauf des für die Factory 56 konzipierten Last- und Energieflexibilitätsmanagements wird in *Abbildung 13* dargestellt. Die Datengrundlage besteht aus den Lastzuständen der Komponenten, den Preisen der Spot- und Regelenergiemärkte sowie den Eigenschaften der Energieflexibilitätsmaßnahmen und bildet den Eingang für das Last- und Energieflexibilitätsmanagement. Dieses ist in der Lage, die Energieflexibilitätsmaßnahmen unter Betrachtung der Netzentgeltreduktionsziele (Lastspitzenreduktion oder atypische Netznutzung) auf den Spotmärkten und den Regelenergiemärkten zu vermarkten, sowohl einzeln als auch kombiniert. Nach den Vorgaben des Anwenders bezüglich der zu berücksichtigenden Vermarktungsmöglichkeiten erfolgt im zweiten Prozessschritt ein Energieeinkauf auf den Spot- und Future-Märkten. Durch die ersten beiden Prozessschritte wird der Betrachtungsumfang für das Last- und Energieflexibilitätsmanagement festgelegt und der Echtzeitsteuerung als Eingangsgröße übermittelt (*Abbildung 13*).

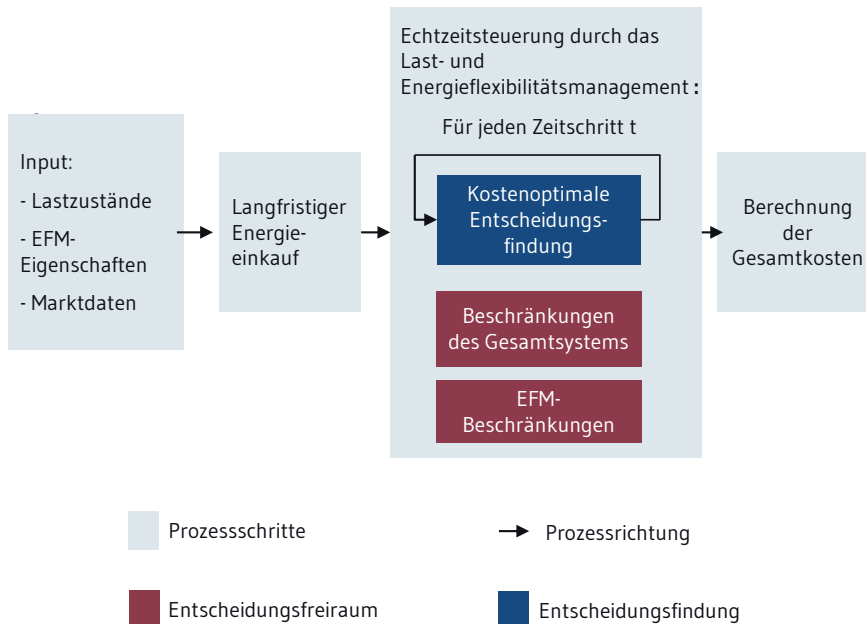


Abb. 13 Prozessablauf des konzipierten Last- und Energieflexibilitätsmanagements für die Factory 56 der Mercedes Benz AG

Die Entscheidung wird für jeden Zeitschritt (15 Minuten) getroffen. Die Vorgabe des Entscheidungsraums wird auf zwei Ebenen definiert. Auf der ersten Ebene werden die einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen in ihrer Durchführung beschränkt. Dies geschieht entsprechend den jeweiligen technischen Eigenschaften der Energieflexibilitätsmaßnahmen (z. B. deren Leistung, Abrufdauer oder Speicherkapazität). Die zweite Ebene zeigt die Beschränkungen des Gesamtsystems auf. So werden die Voraussetzungen der Vermarktungsmöglichkeiten und die Leistungsgrenzen der Infrastruktur in der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Die Entscheidungsfindung erfolgt basierend auf einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (Mixed Integer Linear Programming, MILP). Diese ermittelt das Minimum der aufgestellten Kostenfunktion, woran sich die Durchführung der Energieflexibilitätsmaßnahmen über die Steuerung anschließt.

Je nach Eigenschaften ergeben sich für unterschiedliche Energieflexibilitätsmaßnahmen unterschiedliche Vermarktungsmöglichkeiten. *Tabelle 1* stellt die möglichen Energieflexibilitätsmaßnahmen dar und zeigt, ob diese die Voraussetzungen der unterschiedlichen Märkte erfüllen. Die zeitlich begrenzte Verfügbarkeit, die Leistung und die Speicherkapazität der Energieflexibilitätsmaßnahmen schränken ihren Einsatz zu Zwecken der Netzentgeltreduktion und der Teilnahme an den Regelleistungsmärkten ein.

Tab. 1 Die Energieflexibilitätsmaßnahmen der Factory 56 und die dadurch erfüllten Voraussetzungen der Vermarktungsmöglichkeiten; x: Voraussetzungen erfüllt; (-): Voraussetzungen nicht erfüllt

Vermarktungsmöglichkeit	EFM 1: Elektrischer Speicher	EFM 2: Lüftungsanlage	EFM 3: Ladesäulen
Netzentgeltreduktion: Lastspitzenreduktion	x	x	x
Netzentgeltreduktion: atypische Netznutzung	(-) Minimale Leistung nicht erreichbar	(-) Begrenzte Verfügbarkeit	(-) Begrenzte Verfügbarkeit
Terminmarkt	x	x	x
Spotmärkte	x	x	x
Regelenergiemärkte: Minutenreserveleistung	(-) Minimale Leistung und Speicherkapazität nicht erreichbar	(-) Begrenzte Verfügbarkeit	(-) Minimale Leistung nicht erreichbar und begrenzte Verfügbarkeit

6.3.2 Simulation des Last- und Flexibilitätsmanagements

In *Abbildung 14* werden die aus der Entscheidungsfindung des Last- und Energieflexibilitätsmanagementsystems resultierenden EFM-Einsätze zum Zweck der Lastspitzenreduktion dargestellt. Die Energieflexibilitätsmaßnahmen werden zur Einhaltung des vorgegebenen Leistungsgrenzwerts eingesetzt, wobei als Resultat der Durchführungskosten ihre Einsatzreihenfolge bestimmt wird. Die aggregierte abgerufene Leistung von Energieflexibilitätsmaßnahmen entspricht für jeden Zeitschritt der Differenz zwischen dem vorgegebenen Grenzwert und der Netzbezugslast.

Die Anwendung des Last- und Energieflexibilitätsmanagementsystems im Rahmen von Simulationen ergeben erhebliche Kostenreduktionspotenziale durch die Netzentgeltreduktion und Teilnahme an den Spotmärkten. Dies bestätigt die in Bianchini et al. (2019) erarbeitete Bewertung der Handelsprodukte für die Industrie. Spotmärkte zeigen unter den angenommenen Randbedingungen und der Marktsituation im Jahr 2019 für flexible industrielle Verbraucher das größte Potenzial. Auch zukünftig sind die Netzentgeltreduktion und die Teilnahme an den Spotmärkten mit einem positiven Kosteneinsparungspotenzial für die Mercedes Benz AG zu bewerten: Die zunehmende Volatilität der Marktpreise auf den Spotmärkten sowie die steigenden Netzentgelte unterstützen den bestehenden Trend zur Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Industrie (Bianchini et al. 2021).

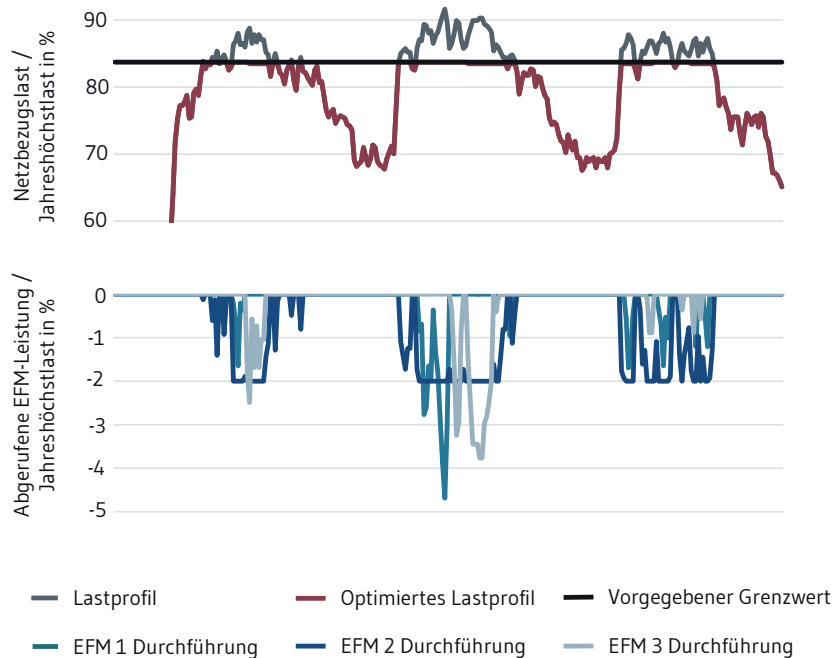


Abb. 14 Durchführung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) zum Zweck der Lastspitzenreduktion

6.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden zwei Beispiele des Last- und Flexibilitätsmanagements vorgestellt, welche die Flexibilisierung von industriellen Fabriken unterstützen.

In der Spritzgießproduktion stehen die Größen Qualität, Quantität und Energie in einer starken Abhängigkeit. Eine Veränderung der Prozessparameter wirkt sich direkt in der Bauteilqualität aus. Dies erschwert die energetische Optimierung über die Prozessparameter. Unterstützen soll hier das entwickelte Simulationstool, das Verhaltensweisen einer Spritzgießmaschine sowie einer gesamten Produktion abbilden kann. Dadurch können verschobene Produktionsstarts geplant und umgesetzt werden.

Die in der Industrie vorhandenen Energieflexibilitätsmaßnahmen gilt es optimal zu steuern. Hierfür wurde mit der Mercedes Benz AG ein Last- und Flexibilitätsmanagementsystem entwickelt, das die Erschließung von Kostenreduktionspotenzialen durch verschiedene Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilitätsmaßnahmen ermöglicht. Die Ergebnisse verdeutlichen den positiven Einfluss der Energieflexibilitätsmaßnahmen auf die Senkung der Produktionskosten.

7 Betriebsoptimierung

Autoren: Weber · Dietrich · Weigold

7.1 Grundlagen

Versorgungstechnische Systeme verursachen nach Panten (2019) in der Regel zehn bis 40 Prozent des gesamten Energiebedarfs einer Fabrik. Bei diesen mediengebundenen Wärme- und Kälteversorgungssystemen handelt es sich häufig um komplexe Systeme aus zahlreichen Energiewandlern, deren Betrieb eng aufeinander abgestimmt ist. Einfache Maßnahmen zur Lastverschiebung innerhalb eines Prozesses lassen sich nur selten finden. Stattdessen muss in Bezug auf Energieflexibilität das System mit seinen zahlreichen Komponenten als Ganzes betrachtet werden. Aufgrund der hohen Komplexität (viele Freiheitsgrade und Abhängigkeiten) ist es für den Menschen praktisch nicht möglich, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten an Strompreissignale angepasste Betriebsstrategien zu ermitteln. Computergestützte Verfahren, die auf Basis von Messdaten das Anlagenverhalten lernen, bieten die Möglichkeit, den Anlagenbetrieb bei schwankenden Strompreisen kostenminimal zu steuern. In den Kosten können neben den Energiebezugskosten für Strom und Gas auch Steuern und Umlagen sowie der Anlagenverschleiß aufgrund der Steuerung der Anlagen berücksichtigt werden.

7.1.1 Zielstellung

Ziel der Betriebsoptimierung eines Verbunds von versorgungstechnischen Systemen (im Weiteren Pooling-Optimierung genannt) ist es, computergestützte Verfahren für den optimierten Anlagenbetrieb zu entwickeln und ihre Einsatzfähigkeit in realen Fabrikumgebungen zu prüfen. Dabei werden die Kosten minimiert, während die Versorgungsqualität aufrechterhalten wird. Zusätzlich wird der Aufwand zum Einsatz des Verfahrens durch die Automatisierung der Modellerstellung verringert. Die Optimierung wurde nicht nur simulativ durchgeführt, sondern auch an realen Anlagen der ETA-Fabrik der TU Darmstadt eingesetzt in Zusammenspiel mit der Prognose der Nutzenergiebedarfe, der Gebäudeautomation sowie Datenanbietern für Wetter und Strompreisprognosen. Das Gesamtsystem ist in *Abbildung 15* dargestellt.

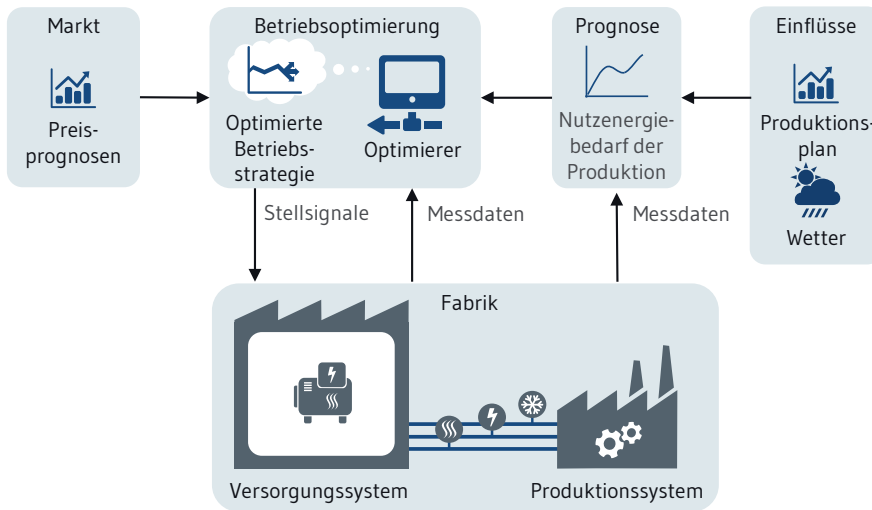


Abb. 15 Aufbau und Datenflüsse zwischen den Systemen zur Nutzenergiebedarfsprognose, Betriebsoptimierung und der Fabrik

Um den Regelkreis der Betriebsoptimierung der versorgungstechnischen Anlagen zu schließen, müssen Daten externer Einflüsse sowie der Systemzustände ermittelt und dem Optimierungsalgorithmus zur Verfügung gestellt werden. Der Algorithmus zur Betriebsoptimierung ist Teil einer als Agent bezeichneten Software, die Aktionen am Energiesystem ausführt und dabei eine vorgegebene Zielfunktion minimiert oder maximiert. Damit die gewählte Betriebsstrategie möglichst vorausschauend gewählt wird, müssen dem Agenten zusätzlich zu den aktuellen Systemzuständen Prognosen über zukünftige Einflüsse auf das zu optimierende System übermittelt werden, z. B. Wetter-, Energiepreis- und Nutzenergiebedarfsprognosen. Die Wetter- und Energiepreisprognosen werden über externe Dienstleister bereitgestellt, wohingegen die Prognosen der Nutzenergiebedarfe unternehmensintern erstellt werden. Dies wird mithilfe eines Service zur automatisierten Erstellung von Nutzenergiebedarfsprognosemodellen ermöglicht.

Der Agent selbst basiert auf einem mathematischen Modell, das das Verhalten des versorgungstechnischen Systems durch eine Reihe von Nebenbedingungen antizipiert. Berechnete Betriebsstrategien müssen alle gestellten Nebenbedingungen der Systeme einhalten (z. B. Temperatur oder Leistungsbeschränkungen). Mit den verbleibenden Freiheitsgraden des zulässigen Lösungsraums wird eine Strategie gewählt, die die Kosten-Zielfunktion minimiert. Diese optimierte Betriebsstrategie wird anschließend in Form der berechneten Stellsignale an die realen Anlagen übertragen und von diesen im versorgungstechnischen System umgesetzt. Hierdurch verändern sich in den nächsten Minuten die Systemzustände (Temperaturen, Drücke oder Anlagenzustände). Diese veränderten

Systemzustände werden nach einem definierten Zeitraum wieder an den Agenten übermittelt und daraufhin die Prognosen aktualisiert, wodurch der Agent eine neue Betriebstrajektorie berechnet und somit auf die veränderten Rahmenbedingungen reagiert. Der Regelkreis wird damit geschlossen.

7.1.2 Technische Anforderungen

Für die reale Umsetzung der Betriebsoptimierung sind Schnittstellen zur Datenübertragung zwischen den verschiedenen Systemen, im Weiteren auch als Microservices bezeichnet, erforderlich. Die Betriebsoptimierung benötigt Schnittstellen zu den Aktoren und Sensoren der Versorgungssysteme sowie Zugriff auf die Wetter-, Nutzenergiebedarfs- und Marktpreisprognosen. Die Nutzenergiebedarfsprognose wiederum benötigt Zugriff auf Wetterprognosen und aktuelle und historische Nutzenergiebedarfe (Abbildung 16). Dafür sind unterschiedliche Kommunikationsprotokolle erforderlich. Zugriffe auf die Sensoren und Aktoren der Fabrik erfolgen über OPC UA und Modbus TCP (Transmission Control Protocol). Die Zugriffe auf die Prognosen und Datenbanken erfolgen über REST-Schnittstellen (Representational State Transfer) im JSON-Format (JavaScript Object Notation).

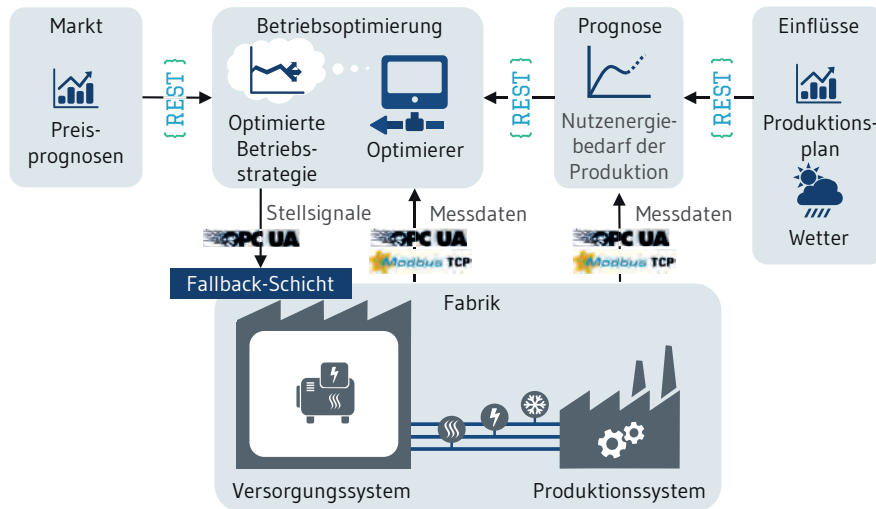


Abb. 16 Schnittstellen der Systeme zur Betriebsoptimierung inkl. Fallback-Schicht

Zur Umsetzung der Schnittstellen wurde softwareseitig in einem Python-Package ein Framework mit Konnektoren entwickelt, welches die Kommunikation über die verschiedenen Schnittstellen innerhalb von Python ermöglicht. Dabei wurde auf Open-Source-Bibliotheken aufgebaut.

Bei der Implementierung sind Anforderungen an die Datenübertragungsrate zu beachten, damit Stellsignale und Systemantworten ausreichend schnell übertragen werden. Da die Betriebsoptimierung im 15-Minuten-Takt durchgeführt wird, sind Datenübertragungsraten kleiner als zehn Sekunden für den Anwendungsfall ausreichend. Dennoch ist zu beachten, dass die Erstellung der Prognosen und deren Übertragung an den Optimierer vor jeder Neuberechnung der Betriebsstrategie erfolgt. Daher spielen die Inferenzzeiten der Prognosemodelle eine wichtige Rolle und sollten ebenfalls im Bereich kleiner als zehn Sekunden liegen.

Eine weitere wichtige Anforderung für den realen Einsatz der Pooling-Optimierung ist die Implementierung einer Fallback-Schicht. Diese stellt sicher, dass durch die Stellsignale des Optimierers keine Systemgrenzwerte überschritten werden und somit die Anlagen nur innerhalb der festgelegten Betriebsgrenzen arbeiten. Die Fallback-Schicht bildet die letzte Instanz vor der Anlagensteuerung. Bei Überschreiten eines Grenzwerts wird automatisch auf die hinterlegte konventionelle Regelstrategie zurückgegriffen und somit das Stellsignal des Optimierers überschrieben. Die Fallback-Schicht wurde ebenfalls in Python umgesetzt.

7.1.3 Umsetzung und Methodik

Die Betriebsoptimierung erfolgt über ein mathematisch formuliertes Optimierungsproblem mit einer Zielfunktion sowie einer Reihe von Nebenbedingungen. Eine potenzielle Lösung des Optimierungsproblems muss zwingend alle formulierten Nebenbedingungen erfüllen. Die verbleibenden Freiheitsgrade können anschließend genutzt werden, um den Wert der Zielfunktion für die gewählte Betriebsstrategie zu minimieren. Hierfür wurde das mathematische Problem als lineares gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem formuliert und anschließend mit entsprechenden Solvern (cplex bzw. glpk) gelöst.

Die für die Betriebsoptimierung erforderlichen Nutzenergiebedarfsprognosen werden datenbasiert auf Grundlage des Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM, *Abbildung 17*) nach Wirth und Hipp (1998) mittels Open-Source-Python-Bibliotheken erstellt. Als Haupteinflussgrößen in Prognosemodellen für den Nutzenergiebedarf von Produktionssystemen werden in der Literatur die vergangenen Lastkurven, Wetterprognosen sowie Daten zur Produktionsauslastung (Produktionsplan oder Schichtplan) verwendet (Walser und Sauer, 2021). Als Trainingsdatensatz ist üblicherweise mindestens ein gesamtes Jahr erforderlich, um die saisonalen Einflüsse eines Jahres abzubilden. Für die Betriebsoptimierung werden die Nutzenergiebedarfe der nächsten zwölf Stunden in einer Auflösung von 15 Minuten bereitgestellt.

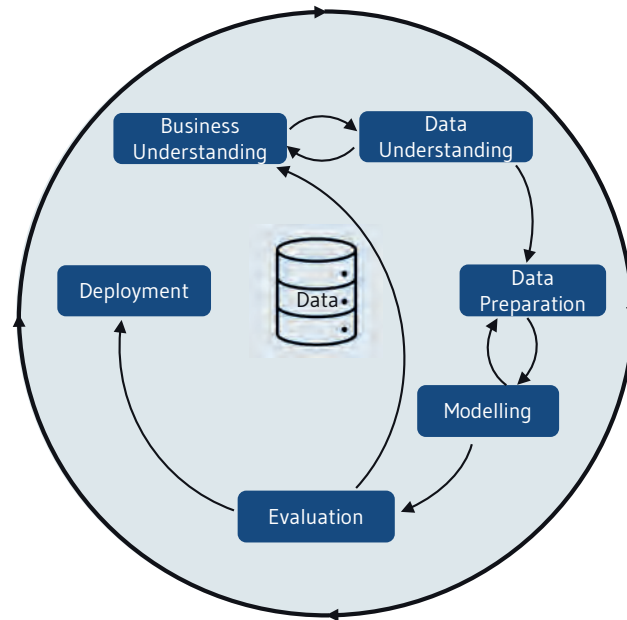


Abb. 17 Phasen des CRISP-DM-Prozessmodells nach Wirth und Hipp (1998)

Nach Festlegung der Prognoseziele (Business Understanding) und erster Analyse der Daten (Data Understanding) liegt der Fokus in der Modellerstellung auf den Schritten Data Preparation, Modeling und Evaluation. Diese Schritte werden über eine Machine-Learning-Pipeline abgedeckt, deren Hyperparameter über einen Optimierungsalgorithmus angepasst werden (Abbildung 18).

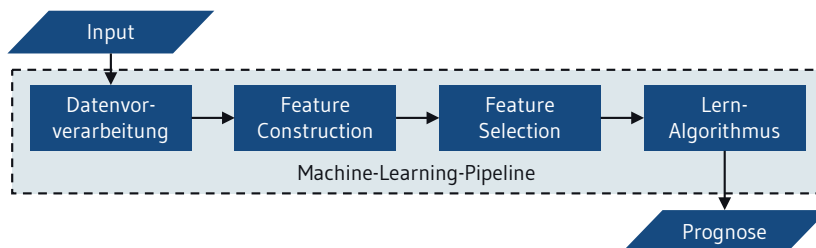


Abb. 18 Machine-Learning-Pipeline zur Prognoseerstellung

Insbesondere werden in der Pipeline unterschiedliche Kombinationen von Algorithmen und deren Hyperparametern zu den Schritten Datenvorverarbeitung (Skalieren, fehlende Werte ersetzen, Ausreißer entfernen), Feature Engineering (zusätzliche Informationen bereitstellen), Feature Selection (Auswahl relevanter Features und/oder Dimensionsreduzierung) und Lern-Algorithmus (Machine-Learning-Algorithmen) getestet und die Kombination mit dem geringsten Prognosefehler nach Bergstra et al. (2011) ausgewählt. Der Prognosefehler wird in Form des normalisierten Mean Absolute Error (nMAE) angegeben:

$$nMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i|}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (1)$$

mit n : Anzahl der Prognosewerte, \hat{Y}_i : Prognosewerte, Y_i : Beobachtungswerte

Zur Evaluation jedes Durchlaufs wird eine Cross-Validation durchgeführt. Das finale Modell wird abschließend anhand eines Testdatensatzes, der im Training und Hyperparameter-Tuning nicht genutzt wurde, evaluiert.

Zur Bereitstellung der Nutzenergiebedarfsprognose für die Betriebsoptimierung (Deployment) wird die Prognoseerstellung als Microservice in einem Docker-Container auf einer virtuellen Maschine im internen Fabriknetz betrieben. Der Prognosevektor wird über eine REST-Schnittstelle im JSON-Format dem Optimierungsservice zur Verfügung gestellt.

7.2 Anwendungsfall

7.2.1 Aufbau des Anwendungsfalls

Die Algorithmen zur Betriebsoptimierung und Prognose werden anhand eines Teilsystems der Versorgungstechnik in der ETA-Fabrik evaluiert (*Abbildung 19*). Der Fokus liegt neben der Erprobung der entwickelten Ansätze am realen System insbesondere das Zusammenspiel der Komponenten (Kommunikation zwischen Betriebsoptimierer, Prognose und realem System).

Es wird gezeigt, dass reale Anlagen direkt über die geschaffene Infrastruktur gesteuert werden können. Konkret werden das Heißwassernetz sowie Teile des Warmwassernetzes der ETA-Fabrik in die Betrachtung einbezogen. Das Heißwassernetz wird über zwei Blockheizkraftwerke und einen Boiler versorgt. Hierfür wird Gas aus dem öffentlichen Gasnetz bezogen und elektrische Energie aus den Blockheizkraftwerken in das Stromnetz eingespeist. Über einen Plattenwärmetauscher wird die thermische Leistung der Wärmeerzeuger vom Heißwassernetz an das Warmwassernetz übertragen. An das Warmwassernetz sind die eigentlichen Energieverbraucher (Büro- und Hallenheizung) angeschlossen, welche es mit Wärme auf einem vorgegebenen Temperaturniveau zu versorgen gilt. Sowohl das Heißwassernetz als auch das Warmwassernetz verfügen über thermische Weichen zur Pufferung der Wärmeleistung. Aufgrund der hybriden hydraulischen Verschaltung von Wärme-

erzeugern und Verbrauchern in Form einer Parallelschaltung zwischen Vor- und Rücklauf kann es zu thermischen Kurzschlüssen zwischen Erzeugern und Verbrauchern kommen. Diese Kurzschlüsse führen dazu, dass die thermischen Weichen nicht durchlaufen werden und sich entsprechend keine homogene Temperatur über die verschiedenen Erzeuger bzw. Verbraucher einstellt. Dies erhöht die Komplexität der Betriebsoptimierung, da die Temperaturen an den Energiewandlern nur schwer prognostizierbar sind. Insbesondere die Wärmeleistung, die über den Wärmetauscher bereitgestellt wird, ist mit einem stochastischen Rauschen belegt.

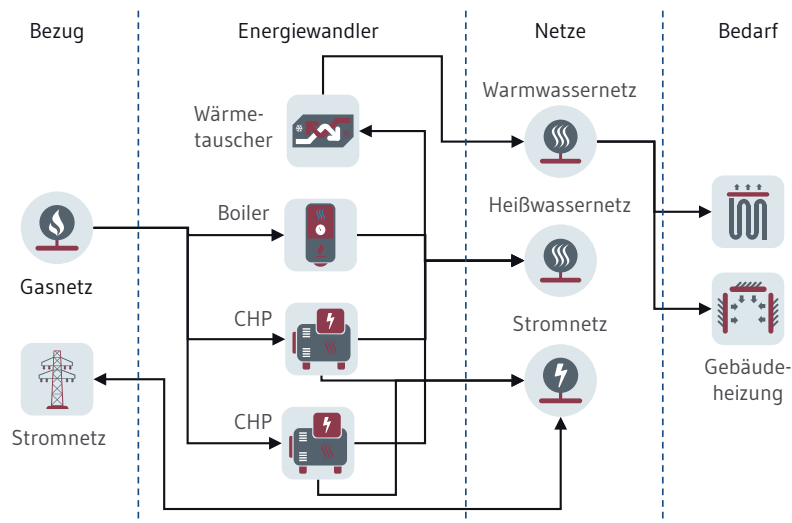


Abb. 19 Wärmeversorgungssystem der ETA-Fabrik

Der Agent zur Optimierung der Betriebsstrategie ist als mathematisches Modell umgesetzt. Dabei werden neun unterschiedliche Modellierungsvarianten des Energiesystems bzw. des jeweiligen Umgangs mit stochastischen Einflussfaktoren evaluiert. Das System wird als lineares gemischt-ganzzahliges Programm modelliert. Ganzzahlige Variablen dienen dabei der Modellierung diskreter Anlagenzustände (z. B. An/Aus). Das Betriebsverhalten der Anlagen wird über eine Linearregression in Abhängigkeit ausgewählter Eingangsgrößen modelliert (Temperaturabhängigkeit, Stellsignal oder Anlagenzustand). Ziel der Linearregression ist die Approximation der über die Energiewandler erzeugten bzw. aufgenommenen Wärmeleistung, der bezogenen Gasleistung der Wärmeerzeuger sowie der elektrischen Leistung der Blockheizkraftwerke. Alle Wärmeleistungen werden anschließend für einen Zeitschritt über die thermische Weiche des jeweiligen Netzes über die Zeit integriert. Über diese Energiebilanz wird die Temperatur innerhalb der thermischen Weiche für die jeweiligen Folgezeitschritte berechnet.

Eine zentrale Nebenbedingung des betrachteten Systems ist die Einhaltung der Grenztemperaturen der Wärmenetze. Die jeweiligen Temperaturgrenzen sind wiederum abhängig von der Außenlufttemperatur. Damit Modellierungsungenauigkeiten nicht zu einer Unterversorgung des Heizungssystems führen, werden die vorgegebenen Grenztemperaturen zusätzlich beschränkt. Ist das erlaubte Temperaturfenster ursprünglich $\pm 5^\circ\text{C}$, wird dem Optimierer lediglich ein Temperaturfenster von $\pm 4^\circ\text{C}$ gewährt, wodurch der Einfluss von Modellierungsungenauigkeiten lediglich zu kleinen Abweichungen der Temperatur ($< 1^\circ\text{C}$) führt und damit die Versorgungsqualität gewährleistet wird. Die engeren Temperaturgrenzen reduzieren allerdings die Freiheitsgrade des Agenten, was zu einem konservativeren und weniger kosteneffizienten Anlagenbetrieb führt.

Eine weitere Variante zum Umgang mit stochastischen externen Einflussfaktoren bietet die lineare gemischt-ganzzahlige stochastische Programmierung, also eine Erweiterung des bestehenden Modells. Hier wird die Unsicherheit hinsichtlich des Systemverhaltens in konkreten Szenarien beschrieben. Szenarien sind in diesem Zusammenhang unterschiedliche Ausprägung der übertragenen Leistung des Wärmetauschers bzw. der Wärmelast, z. B. ein Szenario mit hoher, mittlerer und niedriger Wärmeübertragung bzw. Wärmebedarf. Das Optimierungsergebnis muss im Fall der stochastischen Programmierung so gewählt werden, dass in jedem Szenario, also auch in extremen Szenarien, die Temperaturbeschränkungen eingehalten werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche finden sich in *Abbildung 22*.

Als thermische Last liegen im Beispiel die Fußboden- und die Hallenheizung vor. Diese gilt es mittels der Nutzenergiebedarfsprognose zu modellieren. Beispielhaft ist der Verlauf des thermischen Lastbedarfs der Fußbodenheizung einer Woche im Sommer in *Abbildung 20* gegeben.

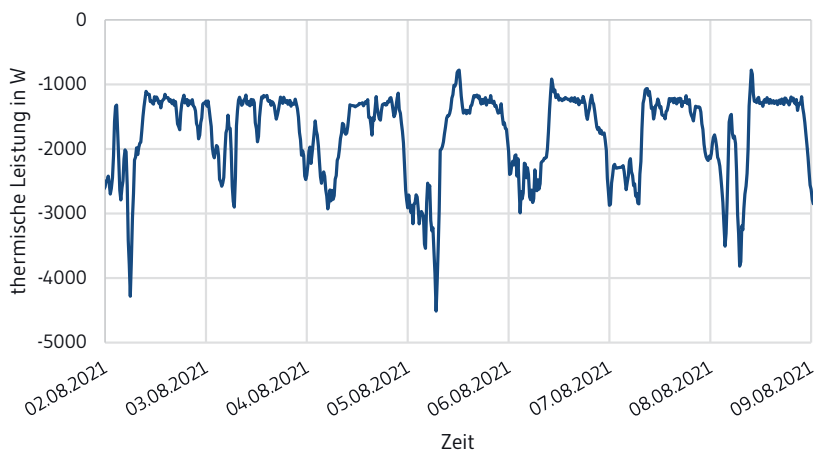


Abb. 20 Thermische Leistungsaufnahme der Fußbodenheizung in einer beispielhaften Woche im Sommer 2021

Als Prognosehorizont sind die nächsten zwölf Stunden festgelegt, wobei die zeitliche Auflösung mit steigendem Prognosehorizont sinkt. So werden für die ersten beiden Stunden Viertelstundenwerte, für die Stunden drei bis zwölf nur noch die Stundenwerte prognostiziert. Zur Modellierung wird ein Multi-Target-Modell antrainiert, das alle Prognosewerte gleichzeitig prognostiziert. Dies hat den Vorteil, dass weniger Modelle antrainiert und betrieben werden müssen. In den Arbeiten von Dietrich et al. (2020) konnte gezeigt werden, dass Multi-Target-Modelle im Vergleich zu Single-Target-Modellen eine ähnlich gute, teilweise sogar bessere Prognosegüte aufweisen.

7.2.2 Ergebnisse

Zur Freigabe der Prognosewerte wird eine REST-Schnittstelle genutzt, über die der gesamte Prognosevektor inkl. Zeitstempel im JSON-Format veröffentlicht und eingelesen werden kann. Die Inferenz des Prognosemodells dauert im Anwendungsfall durchschnittlich $0,91 \pm 0,06$ Sekunden (Mittelwert aus elf Versuchen) und liegt damit im zulässigen Bereich (< 10 Sekunden). Der Prognosefehler des Modells (nMAE) beträgt zwischen 14,8 Prozent (15 Minuten) und 26,3 Prozent (12 Stunden). Eine Darstellung der Prognosewerte einer beispielhaften Woche im Sommer 2021 findet sich in *Abbildung 21*. Als Modell wurde ein rekurrentes neuronales Netz mit einer verdeckten Schicht mit 60 LSTM-Neuronen (Long Short-Term Memory) vom Bayes-Algorithmus ausgewählt.

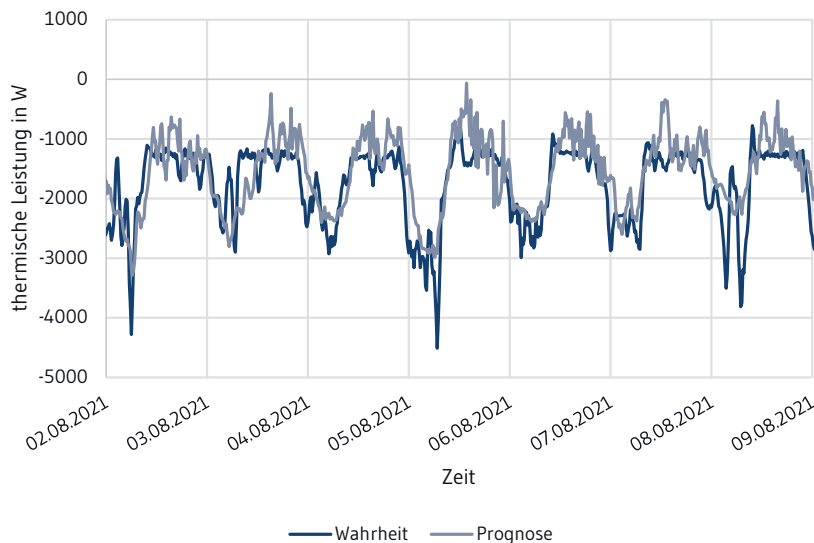


Abb. 21 Messwert und Prognose (12 Stunden) der thermischen Leistung der Fußbodenheizung in einer Woche im Sommer 2021

Die Optimierung des Anlagenbetriebs des Energiesystems der ETA-Fabrik wurde durch eine Reihe von Simulationsdurchläufen mit unterschiedlicher Parametrierung der stochastischen Parameter untersucht. Dabei wurde die deterministische Optimierung auf Basis des Erwartungswerts mit der stochastischen Programmierung verglichen. Die stochastische Programmierung wurde wiederum mit verschiedenen Extremszenarien unterschiedlicher Intensität validiert. Hierfür wurde die thermische Leistung des Wärmetauschers mit einer Leistungsschwankung von $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$ und $\pm 40\%$ in den jeweiligen Szenarien versehen. Anschließend wurden für jeden Versuchsdurchlauf die Kosten sowie die Anzahl an Zeitschritten mit Abweichungen von dem vorgegebenen Temperaturband ermittelt und verglichen.

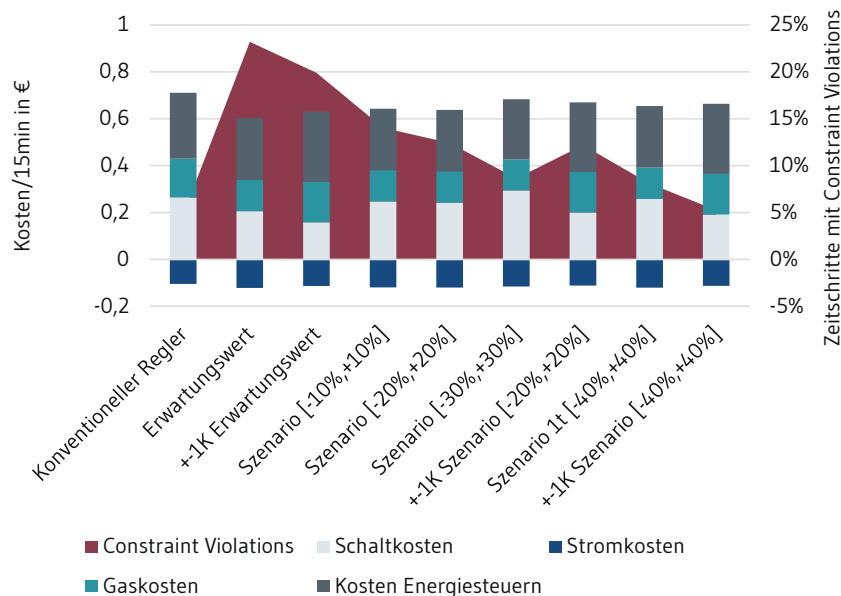


Abb. 22 Auswertung der Verletzungen der Randbedingungen (Constraint Violations) in der Simulation gegenüber den erzeugten Kosten

In *Abbildung 22* ist zu erkennen, dass die Energiekosten durch den Einsatz der stochastischen Programmierung zu insgesamt leicht höheren spezifischen Energiekosten, aber auch zu deutlich geringeren Verletzungen der Randbedingungen (Constraint Violations) führen. Diese Constraint Violations entstehen in diesem Zusammenhang nicht in dem Optimierungsmodell, sondern in dem zu optimierenden Simulationsmodell der ETA-Fabrik. Während die Energiekosten um ca. zehn Prozent steigen, konnte die Anzahl der Constraint Violations um 65 Prozent reduziert werden. Dabei ist anzumerken, dass auch durch den Einsatz der konventionellen Regelung für das Energiesystem Constraint Violations auftreten. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass mit einer Aufweitung der Szenarien die

Anzahl an Constraint Violations abnimmt. Schlussendlich können durch die Kombination der stochastischen Programmierung mit einem engeren Temperaturbereich sowohl eine sicherere Versorgung des Wärmebedarfs als auch niedrigere Energiekosten umgesetzt werden. Die Betriebsoptimierung über den Erwartungswert führt zu den niedrigsten Energiekosten, allerdings auch zu nicht annehmbar hohen Constraint Violations.

Die Betriebsoptimierung in der ETA-Fabrik wurde über das einfacher zu implementierende, deterministische lineare gemischt-ganzzahlige Modell in Kombination mit Soft Constraints umgesetzt (Erwartungswertmodell). Dies lässt sich mit der einfacheren Implementierbarkeit des Verfahrens in die Microservice-Architektur sowie der Robustheit des Verfahrens gegenüber externen Fehlern begründen. Auf die Evaluation der Funktionsfähigkeit der geschaffenen Infrastruktur aus den Microservices zur Betriebsoptimierung, der Prognose sowie der Datenübertragung und Umsetzung auf den realen Anlagen hat die Art des verwendeten Verfahrens keinen Einfluss. Diese Funktionsfähigkeit konnte über mehrere Stunden erfolgreich demonstriert werden.

7.3 Zusammenfassung

Um Energieflexibilitätsmaßnahmen in komplexen versorgungstechnischen Systemen bewerten und umsetzen zu können, wurde in diesem Abschnitt ein Framework vorgestellt, das aus Betriebsoptimierung, Nutzenergiebedarfsprognose und Kommunikationsschnittstellen besteht. Die Betriebsoptimierung dient dabei der Berechnung einer kostenoptimalen Betriebsstrategie der Versorgungsanlagen unter Einbezug von Strompreis- und Lastprognosen sowie der aktuellen Zustände des Systems. Verschiedene Ansätze zum Umgang mit stochastischen Einflussgrößen in der Betriebsoptimierung wurden anhand eines Simulationsmodells getestet und bewertet. Das Erwartungswertmodell zeigte den geringsten Implementierungsaufwand und wurde daher am realen System der ETA-Fabrik der TU Darmstadt zur Validierung der Kommunikationsarchitektur der vorgestellten Microservices angewandt. Das betrachtete System umfasst zwei Wärmenetze und ein Stromnetz mit verschiedenen Energiewandlern und zwei Wärmeverbrauchern. Zur Wärmebedarfsprognose wird eine Machine-Learning-Pipeline verwendet, die die Hyperparameter über einen Bayes-Algorithmus berechnet.

Die Versuche zeigen, dass Betriebsoptimierung und Lastprognose am realen System über mehrere Stunden betrieben und die Anlagen nach der berechneten Betriebsstrategie geschaltet werden können. Das Framework kann daher genutzt werden, um mithilfe von Simulationsmodellen Energieflexibilitätsmaßnahmen an komplexen Versorgungssystemen zu bewerten und über die Kommunikationsschnittstellen an realen Anlagen umzusetzen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Autoren: Lindner · Weigold

Das Kapitel zeigt Werkzeuge und Anwendungsfälle für die energetische Flexibilisierung von Fabriken nach der sechsstufigen Methodik nach VDI (2021). Es wurden Werkzeuge entwickelt, die Industrieunternehmen künftig bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unterstützen und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und ihres Praxisbezugs geprüft.

So stellen die Werkzeuge zur Energieflexibilitätspotenzialanalyse (Schnell-Check-Tool, E-Flex-Scanner, Energieflexibilitätsaudit und Flexibilitätseinsatzplanungstool) Hilfsmittel für eine erste Einschätzung und Bewertung unterschiedlicher Optionen zur energetischen Flexibilisierung der Produktion dar. Darüber hinaus wird mit der Planungsplattform ein Werkzeug zur Unterstützung der detaillierteren Konzeption und Planung von energieflexiblen Kälte- und Wärmeversorgungssystemen von Fabriken zur Verfügung gestellt.

Am Beispiel eines smarten Speicher-Wandler-Systems werden die technischen Herausforderungen und Schritte für eine Umsetzung und Implementierung von identifizierten thermischen Energieflexibilitäten am Beispiel eines Klimaraums aufgezeigt. Ein Praxisbeispiel für die operative Energieflexibilitätsvermarktung liefert die Aluminiumelektrolyse mit einem Energieflexibilitätspotenzial von $\pm 22,5$ MW. Es wird dargestellt, wie eine informationstechnische Befähigung für eine effektive Vermarktung von Energieflexibilitäten in der Industrie realisierbar ist.

Der Einsatz von Energieflexibilitätsmanagementsystemen wird am Beispiel einer Kunststoffproduktion sowie einer Automobilfabrik beschrieben. Dabei zeigt sich, dass durch den effektiven Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen die Produktionskosten maßgeblich gesenkt werden können. Der Aufbau sowie die Funktion eines energieflexiblen, optimierten Betriebs wurde abschließend am Beispiel des Wärmenetzes in der ETA-Fabrik dargestellt. Das Werkzeug kann genutzt werden, um Energieflexibilitätsmaßnahmen an komplexen Versorgungssystemen mithilfe von Simulationsmodellen zu bewerten und über die Kommunikationsschnittstellen an realen Anlagen umzusetzen.

Die erfolgreiche prototypische Anwendung der entwickelten Werkzeuge legt den Grundstein für einen niedrigrschwelligen Einstieg für Firmen bei der Energieflexibilitätsbefähigung von Fabriken. Ausblickend gilt es nun diese Werkzeuge branchenübergreifend einzusetzen, um die Umsetzung der energetischen Flexibilisierung von Fabriken in der Breite zu realisieren.

9 Literatur

- AG ENERGIEBILANZEN E. V., 2021. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken [online]. Verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/ageb_20v_v1.pdf
-
- BERGSTRA, J., R. BARDENET, Y. BENGIO und B. KÉGL, 2011. Algorithms for Hyper-Parameter Optimization [online]. In: 25th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2011): Neural Information Processing Systems Foundation [Zugriff am: 20. November 2011]. Verfügbar unter: <https://hal.inria.fr/hal-00642998/>
-
- BIANCHINI I., F. ZIMMERMAN und A. SAUER, 2019. Chancen der Industrie auf dem Energiemarkt: Strategischer Vergleich der Handelsprodukte [online]. *wt Werkstattstechnik online*, (110), 339–345.
-
- BIANCHINI I., F. ZIMMERMAN, K. TOROLSAN und A. SAUER, 2021. Market Options for Energy-flexible Industrial Consumers, (3rd International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (PEEE 2021)).
-
- BUNDESGESETZBLATT I, 2013. Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI). HOAI [online] [Zugriff am: 30. März 2022]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/
-
- DIETRICH, B., J. WALTHER, M. WEIGOLD und E. ABELE, 2020. Machine learning based very short term load forecasting of machine tools [online]. *Applied Energy*, 276, 115440. ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apenergy.2020.115440
-
- FLUM, D., D. FRANZ, M. SPORLEDER, L. THEISINGER und E. ABELE, 2020. Easer/Easer. A planning tool for energy-optimized refrigeration and heat supply systems [online]. *wt Werkstattstechnik online*, 110(04), 205–208. ISSN 1436-4980. Verfügbar unter: doi:10.37544/1436-4980-2020-04-39
-
- FUHLÄNDER-VÖLKER, D., M. LINDNER und M. WEIGOLD, 2021. Design Method for Building Automation Control Programs to Enable the Energetic Optimization of Industrial Supply Systems [online]. *Procedia CIRP*, 104, 229–234. ISSN 2212-8271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.11.039
-
- GEBHARDT, M., H. KOHL und T. STEINRÖTTER, 2002. Preisatlas: Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung. Duisburg-Rheinhausen.
-
- GRUBER, A.-M., 2017. Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien. Dissertation. München.
-
- HEIMERL, S. und B. KOHLER, 2017. Aktueller Stand der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland [online]. *Praxis Wasserkraft*, (10/2017), 77–79. *Praxis Wasserkraft* [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: https://www.fwt.fichtner.de/userfiles/fileadmin-fwt/Publikationen/WaWi_2017_10_Heimerl_Kohler_PSKW.pdf
-
- KLEINERTZ, B., A. GRUBER, F. VEITENGRUBER, M. KOLB und S. VON ROON, 2019. Flexibility potential of industrial thermal networks through hybridization. In: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT), S. 1–31.
-
- KOHNE, T., H. RANZAU, N. PANTEN und M. WEIGOLD, 2020. Comparative study of algorithms for optimized control of industrial energy supply systems [online]. *Energy Informatics*, 3(S1), 1–19. ISSN 2520-8942. Verfügbar unter: doi:10.1186/s42162-020-00115-7
-
- KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021. E-Flex-Scanner [online]. 14. März 2022 [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/e-flex-scanner>
-

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2022a. Flexibilitätseinsatzplanungstool [online]. 14. März 2022 [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/flexibilitaetseinsatzplanungstool>

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2022b. Schnell-Check-Tool [online]. 10. März 2022 [Zugriff am: 10. März 2022]. Verfügbar unter: <https://schnell-check.synergie-projekt.de/Home>

MATTHES, P., M. FLACH, S. SCHMIED, J. TEICHMANN, D. MÜLLER, F. GLÜCK, J. OPPERMAN, P. MATHIS, T. KNAPP, A. KÜMPEL und M. BARANSKI, 2019. Zukünftige hydraulische Systeme für die Verteilung von Wärme und Kälte in modernen neuen oder sanierten Gebäuden mit unterschiedlichen Abnehmern und Erzeugern. Gemeinschaftlicher Abschlussbericht über alle Teilprojekte.

MODELICA ASSOCIATION, 2020. Functional Mock-up Interface for Model Exchange and Co-Simulation 2.0.2 [online]. Verfügbar unter: <https://github.com/modelica/fmi-standard/releases/download/v2.0.2/FMI-Specification-2.0.2.pdf>

MOOG, D., F. BORST und M. WEIGOLD, 2021. Modulare Simulation bei der energieorientierten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme. In: J. Franke und P. Schuderer, Hg. Simulation in Produktion und Logistik. Göttingen: Cuvillier, S. 51–60. ISBN 978-3-7369-7479-1.

PANTEN, N., 2019. Deep Reinforcement Learning zur Betriebsoptimierung hybrider industrieller Energienetze [online]. Dissertation. Aachen: Shaker. Innovation Fertigungstechnik.

PANTEN, N., H. RANZAU, T. KOHNE, D. MOOG, E. ABELE und M. WEIGOLD, 2020. Simulation und Optimierung kombiniert. Werkstattstechnik online, 110(1/2), 12–17. Werkstattstechnik online.

RÉHAULT, N., M. DANG, M. MITTERHOFER, S. STRATBÜCKER und G. BENNDORF, 2017. Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen (EnEff-BIM).

SEIFERMANN, S., E. ABELE, A. SAUER und et al., 2019. Internationaler ETG-Kongress 2019. S. 191–196.

SIEPMANN, D. und N. GRAEF, 2016. Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: A. Roth, Hg. Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin: Springer Gabler, S. 17–82. ISBN 978-3-662-48505-7.

STEURER, M., 2017. Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Forschungsbericht. Stuttgart.

STROBEL, N., D. FUHLÄNDER-VÖLKER, M. WEIGOLD und E. ABELE, 2020. Quantifying the Demand Response Potential of Inherent Energy Storages in Production Systems [online]. Energies, 13(16), 4161. Energies. Verfügbar unter: doi:10.3390/en13164161

TRISTÁN, A., F. HEUBERGER und A. SAUER, 2020. A Methodology to Systematically Identify and Characterize Energy Flexibility Measures in Industrial Systems [online]. Energies, 13(22), 5887. Energies. Verfügbar unter: doi:10.3390/en13225887

VDI, Hg., 2021. Energieflexibel in die Zukunft – Wie Fabriken zum Gelingen der Energiewende beitragen können. Unter Mitarbeit von A. Bachmann, L. Bank, C. Bark, D. Bauer, B. Blöchl et al. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. Verfügbar unter: doi:10.24406/FIT-N-638765

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE e.V. (VDI). VDI 2073:2014, Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung. Hydraulische Schaltungen. Berlin: Beuth.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE e.V. (VDI). VDI 5200:2011, Fabrikplanung. Planungsvorgehen. Berlin: Beuth.

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

VDI 5207, Blatt 2: Energieflexible Fabrik – Identifikation und technische Bewertung. 2021.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE e.V. (VDI). VDI 6018:2018, Kälteversorgung in der technischen Gebäudeausrüstung Planung, Bau, Betrieb. Berlin: Beuth.

WALSER, T. und A. SAUER, 2021. Typical load profile-supported convolutional neural network for short-term load forecasting in the industrial sector [online]. Energy and AI, 5, 100104. ISSN 26665468. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.egyai.2021.100104

WIRTH, R. und J. HIPPEL, 1998. CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining. In: AAAI Press und Editor: Rakesh Agrawal, Paul Stolorz, Hg. Proceedings of the Fourth International Conference on the Practical Application of Knowledge Discovery and Data Mining, S. 29–39.





B.2

Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung

1 Einleitung

Autoren: Rosemann · Stranzinger · Kleimt · Schumacher · Schmidt

1.1 Betrieb des Elektrostahlwerks

Etwa 30 Prozent des in Deutschland produzierten Stahls wird in Elektrostahlwerken aus recyceltem Stahlschrott in Elektrolichtbogenöfen (LBO) hergestellt. Ihr Strombedarf wird fast vollständig über das öffentliche Stromnetz bezogen und betrug in Deutschland im Jahr 2018 insgesamt ca. 6,7 TWh/a (ohne Walzwerke) bzw. ca. 525 kWh/t Rohstahl (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2021). *Abbildung 1* zeigt eine Ansicht des Elektrolichtbogenofens bei der Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG (DEW) im Werk Siegen. Die Prozesskette der Stahl-Herstellung in einem Elektrostahlwerk ist in *Abbildung 2* dargestellt.



Abb. 1 Ansicht des Elektrolichtbogenofens im DEW-Werk Siegen

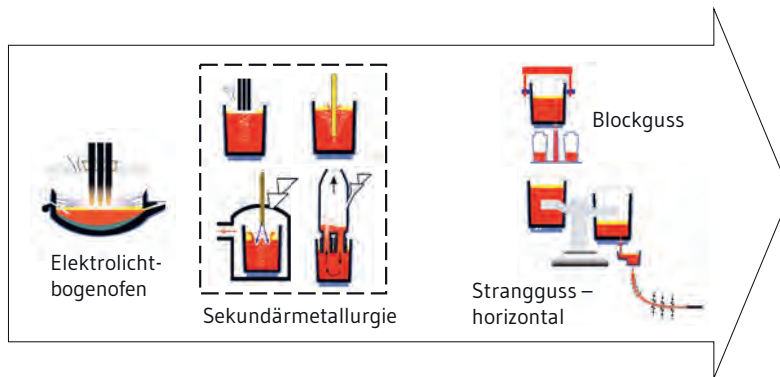


Abb. 2 Prozesskette der Flüssigstahlverarbeitung im Elektrostahlwerk bis zum Vergießen des Stahls

Der Produktionsprozess verläuft diskontinuierlich und am Ende der Prozesskette wird der flüssige Rohstahl in Pfannen der Gießanlage zugeführt und dort zu Blockguss oder Strangguss vergossen. Vor dem Vergießen müssen die Schmelzen oft im Pfannenofen nacherhitzt werden, damit eine zuvor eingetretene Abkühlung kompensiert und die erforderliche Gießtemperatur des Stahls genau eingestellt werden kann. Der Gießanlage sind dann meist mehrere Schmelzen gleicher Qualität nacheinander ohne Unterbrechung zur Verfügung zu stellen.

1.2 Fluktuation des Energiebedarfs

Die Höhe des elektrischen Energiebedarfs des Elektrostahlwerks und seine zeitliche Varianz hängen wesentlich vom Betriebszustand des LBOs und der produzierten Stahlqualität ab. Der Betrieb des LBOs ist in Zeitabschnitte mit gezündetem Lichtbogen (Power-on) und Zeitabschnitte ohne Energiezufuhr (Power-off) zu unterteilen. Power-off-Zeiten ergeben sich sowohl aus den normalen Unterbrechungen des Ofenbetriebs (z. B. zum Beschicken des Ofens mit Schrott) als auch aus ungeplanten Ereignissen (z. B. zur Instandhaltung bzw. aufgrund von Wartezeiten in der Prozesskette). *Abbildung 3* zeigt ein Beispiel für die Varianz der elektrischen Leistung des Stahlwerks bei der Stahlproduktion von »Edelbaustahl«. *Abbildung 3* lässt den dominierenden Einfluss des Elektrolichtbogenofens auf den Strombedarf erkennen. Bei einer Produktion von Edelbaustahl wird eine mittlere elektrische Leistung des Werks in Höhe von 69 MW erreicht; dies ist der geplante 1-Stunden-Mittelwert des Strombedarfs. Tatsächlich verändert sich aber der in den 15-Minuten-Intervallen benötigte Leistungsbedarf zwischen ca. 20 und 112 MW. Dies führt zu einem erheblichen Bedarf an Ausgleichsenergie, die zum Ausgleich zwischen der bestellten und der real benötigten Energie im Bilanzkreis benötigt wird und zu hohen Kosten bereitgestellt werden muss.

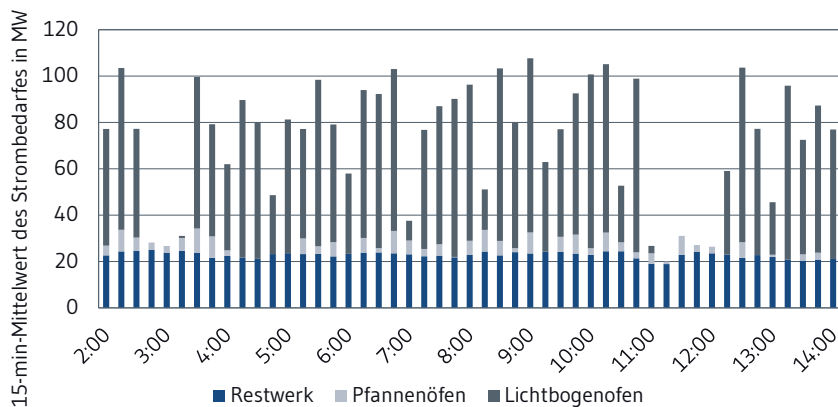


Abb. 3 Zeitlicher Verlauf der Leistung (15-Minuten-Mittelwert) der Hauptanlagen des Stahlwerks Siegen bei Produktion von Edelstahl am 06.02.2019

In *Tabelle 1* sind weitere Kennzahlen einzelner Betriebstage mit Produktion von nichtrostendem Edelstahl (RSH-Stahl) bzw. von Edelstahl gegenübergestellt. Demnach ist bei der RSH-Produktion der mittlere Leistungsbedarf des Werks mit 50 MW etwas geringer als bei Edelstahl.

Tab. 1 Energiekennzahlen von Betriebstagen mit RSH-Stahl und Edelstahl

Kenngrößen des elektrischen Energiebedarfs des DEW-Werks Siegen	RSH-Stahl 06.01.2019	Edelbaustahl 06.02.2019
Gepannter Strombedarf (Basis: 1-Std.-Mittelwerte)		
Mittlere Leistung	50 MW	69 MW
Kumulierter Tagesenergiebedarf	1200 MWh	1656 MWh
Gemessener Strombezug (Basis: 15-Minuten-Mittelwerte)		
Maximale 15-Minuten-Leistung	83,1 MW	112,3 MW
Mittlere 15-Minuten-Leistung	41,6 MW	71,8 MW
Minimale 15-Minuten-Leistung	15,2 MW	20,0 MW
Kumulierter Tagesenergiebedarf	999,3 MWh	1.723,0 MWh
Ausgleichsenergiebedarf (Basis: 15-Minuten-Mittelwerte)		
Kumulierte positive Ausgleichsenergie	+120,3 MWh	+301,6 MWh
Kumulierte negative Ausgleichsenergie	-321,0 MWh	-234,1 MWh
Anteil der Ausgleichsenergie am Strombezug	44,1%	31,1%

Die Beispiele verdeutlichen, dass bei Elektrostahlwerken bei der Herstellung unterschiedlicher Produkte deutliche Unterschiede im Tagesenergiebedarf bestehen können. Eine weitere Reduzierung von Ausgleichsenergie kann daher nur mittels inkrementell verbesserter Planung des Energiebedarfs in 15-Minuten-Intervallen in Verbindung mit zeitnaher Korrektur des Mehr- und Minderbedarfs erzielt werden.

2 Vorhandene Planungsinstrumente

Autoren: Rosemann · Stranzinger · Kleimt · Schumacher · Schmidt

2.1 Monatlicher Produktions- und Energieplan

Die Deutschen Edelstahlwerke produzieren an den Unternehmensstandorten Siegen, Witten, Krefeld, Hagen und Hattingen Edelstahl in unterschiedlichen Qualitäten. Den Standorten sind jeweils bestimmte Schwerpunkte der Produktionsfolge zugeordnet. In den Werken in Siegen und Witten werden Elektrolichtbogenöfen betrieben. *Abbildung 4* zeigt den Strombedarf der im Werk Siegen betriebenen Teilanlagen der Prozesskette.

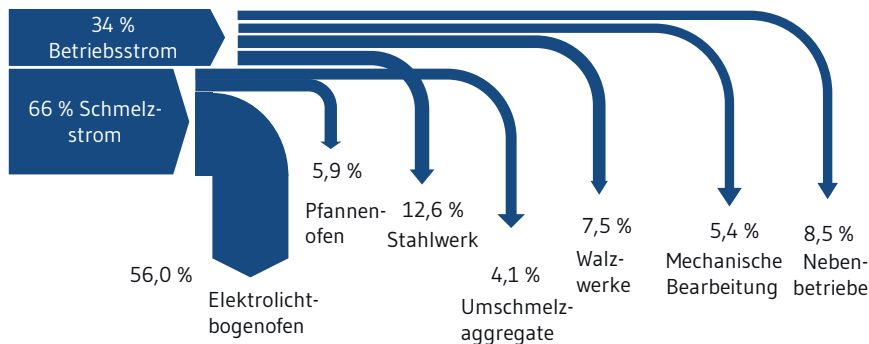


Abb. 4 Prozessschema und Strombedarf der Teilanlagen im Werk Siegen

Der Strombedarf eines Stahlwerks und seine zeitlichen Schwankungen werden maßgeblich von der Betriebsweise des Elektrolichtbogenofens und der Pfannenöfen (PO) bestimmt, die zur Wiedererwärmung der Stahlschmelzen vor dem Vergießen benötigt werden. Die Eckdaten für die Produktion der einzelnen Standorte werden mittels eines ERP-Systems in der Unternehmens- und Auftragsplanung vorgegeben. Anhand dieser übergeordneten Auftragsplanung wird monatlich eine Werksplanung für die Standorte ermittelt. Daraus entsteht eine wöchentliche Programmplanung und anschließend die tägliche Planung in den einzelnen Betrieben. Mithilfe dieser Planungsabläufe wird kontinuierlich angepasst,

- an welchen Tagen produziert wird,
- welche Stahlschmelzen der jeweils benötigten Stahlqualität hergestellt und in welchem Format sie vergossen werden,
- wie viele Schichten (eine bis drei) mit dem jeweils benötigten Fachpersonal der Produktions- und Instandhaltungsabteilung zu besetzen sind,
- wann Stillstände mit einem Kaltfahren der Anlage geplant werden müssen, z. B. zur Reparatur der Feuerfest-Zustellung des Elektrolichtbogenofens.

Die Programmplanung des Stahlwerks berücksichtigt, dass beim Abstich der Schmelze ein Restsumpf an flüssigem Stahl im Ofengefäß verbleibt. Deshalb werden in der Produktionsfolge Schmelzen mit ähnlicher Stahlqualität zu Qualitätsgruppen mit ähnlich hohem Legierungsgehalt zusammengefasst und in einer definierten Reihenfolge (Kampagne) hergestellt. Aktuell wird die monatliche Planung als Grundlage zur Strombedarfsprognose verwendet. Bislang wurde mittels eines Excel-Planungstools der Strombedarf in Stunden-Mittelwerten geplant. *Tabelle 2* zeigt die Übersicht der fünf möglichen Betriebszustände mit drei Qualitätsgruppen, *Abbildung 5* eine exemplarische Energieplanung des Werks Siegen aus dem Mai 2019.

Tab. 2 Betriebssituationen des Stahlwerks als Grundlage der Energieplanung

Nr.	Betriebskampagnen des Elektrolichtbogenofens	Sollwert des Schmelzen-Gewichts in t	Mittlere elektrische Leistung des Werks in MW
1	Stillstand/Bauschicht	Keine Produktion	10
2	An-/Abfahren des LBOs	Keine Produktion	15
3	Produktion von RSH-Stahl	100–105	50
4	Produktion von Edelbaustahl 138	110–116	65
5	Produktion von Edelbaustahl 265	125	69

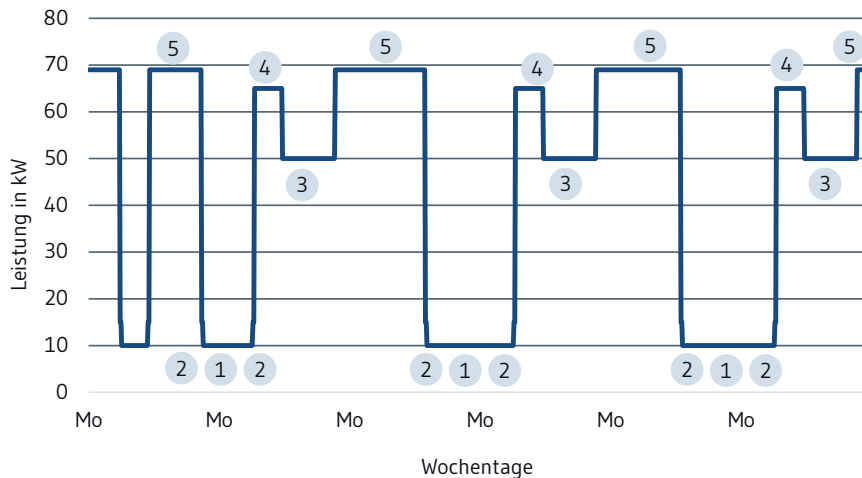


Abb. 5 Energieplanung des Werks Siegen, Mai 2019 (Tabelle 2, Nr. 1–5)

2.2 Ablaufplanung im Stahlwerk

Gegenwärtig wird zur Steuerung des Produktionsablaufs im Stahlwerk ein Softwaretool verwendet, das die Produktionsplanung koordiniert und die Ergebnisse in Form eines Gantt-Diagramms visualisiert. Die Behandlungsfolge der Schmelzen und damit der Standort der Pfannen an den verschiedenen Bearbeitungsstationen im Stahlwerk werden laufend aktualisiert, visualisiert und mit ihrem jeweiligen Zeitbedarf für einen Prognosezeitraum von ca. zwei Tagen dargestellt. Die Reihenfolge der Aufträge wird dabei manuell durch den Planer im System eingegeben. Änderungen der Schmelzenfolge oder des Zeitplans, z. B. nach Störungen, werden zeitnah berücksichtigt. Allerdings erfolgt die Anlagenplanung nach einem statischen Zeitgerüst, das keine Vorausplanung von Wartungsarbeiten zulässt. Eine Schnittstelle zum Energiecontrollingsystem, dem Lastmanagement, der Energieplanung mit dem Energieversorger und zur Vermarktung von Energieflexibilitäten war bislang nicht vorhanden. Die Entwicklung der neuen Software wird in *Kapitel 3* vorgestellt.

2.3 Monatlicher Instandhaltungsbericht

Die Energieflexibilität des Elektrolichtbogenofens wird bislang werksintern dazu genutzt, um

- ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen,
- Wartezeiten in der vor- oder nachgelagerten Prozesskette zu überbrücken,
- die elektrische Leistung des Werks in Zeiten der Spitzenlast zu reduzieren
- oder Umrüstarbeiten an der Anlage durchführen zu können.

Der Einfluss dieser ungeplanten Betriebsunterbrechungen wird in einem Monatsbericht der Instandhaltung bewertet, welcher beispielhaft in *Abbildung 6* gezeigt wird. Darin sind die Unterbrechungen in drei Kategorien unterteilt:

- DT1 – Downtime des LBO: Technische, ungeplante Störungen des LBOs, die eine nicht verschiebbare, sofortige Reparatur zur Behebung der Störung erfordern
- DT2 – Downtime der LBO-Prozesskette: Ungeplante organisatorische Stillstände des LBOs durch vor-/nachgeschaltete Prozessschritte mit Wartezeiten des LBO
- CO – Rüstzeiten (Change Over, CO): Nutzungsnebenzeiten für Umrüstarbeiten.

Abbildung 7 gibt einen Überblick über die Häufigkeit von Betriebsunterbrechungen mit den unterschiedlichen Ursachen entsprechend den Kategorien DT1, DT2 und CO. Im Jahr 2019 sind ungeplante Betriebsunterbrechungen des LBOs von insgesamt 1.085 Stunden entstanden. Davon waren rund 59 Prozent organisatorisch bedingte Stillstände der Kategorie DT2, z. B. Wartezeiten für Arbeitsschritte in vor- oder nachgelagerten Prozessstufen.

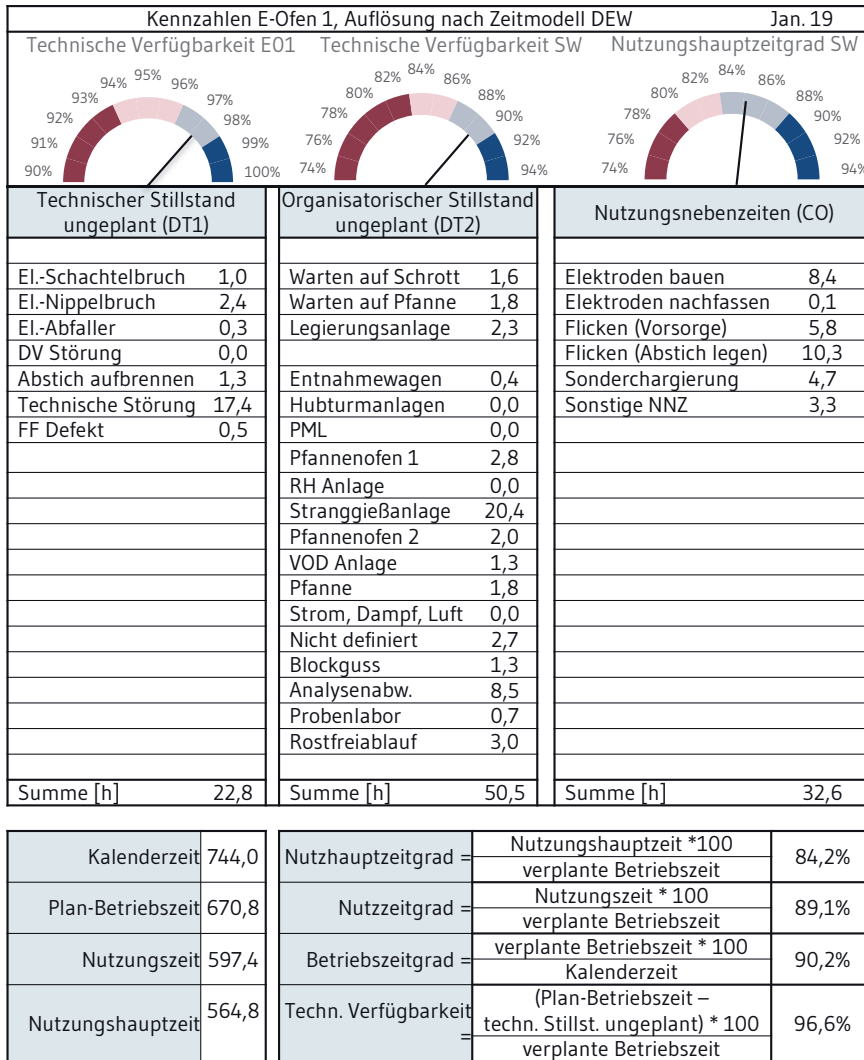


Abb. 6 Monatsbericht der Verfügbarkeit des Elektrolichtbogenofens. DT1: Downtime des LBO; DT2: Downtime der LBO-Prozesskette; CO: Rüstzeiten (Change Over)

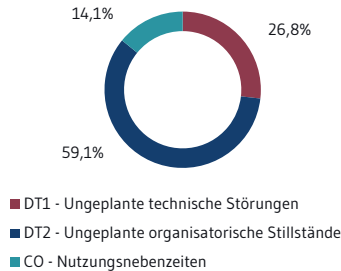


Abb. 7 Betriebsunterbrechungen des Elektrolichtbogenofens bei DEW (2019)

Die Analyse dieser Kennzahlen führt zu weiteren Hinweisen, die möglicherweise eine Verbesserung der Verfügbarkeit der Anlage ermöglichen, z. B. durch

- frühzeitige Berücksichtigung von Informationen aus dem Prozessverlauf,
- gezielte Beseitigung von Engpässen in der Prozesskette und
- Verbesserung der Planbarkeit von Instandhaltungsarbeiten.

Die in *Kapitel 3* vorgestellte Planungssoftware wird diese Überlegungen zur Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit berücksichtigen.

2.4 Lastmanagement

Elektrische Lastspitzen bestimmen die Höhe zu entrichtender Netzentgelte, die wiederum einen maßgeblichen Anteil der Energiekosten darstellen können. Zur Bemessung von Netzentgelten wird neben der bezogenen elektrischen Energie auch die höchste mittlere Leistung in einem 15-Minuten-Intervall herangezogen. Dabei wird jährlich die höchste mittlere Leistung in einem 15-Minuten-Intervall (Jahreshöchstlast) mit einem Leistungspreis multipliziert. Zur Verbesserung des Lastprofils und zur Senkung der Energiekosten wird daher ein Lastmanagement implementiert. Zur wirksamen und schnellen Begrenzung der Lastspitze wird die Energieflexibilität des LBOs genutzt. *Abbildung 8* verdeutlicht, wie sich eine kurzzeitige Leistungsminderung des LBOs auf die Lastspitze des Werks auswirkt.

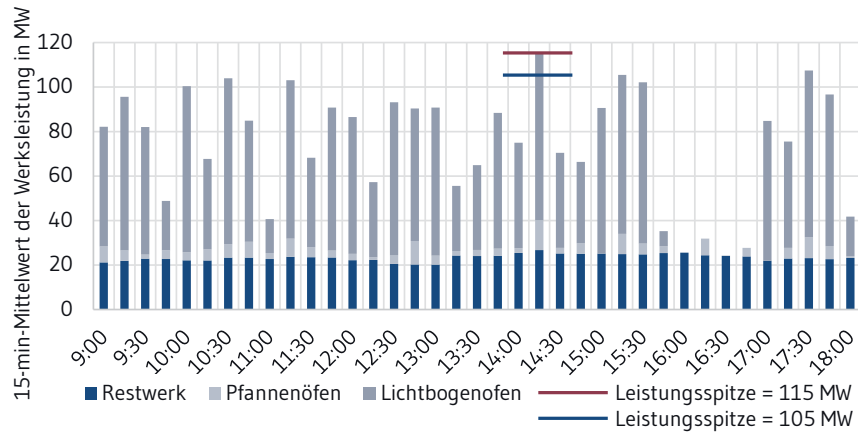


Abb. 8 Beispiel des Lastmanagements im Werk Siegen am 07.03.2019: Reduzierung der Leistungsspitze von Rot (115 MW) auf Blau (105 MW)

In diesem Beispiel wurde um 14:15 Uhr kurzzeitig die Jahreshöchstlast von 115 MW erreicht. Mit einer Lastreduktion um 40 Prozent über ca. fünf Minuten kann die Jahreshöchstlast im 15-Minuten-Intervall um ca. 10 MW auf ca. 105 MW vermindert werden. Bei einem angenommenen Jahresleistungspreis von ca. 70 €/kW bewirkt eine dauerhaft pro Jahr erzielte Absenkung der Jahreshöchstlast um 10 MW eine Verminderung der Netznutzungskosten um ca. 700.000 €/a. Dieses Beispiel verdeutlicht die aktuelle Bedeutung der Nutzung von Energieflexibilität zur Spitzenlastoptimierung eines Elektrostahlwerks.

3 Entwicklung einer neuen Planungsplattform

Autoren: Rosemann · Stranzinger · Kleimt · Schumacher · Schmidt

3.1 Vorbemerkungen und Zielsetzungen

Für eine automatisierte Vermarktung von Energieflexibilität wurde die in *Kapitel B.3* näher beschriebene Energiesynchronisationsplattform entwickelt. Für eine Beteiligung an diesem weitreichenden Schritt in der Automatisierung der Energieflexibilitätsvermarktung sind verschiedene Voraussetzungen in den Prozessabläufen der jeweiligen Unternehmen vorzubereiten. Automationssysteme zur Optimierung der Energieversorgung müssen anwendungsfreundlich sein und den Informationsaustausch und die digitalen Verknüpfungen zwischen dem verfahrenstechnischen Prozess und den Mitarbeitenden gewährleisten, um diese bei den Planungs- und Entscheidungsprozessen unterstützen. Im vorliegenden Beispiel eines Elektrostahlwerks war es als Vorbereitung zur Beteiligung am kontinuierlichen Intraday-Handel und zur Nutzung von Energieflexibilität vor allem notwendig, eine Verknüpfung der Planungsprozesse der Produktion, der Instandhaltung und der Energieplanung herzustellen.

Ein Elektrostahlwerk muss heutzutage in seinem Produktionsablauf sehr flexibel agieren können, um Kundenwünsche und wichtige Anforderungen zeitnah zu realisieren. In Zukunft ist zunehmend damit zu rechnen, dass auch kurzfristig Änderungen der Energiekosten oder der Energieverfügbarkeit entstehen können, die unmittelbar im Produktionsablauf berücksichtigt werden müssen. Schließlich ist zur Herstellung nachhaltiger Produkte zunehmend auf Parameter der Umwelt- und Energieeffizienz zu achten (Colla et al., 2017; Kleimt, 2021; Deutsche Edelstahlwerke, 2020). Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, die Energieflexibilität der eigenen Prozesse und der Betriebsorganisation zu verbessern. Energieflexibilität kann zukünftig dabei helfen, die Herstellungskosten und die CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Stahl zu reduzieren (Rosemann et al., 2020).

Es wurde ein energieflexibles und dem Bedarf des Werks Siegen entsprechendes Organisationsinstrument entwickelt, um kurzfristige Veränderungen der Prozessplanung durchführen zu können und den dadurch veränderten Energiebedarf bedarfsgerecht über den kontinuierlichen Intraday-Handel zu beschaffen. Dabei wurde auch untersucht, wie mit einer optimierten Prozessplanung die Betriebsweise des LBOs besser strukturiert werden kann. Die neu entwickelte Planungssoftware soll die Prozesse im Bereich der Flüssigstahlerzeugung so abbilden, dass eine ausreichend genaue Energieplanung unterstützt wird. Der LBO ist dafür in seiner Verknüpfung mit den Teilanlagen der Sekundärmetallurgie bis zum Vergießen und Erstarren des flüssigen Stahls in der Blockguss- oder Stranggussanlage zu beschreiben, da diese Betriebsbereiche als Prozesskette direkt verknüpft sind. Die Anforderungen der Produktion, der Instandhaltung und der volatilen Energiemärkte sind derart miteinander zu verbinden, dass die benötigte Betriebsbereitschaft bzw. die zeitliche Verfügbarkeit der jeweiligen Anlage gewährleistet bleibt. Mit der Planungssoftware soll zukünftig nach ungeplanten Prozessunterbrechungen eine zeitnahe Anpassung des bereits bestellten Energiebezugs über den kontinuierlichen Intraday-Handel ermöglicht werden.

3.2 Erneuerung der Ablauf- und Energieplanung im Stahlwerk

Die bisher verwendete Software zur Produktions- und Energieplanung wurde hinsichtlich des Datenflusses und der durchgeführten Berechnungsschritte analysiert. *Abbildung 9* zeigt das Strukturdiagramm der bisher genutzten Datenflüsse mit den durchgeführten Berechnungen.

Die rot umrandeten Bereiche kennzeichnen die zusätzlichen Software-Komponenten. Die Energieplanung muss für eine künftige Beteiligung am kontinuierlichen Intraday-Handel verfeinert werden. Bereits aus der Differenz zwischen den bislang in der Planung bestimmten Stunden-Mittelwerten des Strombedarfs und der Ist-Abrechnung in 15-Minuten-Intervallen entstand permanent ein hoher Bedarf an Ausgleichsenergie, der zukünftig durch Bestimmung einer 15-Minuten-Prognose vermieden wird.

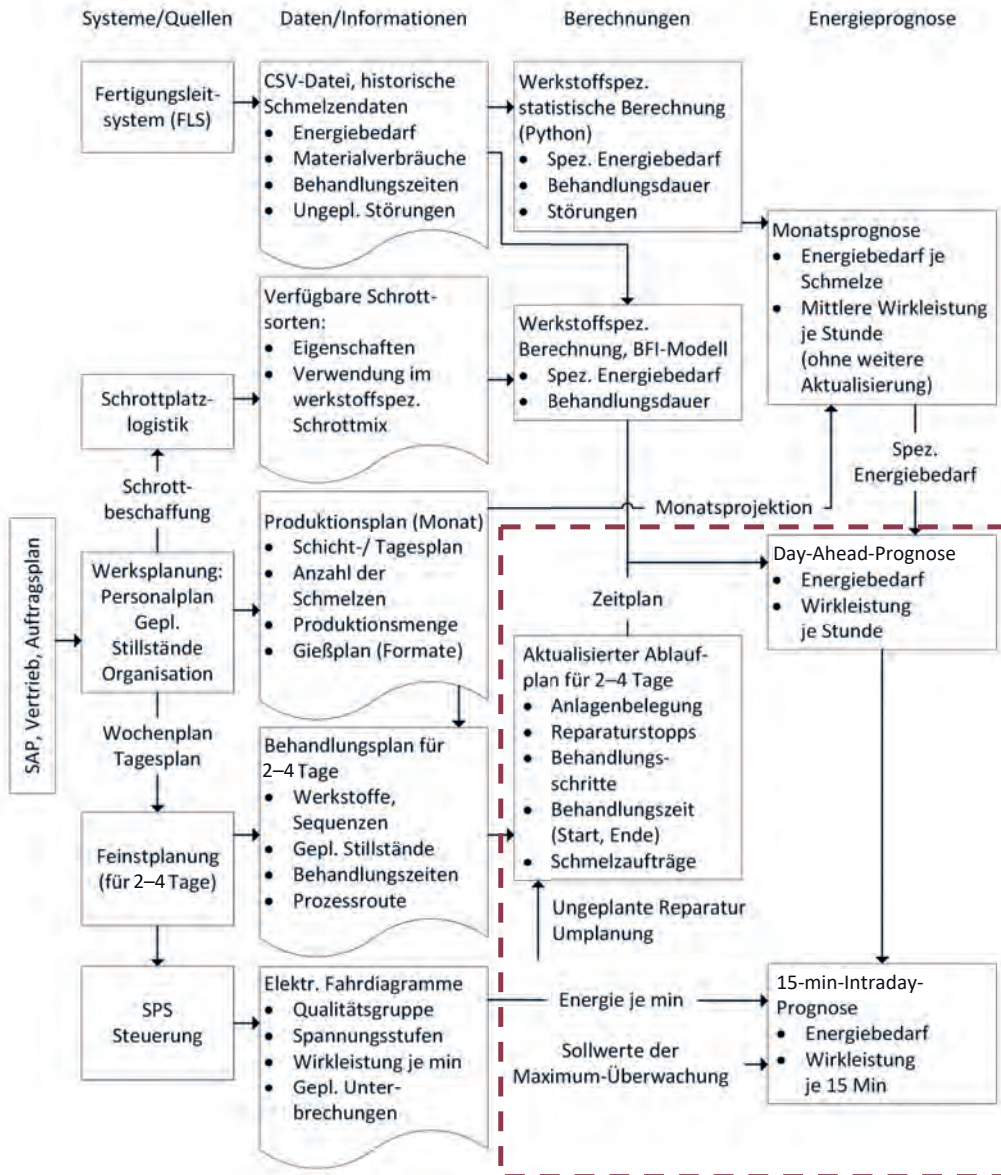


Abb. 9 Strukturdiagramm der Produktions- und Energieplanung im Werk Siegen. Die neu entwickelten Komponenten sind mit einer gestrichelten Linie umrandet

Table 3 gibt einen Überblick über die bisherigen und die neuen Grundlagen der Produktions- und Energieplanung. Neben der Berücksichtigung weiterer Aspekte kommt es besonders darauf an, die Produktions- und Energieplanung zukünftig auf 15-Minuten-Intervalle auszurichten. Dafür sind die Start-/Stopzeiten und die Power-on-Zeiten der einzelnen Schmelzen zu berücksichtigen.

Tab. 3 Zielsetzungen zur Veränderung der Produktions- und Energieplanung

Aufgabe	Traditionelle Planungsgrundlagen	Neue Planungsgrundlagen (Intraday- und 3-Tagesplan)
Produktionsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Monatsplan berücksichtigt Kampagnen von drei Qualitätsgruppen • Manuelle Reihenfolgeplanung der Aufträge erfolgt im Feinstplanungstool • Anlagenplanung nach statischem Zeitgerüst 	Zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> • Tages(feinst)planung mit Auflösung in 15-Minuten-Intervalle • Vermeidung von Wartezeiten des Elektrolichtbogenofens • Dynamische Anlagenplanung durch Algorithmen
Instandhaltungsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Vorausplanung von Wartungsarbeiten möglich • Ungeplante Reparaturen führen zu Stopps des Elektrolichtbogenofens 	Zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> • Geplante Reparaturstopps werden im Monatsplan berücksichtigt • Verbesserte Prognose von Wartungsstillständen
Energieplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Kampagnen von drei Qualitätsgruppen • Händische Energieplanung je Schicht und Stunden-Mittelwerten • Keine Berücksichtigung von Marktpulsen (Strompreis, CO₂) 	Neu: <ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von Künstlicher Intelligenz (KI) • Energieplanung je Schmelze mit Start-/Stopzeiten und 15-Minuten-Mittelwerten • Automatische Erstellung und Aktualisierung der Energieplanung • Energieflexible Lastoptimierung der 15-Minuten-Intervalle • Berücksichtigung aktueller Strompreise und des CO₂-Emissionsfaktors von Strom • Beteiligung am kontinuierlichen Intraday-Handel • Eigene Nutzung bzw. Vermarktung von Energieflexibilität

- In der **Produktionsplanung** wird zukünftig der Prozessablauf unter Berücksichtigung verschiedener Nebenbedingungen mit Algorithmen so optimiert, dass Wartezeiten des LBOs weiter vermindert werden.
- Bisher wurden in der **Instandhaltungsplanung** Reparaturstopps nicht im Voraus geplant. Erst in der Tagesplanung wurden Verschiebungen durch ungeplante Stillstände erfasst (*Kapitel 2.3*). Zukünftig werden absehbare Unterbrechungen so früh wie möglich in der Planung berücksichtigt und eingefügt.
- In der **Energieplanung** soll die benötigte elektrische Leistung des Werks künftig nicht mehr nur als Stunden-Mittelwert, sondern auch je 15-Minuten-Intervall im Voraus bestimmt werden. Das setzt voraus, dass für den LBO die Startzeit der Schmelze, ihre Qualitätsspezifikation, der spezifische Energiebedarf sowie der qualitative Verlauf der Power-on- und Power-off-Zeitabschnitte ggf. in einem sortenspezifischen Fahrtdiagramm festgelegt wird und zur Extrapolation des Energiebedarfs einer Schmelze zur Verfügung steht. Im Ergebnis ist dann für die nächsten 15-Minuten-Sequenzen die elektrische Leistung des Standorts zu prognostizieren, die erfahrungsgemäß zwischen 15 und 110 MW betragen kann. Dies ermöglicht ggf. auch frühzeitige Korrekturen der Spitzenlast.
- Auch eine künftige Nutzbarkeit von **Energieflexibilität** soll mit der erneuerten Planungssoftware unterstützt werden. So können z. B. bei eigener Nutzung der Energieflexibilität der Umfang und der Zeitpunkt des Energiebedarfs optimiert werden. Für eine externe Bereitstellung von Energieflexibilität ist zum jeweiligen Zeitpunkt die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme zu überprüfen.

Die bisher im Stahlwerk eingesetzte Software zur Planung des Prozessablaufs wurde auf Basis dieser Zielsetzungen erneuert und erweitert. Die Datenstruktur und die Informationsflüsse der Software wurden mit zusätzlichen Parametern auf die neuen Anforderungen ausgerichtet. Für die Produktionsplanung werden künftig intelligente Methoden mit Optimierungsalgorithmen verwendet, mit denen zahlreiche prozess- und produktionsrelevante Nebenbedingungen erfasst und in der Planung berücksichtigt werden können. Dadurch kann eine optimale Auslastung der Anlagen mit zuverlässiger sowie zielgerichteter Reihenfolgeplanung der Schmelzen erzielt werden. Zur Digitalisierung der Prozessbeschreibung sind verschiedene Teilaufgaben zu bearbeiten sowie Abhängigkeiten zu berücksichtigen, die größtenteils nur automatisiert verarbeitet werden können, z. B.:

- Berücksichtigung der physikalischen und metallurgischen Voraussetzungen bzgl. des spezifischen Energiebedarfs zum Einschmelzen von Schrott im LBO und Gruppierung von Stahlqualitäten
- Beachtung vorgegebener Temperaturanforderungen für die nacheinander durchzuführenden Behandlungsschritte der Schmelze
- Berücksichtigung von zusätzlichen Prozessparametern wie Liefertermine, Rüstzeiten, Stillstands- und Transportzeiten im Stahlwerk

Das Konzept beinhaltet bzgl. der Datenverarbeitung u. a. folgende Schritte:

- Übertragung der Auftrags- und Stammdaten aus dem ERP-System (SAP)
- Aktualisierung der Auftragsdaten und der aktiven Aufträge durch Live-Daten unter Einbeziehung von Störungen sowie Zwischenfällen
- Anwendung eines Planungs- und Optimierungsalgorithmus, der die Abhängigkeiten zwischen den Aufträgen und den Anlagen analysiert und optimierte Lösungen entwickelt
- Bestimmung der Fertigungsplanung für einen Prognosezeitraum von ca. einer Woche mit Darstellung der Ergebnisse in einem Gantt-Diagramm
- Erstellung von transparenten, statistischen Auswertungen und Rücksendung der Daten an das ERP-System (SAP)

Darauf aufbauend wird im nächsten Schritt die Energiebeschaffung des Werks auf eine Beteiligung am kontinuierlichen Intraday-Handel umgestellt.

3.3 Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs

Der Prozessverlauf und der elektrische Energiebedarf des Elektrolichtbogenofens wurden im Verlauf des Vorhabens für unterschiedliche Stahlqualitäten genauer analysiert. Mittelwerte wichtiger Prozessgrößen wurden differenziert nach der Qualität der produzierten Stahlsorten betrachtet. Der spezifische elektrische Energiebedarf eines Ofens wird mit einem von Köhle (2002) und Kleimt (2016) entwickelten empirisch-statistischen Modell nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\frac{W_R}{kWh/t} = 375 + 400 \cdot \left[\frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 80 \cdot \frac{G_{DRI/HBI}}{G_A} - 50 \cdot \frac{G_{Shr}}{G_A} - 350 \cdot \frac{G_{HM}}{G_A} + 1000 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0,3 \cdot \left[\frac{T_A}{^\circ C} - 1600 \right] + 1 \cdot \frac{t_s + t_n}{min} - 8 \cdot \frac{M_G}{m^3/t} - 4,3 \cdot \frac{M_L}{m^3/t} - 2,8 \cdot \frac{M_N}{m^3/t} \quad (2)$$

Der mit diesem Modell ermittelte elektrische Energiebedarf W_R des LBOs kann mit den realen Daten des Elektrolichtbogenofens verglichen werden, um z. B. die energetische Effizienz der Anlage bewerten zu können. Die speziellen Faktoren der o. g. Gleichung sind für ausgewählte Stahl-Qualitätsgruppen anzupassen, um den spezifischen elektrischen Energiebedarf W_R für verschiedene Qualitätsgruppen zu ermitteln und für eine detailliertere Energiebedarfsprognose zu hinterlegen. *Tabelle 4* und *Abbildung 10* fassen die Ergebnisse der bisher durchgeführten Auswertungen für den Elektrolichtbogenofen zusammen.

Tab. 4 Prozessparameter des Elektrolichtbogenofens des Werks Siegen für repräsentativ ausgewählte Stahlschmelzen aus 2019

Variable	Anzahl Schmelzen	Energiebedarf W_R	Energieverbrauch	Abstichgewicht G_A	Übereinsatz	Schlackenbildner G_Z
Einheit	–	kWh/t	kWh/t	t	kg/t	kg/t
Wert	472	479,9	482,3	133,6	1.100,5	35,3

Variable	Abstichtemperatur T_A	Power-on-Zeit t_S	Power-off-Zeit t_N	Lanzen- O_2 M_L	Satz- u. Blaskohle
Einheit	°C	min	min	m ³ /t	kg/t
Wert	1.699,6	55,0	33,2	19,7	17,0

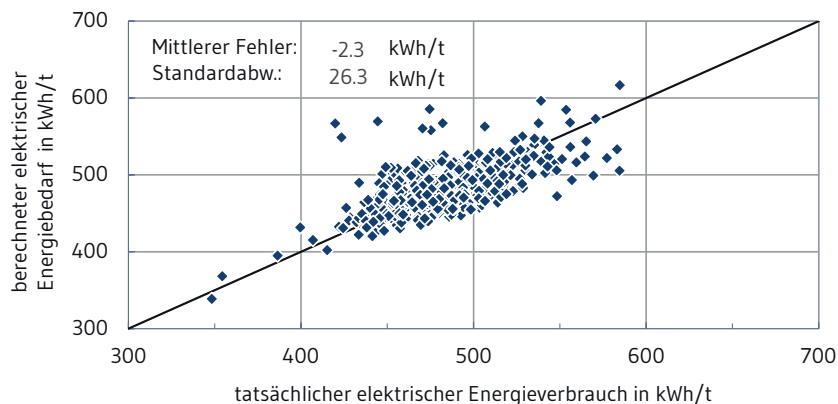


Abb. 10 Berechneter elektrischer Energiebedarf im Vergleich zum tatsächlichen Verbrauch eines Elektrolichtbogenofens für ausgewählte Stahlschmelzen aus 2019

3.4 Nutzung von Energieflexibilität

Der Elektrolichtbogenofen ist das zentrale Aggregat eines Elektrostaahlwerks. Er bestimmt maßgeblich die Taktfolge der Einzelprozesse in der Flüssigstahlverarbeitung und kann gezielt für Energieflexibilitätsmaßnahmen genutzt werden. Die Energieflexibilität des Elektrolichtbogenofens wurde bisher meist nur genutzt, um kurzfristig auf ungeplante Anforderungen im Bereich der Produktion oder der Instandhaltung reagieren zu können. Zukünftig soll die Energieflexibilität der Anlage auch zur Verringerung der Energiekosten des Anlagenbetriebs eingesetzt werden. Die gegenwärtig angewandten bzw. vorbereiteten Energieflexibilitätsmaßnahmen werden in *Tabelle 5* erläutert. Die

Maßnahmen Nr. 1 und 2 zeigen, dass sowohl der Start als auch die Reihenfolge der Produktionskampagnen verschoben als auch die Anzahl innerhalb einer Qualitätsgruppe verändert werden können.

Tab. 5 Energieflexibilitätsmaßnahmen des Elektrolichtbogenofens im Werk Siegen

Nr.	Flexibilitätskategorie nach VDI 5207 Blatt 1	Beschreibung der Maßnahme am LBO	Grund für den Flexibilitätsabruf
1	Produktionsstart verschieben	Ofen bleibt kalt, z.B. über 1 bis 8 h (ggf. länger) vor einem Kampagnenstart, oder wird vorzeitig angefahren	Produktion, Energie, Instandhaltung
2	Produktionsreihenfolge ändern	Anzahl der Schmelzen in einer Qualitätsgruppe verändern (Beim Wechsel der Qualitätsgruppe ändert sich die Leistung.)	Produktion, Energie, Instandhaltung
3	Auftrag unterbrechen oder Start verschieben	Schmelzverlauf wird durch Unterbrechung oder durch Wartezeiten verändert	Produktion, Energie, Instandhaltung
4	Prozessparameter anpassen	Elektrische Leistung des LBOs wird zeitweise reduziert	Produktion, Energie
5	Bivalent betreiben	Elektrische Leistung des LBOs mit Seitenbrennern reduzieren	Produktion, Energie

Im laufenden Betrieb des Elektrolichtbogenofens kann der Startzeitpunkt einer Schmelze oder der Verlauf durch Unterbrechung der Schmelze verändert werden (Nr. 3). Auch eine Anpassung der Leistungsparameter des Prozesses ist möglich (Nr. 4). Zusätzlich soll mit dem zeitweiligen Betrieb der geplanten, gasbefeuerten Seitenbrenner auch ein bivalenter Betrieb des Elektrolichtbogenofens ermöglicht werden (Nr. 5).

Nach einer Verschiebung der betrieblichen Einsatzzeit des Elektrolichtbogenofens ist eine Korrektur der geplanten Strombeschaffung für den aktuellen Tag und die Folgetage erforderlich. Diese Korrektur kann für den laufenden Tag z.B. über den kontinuierlichen Intraday-Handel durchgeführt werden. Deshalb werden entsprechende Änderungen in der Software zur Prozessplanung implementiert, mit denen die erforderlichen technischen und organisatorischen Voraussetzungen für eine weitestgehend automatisierte Informationsverarbeitung geschaffen werden. So wird die Bereitstellung von Energieflexibilität unterstützt. Einzelne Parameter des Energieflexibilitätsdatenmodells (EFDM) sind nachfolgend in *Tabelle 6* aufgeführt.

DEW beabsichtigt, die Spitzenlastoptimierung künftig noch flexibler zu gestalten und neben dem Elektrolichtbogenofen und den Pfannenöfen auch andere Aggregate des Werks daran zu beteiligen. Dafür sind die Flexibilitäten und Randbedingungen dieser Anlagen noch genauer zu untersuchen.

Tab. 6 EFDM-Parameter von Energieflexibilitätsmaßnahmen am Elektrolichtbogenofen

Nr.	Maßnahme	Umfang	Aktivierung	Abrufdauer	Leistung	Elektrische Energie
1	Produktionsstart verschieben	1 Std.	1 d	1 h	50 MW	± 50 MWh
2	Produktionsreihenfolge ändern	1 Schmelze mehr/weniger	2 h	1–2 h	± 15–44 MW	± 26 MWh bis ± 76 MWh
3	Auftragsstart verschieben oder Auftrag unterbrechen	1 Schmelze	15 min	5 min	27–45 MW	2,3–3,8 MWh
4	Prozessparameter anpassen	40% elektr. Leistung	15 min	5 min	30 MW	2,5 MWh
5	Energiebivalenter Betrieb	10% elektr. Leistung	1 h	15 min	2,7–4,5 MW	0,7–1,1 MWh

3.5 Ermittlung des 15-Minuten-Forecasts

Im 15-Minuten-Forecast wird zukünftig der minutliche Lastverlauf während der Herstellung einer Schmelze geplant. Dafür ist eine zeitlich differenzierte Bestimmung des Energiebedarfs erforderlich. Die zusätzlich benötigten Informationen über den Lastverlauf während einer Schmelze werden als Sollwert in der Prozesssteuerung des Elektrolichtbogenofens hinterlegt. Einzelne Parameter der Kennlinien variieren je nach Produktgruppe der erzeugten Stahlqualität. *Abbildung 11* zeigt ein Beispiel für den Verlauf der Mittelwerte des typischen Lastverlaufs mehrerer Schmelzen einer Produktgruppe.

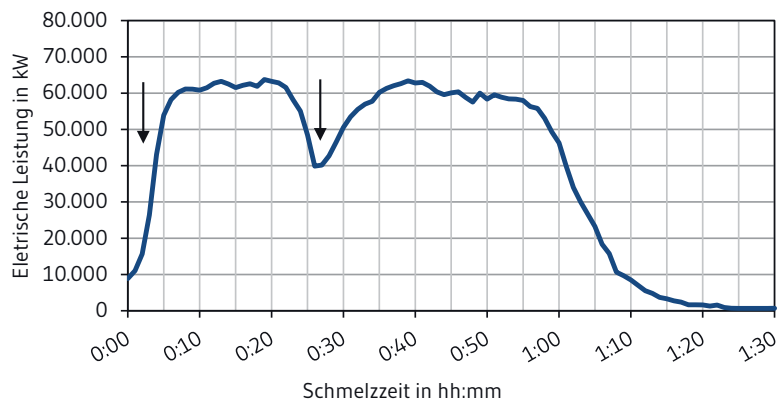


Abb. 11 Mittelwerte des Lastverlaufs einer Produktgruppe pro Minute (ohne Störungen)

Der in *Abbildung 11* dargestellte Lastverlauf wurde über eine Korrektur von Betriebsdaten ermittelt, indem reale Zeitverläufe um ungeplante Unterbrechungen des Elektrolichtbogenofens korrigiert wurden. Zukünftig werden mittels Künstlicher Intelligenz (KI) fortlaufend aus historischen Daten der Produktion bzw. des Strombedarfs einzelner Produktgruppen in Verbindung mit den als Sollwerten in der Prozesssteuerung hinterlegten Kennlinien sowie der aktualisierten Produktionsplanung des Stahlwerks neue Prognosen des Energiebedarfs in den nächsten 15-Minuten-Intervallen erstellt. *Abbildung 12* zeigt ein Konzept des Datenflusses für die künftige Energiebedarfsprognose und -beschaffung.

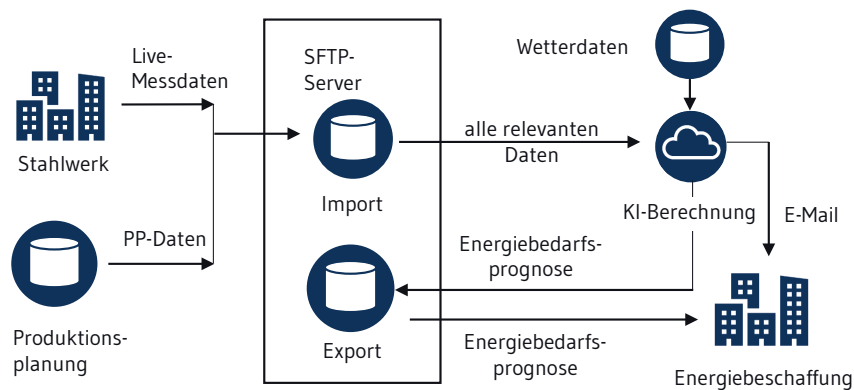


Abb. 12 Konzeptionelle Darstellung des Datenflusses und Prognosemodells

Nach erfolgreicher Prognoseberechnung übersendet das System das Ergebnis der 15-Minuten-Intervalle als .csv-Datei an den SFTP-Server (Export) oder per E-Mail direkt an die Energiebeschaffung oder weitere Nutzer.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die am Beispiel eines Elektrostahlwerks beschriebene Entwicklung einer neuen Planungsplattform die Grundlage schafft für eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Planungsprozesse unter Berücksichtigung von Energieflexibilität. Somit wird eine optimierte und automatisierte Vermarktung vorhandener Energieflexibilitätspotenziale ermöglicht.

4 Decision-Support-Tool zur Prüfung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Rosemann · Stranzinger · Kleimt · Schumacher · Schmidt

Energieflexibilitätsmaßnahmen am Elektrolichtbogenofen führen zu Eingriffen in den Prozessablauf der Flüssigstahlverarbeitung. Bei der Entscheidungsfindung im vollkontinuierlichen Anlagenbetrieb muss das Personal unterstützt werden. Angesichts der Komplexität der Datenanalyse sind dafür

verschiedene Prüfungen möglichst so weit zu automatisieren, dass Entscheidungen schnell getroffen werden können. Hierfür soll ein geeignetes Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt werden, das an die beschriebene Planungsplattform (*Kapitel 3*) angepasst werden kann.

Vor einer Anwendung von Energieflexibilitätsmaßnahmen sind aktuelle Randbedingungen in der Organisation, der Produktion und an den Energiemärkten daraufhin zu prüfen und zu bewerten, ob die Voraussetzungen zur Anwendung der Energieflexibilitätsmaßnahme vorliegen. Dies betrifft:

- **Sicherheit:** Muss für das Betriebspersonal und den Prozess gewährleistet bleiben.
- **Wirtschaftlichkeit:** Gesamtkosten bzw. Erlöse sollen weiter verbessert werden.
- **Nachholbarkeit:** Produktionsausfälle sollen nachholbar sein, Liefertermine dürfen nicht gefährdet werden.
- **Freigabe:** Produktionsleitung soll final über die Freigabe entscheiden können.

Nach der grundsätzlichen Freigabe einer Energieflexibilitätsmaßnahme muss sie in der Gesamtplanung berücksichtigt werden. Das erfordert folgende Festlegungen:

- **Zeitraum:** Ab wann und bis wann kann Energieflexibilität (ggf. auch wiederkehrend) bereitgestellt werden?
- **Intern/Extern:** Wann wird Energieflexibilität extern benötigt und wann kann sie intern genutzt und bereitgestellt werden?

Schließlich sind im Verlauf der Energieflexibilitätsanwendung konkrete mögliche Wechselwirkungen im Prozess zu beachten. Hierzu zählen:

- **Personalplanung:** Vor längeren Produktionsverschiebungen ist eine Abstimmung mit dem Personal über die veränderten Arbeitszeiten erforderlich.
- **Energiebedarf:** Kann durch Auskühlung der Anlagen ansteigen, Nebenaggregate müssen ggf. zur Kühlung etc. weiter betrieben werden.
- **Instandhaltung:** Prüfung auf vorzeitigen Verschleiß bei zusätzlichen Lastwechseln
- **Produktqualität:** Qualitätsmängel am Produkt müssen unterbunden werden.
- **Verriegelung:** Gegen Wiedereinschalten während der Bereitstellung von Energieflexibilität
- **CO₂-Emission:** Künftig werden die spezifischen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung zu bestimmten Zeitpunkten noch stärker zu beachten sein (Zachmann und Seifermann, 2021).

Die genannten Aspekte sollen zukünftig bei der Bereitstellung von Energieflexibilität möglichst strukturiert und automatisiert berücksichtigt werden, damit dem Produktionspersonal und der Betriebsleitung zeitnah die relevanten Daten und Informationen über den Prozessverlauf, relevante Energiemärkte und über Aspekte der Wirtschaftlichkeit zur Verfügung stehen.

5 Literatur

COLLA, V., KLUNG, J.-S., BADELLA, S., PRAOLINI, S., TOSATO, S., ROSEMANN, H., DE MIRANDA, U., KLEIMT, B., BARAGIOLA, S., ALONSO, A., CIRILLI, F., UNAMUNO, I., IVASHECKIN, P., MATINO, I., 2017: *Environmental impact evaluation and effective management of resources in the EAF steelmaking (EIRES)*. La Metallurgia Italiana 10/2017, S. 48–58. ISBN 978-92-79-77020-3.

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE SPECIALITY STEEL GMBH & CO. KG, 2020: *Green Steel Der Weg zu mehr Nachhaltigkeit* [online]. Witten: Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. [Zugriff am 06.10.2021]. Verfügbar unter: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/2020-03-20_Flyer_Green_Steel_DE.pdf

KLEIMT, B., DETTMER, B., HAVERKAMP, V., DEINET, T., TASSOT, P., 2021: *Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz der Stahlerzeugung im Lichtbogenofen*. Chemie Ingenieur Technik 84, Nr. 10, S. 1714–1724.

KLEIMT, B., 2016: *Energetische Modellierung des Lichtbogenofen-Prozesses*, Seminar: Elektrotechnik des Lichtbogenofens, Stahlakademie, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf.

KÖHLE, S., 2002: *Recent improvements in modelling energy consumption of electric arc furnaces*. Proceedings of 7th European Electric Steelmaking conference, Venice, Italy, 26–29 May 2002, p.1.305 – 1.314.

MARCHIORI, F., BELLONI, A., BENINI, M., CATENI, S., 2019: *Integrated dynamic energy management for steel production (DYNERGYSteel)*. Publication of the European Union. ISBN 978-92-79-98335-1.

ROSEMANN, H., PIETRUCK, R., QUECK, A. und S. MÖHRING, 2020: *SynErgie, Flexibilitätsperspektiven für die Stahl- und Eisenindustrie*. FKZ 03SFK3PO, [Schlussbericht], Düsseldorf.

WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL, 2021: *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2020/2021*. Düsseldorf.

ZACHMANN, B. und SEIFERMANN, S., 2021: *CO₂-Vermeidungspotential beim Einsatz von Maßnahmen industrieller Nachfrageflexibilität*. 12. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. IEWT.





B.3

Integration der Flexibilitätsvermarktung

Management Summary

Die Energiesynchronisationsplattform adressiert den gesamten Prozess des automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zu den Vermarktungsservices. Sie stellt somit das übergeordnete Gesamtkonzept eines digitalen Ökosystems dar, welches industrielle Nachfrageflexibilität ermöglicht. Die Energiesynchronisationsplattform besteht dabei aus unternehmensindividuellen Unternehmensplattformen und einer zentralen Marktplattform. Der Marktplattform kommt die Rolle der Servicevermittlung zu. Dies ermöglicht es, auf Veränderungen innerhalb der Services bzw. der Marktplattform schnell reagieren zu können. Im vorliegenden Kapitel werden beispielhafte Services der Unternehmens- und Marktplattformen beschrieben. Zudem wird ein Überblick über die Referenzabläufe für den Betrieb und die Vermarktung von Energieflexibilität gegeben. Die Prozesse werden anhand eines möglichen Anwendungsfalls dargestellt. Außerdem wird das weiterentwickelte Energieflexibilitätsdatenmodell vorgestellt und anhand von vier Klassen beschrieben. Zur Bedrohungsanalyse im Kontext der IT-Sicherheit werden Threat Models (Bedrohungsmodelle) angewandt und auf Basis verschiedener Sicherheitslevels vorgestellt. Darüber hinaus werden Rollen- und Rechedefinitionen beschrieben und Anforderungen an die IT-Sicherheit abgeleitet. Eine Kurzvorstellung entwickelter Demonstratoren schließt das Kapitel ab.

Autoren

Ahrens, Raphael
 raphael.ahrens@fit.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik
 FIT
 Schloss Birlinghoven, 53754 Sankt Augustin

Köberlein, Jana
 info@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Bank, Lukas
 lukas.bank@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Kalchschmid, Vincent
 vincent.kalchschmid@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Oeder, Andreas
 andreas.oeder@iis.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
 Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen

Schlereth, Andreas
 andreas.schlereth@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Grigorjan, Arthur
 arthur.grigorjan@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Kaymakci, Can
 can.kaymakci@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Schel, Daniel
 daniel.schel@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Bauer, Dennis
 dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Schulz, Fabian
fabian.schulz@ipa.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung IPA
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Lodwig, Ragnar
ragnar.lodwig@ipa.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung IPA
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Bauernhansl, Thomas
thomas.bauernhansl@ipa.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung IPA
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Sauer, Alexander
alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Lindner, Martin
m.lindner@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Weigold, Matthias
weigold@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Schulz, Julia
julia.schulz@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Schöpf, Michael
michael.schoepf@uni.lu
SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
Trust, University of Luxembourg
Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

van Stiphoudt, Christine
christine.vanstiphoudt@uni.lu
SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
Trust, University of Luxembourg
Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

Fridgen, Gilbert
gilbert.fridgen@uni.lu
SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
Trust, University of Luxembourg
Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

Potenciano Menci, Sergio
sergio.potenciano-menci@uni.lu
SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
Trust, University of Luxembourg
Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

Winter, Christian
christian.winter@softwareag.com
Software AG
Uhlandstraße 12, 64297 Darmstadt

Schimmelpfennig, Jens
jens.schimmelpfennig@softwareag.com
Software AG
Altenkesseler Straße 17, 66115 Saarbrücken

1 Einleitung

Autoren: Schlereth · Bauer · Bauernhansl

1.1 Einordnung und Motivation

Um die vorhandene Energieflexibilität energieintensiver Industrieprozesse nutzbar zu machen, ist neben deren technischer Befähigung ein entsprechendes Markt- und Stromsystem sowie insbesondere eine Automatisierung durch Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) notwendig. Die IKT nimmt dabei eine Schlüsselrolle bei der Verbindung der Produktion und Produktionsinfrastruktur mit dem Markt- und Stromsystem ein (Bauer et al., 2021). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine effektive und effiziente Energieflexibilitätsvermarktung sowie bidirektionale Informationsflüsse, auch über Unternehmensgrenzen hinweg, von und zum Markt- und Stromsystem zu definieren und damit die klassische Automatisierungspyramide zu erweitern (Körner et al., 2019). Weil es diverse beteiligte Stakeholder gibt, muss das Zusammenspiel verschiedener Services für eine effektive und effiziente Energieflexibilitätsvermarktung koordiniert und darauf aufbauend die Automatisierung und Standardisierung des gesamten Prozesses zur Energieflexibilitätsvermarktung vorangetrieben werden (Seitz et al., 2019; Bauernhansl et al., 2019).

Traditionell haben Industrieunternehmen die Beschaffung von Strom als einen unidirektionalen Prozess verstanden. Die erforderliche Menge an Strom für einen meist längerfristigen Zeitraum wird hierbei an einem bestimmten Stichtag und zu einem festen Preis beschafft (Maier et al., 2017). Jedoch sind in den letzten Jahren die Preise an den Strommärkten sehr viel volatil geworden. Für Unternehmen, die ihren Stromverbrauch flexibel an Marktpreise anpassen, können sich bei einem Wechsel von festen Strompreisen zur flexiblen, kurzfristigen Beschaffung auf den Strommärkten wirtschaftliche Vorteile ergeben. Die Identifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen, deren technische und wirtschaftliche Bewertung sowie die anschließende Vermarktung stellen dabei eine Herausforderung für Unternehmen dar (Strbac, 2008). Gründe dafür sind unterschiedliche Zielsetzungen bei der Nutzung und Vermarktung von Energieflexibilität und ein stark divergierender Grad des Energieflexibilitätspotenzials vorhandener Produktionsmaschinen (VDI 5207 Blatt 2).

Dies führt nicht nur zu einem Interesse an Intermediären wie etwa Aggregatoren, die Unternehmen bei der Vermarktung von Energieflexibilität unterstützen, sondern auch an Dienstleistern für Entscheidungsunterstützungssysteme. Auf diese Weise können bei der Strombeschaffung wirtschaftliche Chancen durch Nutzung von Energieflexibilität wahrgenommen, zugehörige Risiken begrenzt und administrative Aufwände reduziert werden (Lübbecke et al., 2016). Für die Integration unternehmensinterner IKT-Systeme und neuer Services, aber auch für die Kommunikation mit und Integration von externen Partnern rücken zunehmend IKT-Plattformen in den Fokus (Roesch et al., 2019). Bauernhansl et al. (2019) beschreiben mit der Energiesynchronisationsplattform eine Plattform für die Automatisierung und Standardisierung der Energieflexibilitätsvermarktung hinsichtlich ihrer Funktionalität und Architektur, der damit einhergehenden Interoperabilität, des Datenschutzes und der Datensicherheit sowie des Wettbewerbs zwischen Services. Die Energiesynchronisationsplattform wird in den nachfolgenden Kapiteln weiter ausdetailliert und mit ihrer Referenzarchitektur, dem Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM), Prozessen und Informationsflüssen, IT-Sicherheit sowie Demonstratoren dargestellt.

1.2 Ziele der Energiesynchronisationsplattform

Das Ziel der Energiesynchronisationsplattform (ESP) ist es, durch den Aufbau eines Plattformökosystems den gesamten Prozess des Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zu den Vermarktungsservices zu automatisieren und zu standardisieren. Hierfür ist insbesondere die Integration von Energieflexibilitätsmaßnahmen im Sinne von Demand Response (DR) in die Produktionsplanung und -steuerung des Industrieunternehmens notwendig.

Bei der Energiesynchronisationsplattform handelt es sich nicht um eine Plattform im Sinne einer als Software implementierten Plattform. Die Energiesynchronisationsplattform umfasst viel mehr als übergeordnetes Konzept die Interaktion zwischen den beiden Teilplattformen Unternehmensplattform (UP) und Marktplattform (MP). Sie umfasst Rahmenbedingungen, Schnittstellen, Datenmodelle, Stakeholder und Sicherheitsaspekte und bildet den gesamten Prozess des automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zu Vermarktungsservices ab. Abhängig von den Gegebenheiten können die Rollen der Unternehmen jederzeit flexibel angepasst werden (Bauernhansl et al., 2019; Schott et al., 2018; Bauer et al., 2017). Diese Eigenschaften bieten einen deutlich höheren Funktionsumfang und ein höheres Informationsangebot als aktuell bestehende Plattformen (Roesch et al., 2019).

Für die Energiesynchronisationsplattform wurde ein durchgängiges Konzept entwickelt, einschließlich des Daten- und Informationsflusses von der Maschine bis zu Vermarktungsservices, die beispielsweise durch Aggregatoren bereitgestellt werden. Den Kern der ESP stellen Services dar, die Daten verarbeiten, aggregieren, miteinander austauschen und Energieflexibilität bewerten und bereitstellen. Insbesondere wurden für den optimalen Betrieb der energieflexiblen Fabrik eine Vielzahl an Optimierungsservices entwickelt. Das Konzept der ESP sieht dabei Erweiterungsmöglichkeiten für verschiedene Energieträger vor, auch wenn der Fokus eindeutig auf elektrischer Energie liegt. Um den Mehrwert der automatisiert gehandelten Energieflexibilität für Industrieunternehmen sowie Teilnehmer der Energiemärkte aufzuzeigen, wurden verschiedene Demonstratoren konzipiert, entwickelt und umgesetzt. Sie werden im Forschungsumfeld sowie – gemeinsam mit Industrieunternehmen und Netzbetreibern – im industriellen Umfeld und der Energieflexiblen Modellregion Augsburg genutzt. IT-Sicherheit muss bei allen Konzeptions- und Umsetzungsschritten eines Systems in adäquatem Maß bedacht sowie bei allen logischen und physischen Bestandteilen des Systems implementiert und im operativen Betrieb aufrechterhalten werden. Zur Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus, d. h. insbesondere auch zur Minimierung des Risikos beim Betrieb der Plattformen und zur Abwehr von potenziellen Angriffen auf und über die Plattformen, wurden deshalb verschiedene technische und organisatorische Sicherheitsmaßnahmen definiert.

Die technische Umsetzung der Energiesynchronisationsplattform bildet die Grundlage für eine echtzeitnahe Synchronisation flexibler Industrieprozesse mit dem volatilen Stromangebot und damit volatilen Preisen. Abhängig vom konkreten Ziel der Umsetzung von Energieflexibilität können Unternehmen Einsparungen durch die Reduzierung der Strombeschaffungskosten und/oder der Netzentgelte sowie weiterer Umlagen erzielen oder Erlöse durch das Anbieten von Energieflexibilität für Dritte generieren (z. B. als Systemdienstleistung). Von zentraler Bedeutung für die Akzeptanz und den Erfolg des Konzepts sind die Wirtschaftlichkeit der Energieflexibilität für die Unternehmen sowie

die technischen Aspekte des Schutzes sensibler Unternehmensdaten, denen im Rahmen der Konzeption der ESP eine besondere Bedeutung zukommt. Die zentralen Erfolgsfaktoren für eine Erhöhung der Akzeptanz sind die Harmonisierung und Standardisierung des erforderlichen Datenmodells und der Schnittstelle zum sicheren Datenaustausch zwischen Industrieunternehmen und den Vermarktungsservices.

2 Referenzarchitektur

Autoren: Potenciano Menci · Winter · Schimmelpfennig · Schlereth · Schel · Bank · van Stiphoudt · Schöpf · Grigorjan · Schulz · Ludwig · Köberlein · Bauer · Fridgen

2.1 Energiesynchronisationsplattform

Basierend auf den in *Kapitel 1.2* genannten Zielen und Visionen der Energiesynchronisationsplattform (ESP) wird im Folgenden die Referenzarchitektur dieser Plattform mit ihren Teilplattformen Unternehmensplattform (UP) und Marktplattform (MP) vorgestellt. Die Aufteilung der ESP in die beiden Teilplattformen UP und MP grenzt spezifisches Domänenwissen und Technologien und Methoden voneinander ab, ohne den potenziellen Betrieb und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu beeinträchtigen (Bauer et al., 2017; Schott et al., 2018). Die Architektur der beiden Teilplattformen wird in *Kapitel 2.2* und *Kapitel 2.4* vorgestellt. Eine ausführliche Darstellung wird von Menci et al. (2021) gegeben.

Für das Ziel, den Handel von Energieflexibilität zu automatisieren, ist neben der Architektur der Teilplattformen auch deren Interaktion und die Zusammenarbeit mit externen Serviceanbietern zu berücksichtigen. Die beteiligten Akteure lassen sich dabei den Kategorien Industrieunternehmen, Plattformbetreiber und Serviceanbieter zuordnen. Das übergeordnete Zusammenspiel zwischen beiden Teilplattformen bzw. den verschiedenen Stakeholdern in dem digitalen Ökosystem der ESP ist in *Abbildung 1* dargestellt. Es ergeben sich die folgenden drei Kommunikationsbeziehungen:

- Kommunikation zwischen **Serviceanbieter** und **Marktplattform** zur Serviceveröffentlichung und zur Vermittlung bei der Buchung eines Service
- Kommunikation zwischen **Unternehmen** und **Marktplattform** zur Servicesuche und zur Vermittlung bei der Buchung eines Service
- Kommunikation zwischen **Unternehmen (via Unternehmensplattform)** und **Service** für die Nutzung eines Service



Abb. 1 Übergeordnetes Zusammenspiel von Marktplattform, Unternehmensplattform (UP) und Serviceanbietern

Die Serviceanbieter bzw. die bereitgestellten Services sind dabei über eine lose Kopplung mit der Markt- bzw. der Unternehmensplattform verbunden (McGovern et al., 2003). Dies wird durch eindeutig definierte Schnittstellen dieser beiden Plattformen und der Services gewährleistet. Das bedeutet, dass wenige Abhängigkeiten zwischen Serviceanbieter und Marktplattform bzw. zwischen Service und Unternehmensplattform bestehen. Dies hat den Vorteil, dass z. B. bei Veränderungen innerhalb eines Service nicht zwangsläufig Anpassungen beim Servicenutzer, also dem Unternehmen bzw. seiner Unternehmensplattform, vorgenommen werden müssen.

Damit ein Unternehmen über seine Unternehmensplattform einen externen Service nutzen kann, muss dieser über die verschiedenen verfügbaren Services und Serviceanbieter informiert werden. Das Unternehmen kann dazu das auf der Marktplattform registrierte Serviceangebot durchsuchen. Sollte das Unternehmen einen Service finden, der seinen Bedürfnissen entspricht, kann der entsprechende Service über die Marktplattform gebucht werden. Diese nimmt die Buchung entgegen und informiert den Serviceanbieter darüber. Der Serviceanbieter generiert einen Application Programming Interface (API) Key für das Unternehmen, damit dieser den gebuchten Service mittels seiner UP abrufen kann. Dieses Zusammenspiel von Unternehmensplattform, Marktplattform und Serviceanbieter wird als Service-Broker-Architektur bezeichnet (Tsai et al., 2007). Die Kommunikation zwischen der UP und dem Service findet dann ohne Einbezug der Marktplattform in den Kommunikationsweg statt.

2.2 Marktplattform

Die Marktplattform ist eine der beiden Teilplattformen innerhalb der Energiesynchronisationsplattform. Sie kann als multilaterale Plattform bezeichnet werden, da sie mehrere unabhängige Parteien miteinander verbindet (Roesch et al., 2019). Diese Parteien bieten flexibilitätsorientierte Services an bzw. nutzen diese. Beispiele für solche Services sind Prognoseservices, Energieflexibilitätshandels-services von Aggregatoren sowie Services für lokalen Energieflexibilitätshandel. Sie können von jeder interessierten Partei angeboten werden. Einzelheiten zu den entwickelten und über die Marktplattform vermittelten Services sind *Kapitel 2.3* zu entnehmen. Die Marktplattform konzentriert sich auf Industrieunternehmen, die Energieflexibilitätsmaßnahmen vermarkten und als Nutzer der Plattform und deren angebotenen Services auftreten.

Die Marktplattform fungiert als Vermittlungsplattform zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern und verfolgt dabei zwei Hauptziele. Das erste Ziel ist die Herstellung eines einfachen, aber effektiven ersten Kontakts zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern. Als erste Anlaufstelle bietet die Marktplattform den Industrieunternehmen die Möglichkeit, sich über Services zu informieren (Welche Services gibt es? Was macht der Service? Welche Anforderungen sind für die Nutzung des Service zu erfüllen?) und solche zu identifizieren, die für das Industrieunternehmen von Interesse sein könnten. Das zweite Ziel der Marktplattform besteht darin, Werkzeuge für die standardisierte Kommunikation und Interaktion zwischen den Services und den Industrieunternehmen bereitzustellen. Zudem ermöglicht die Marktplattform eine Interaktion und Vernetzung zwischen Services untereinander, sodass Services andere Services nutzen können (Value Co-Creation). Mit diesen Zielen wird die Realisierung einer multilateralen Plattform angestrebt, die Industrieunternehmen eine Möglichkeit bietet, relevante Services zu identifizieren und zu vergleichen sowie mit den jeweiligen Serviceanbietern einen Kontakt herzustellen.

Für ein ganzheitliches Verständnis ist es notwendig, spezifische Aspekte zu nennen, die von der Marktplattform nicht abgedeckt werden. Die Marktplattform legt beispielsweise nicht fest, welche Art von Service sich mit ihr verbinden. Dennoch muss ein Serviceanbieter die Registrierung seines Service bei der Marktplattform beantragen, um diesen über die Marktplattform anbieten zu können. Der Serviceanbieter ist auch für den Betrieb des Service verantwortlich. Das bedeutet, dass die Marktplattform die Services nicht selbst anbietet, sondern nur deren Vermittlung. Nach der initialen Kontaktherstellung über die Marktplattform findet die weitere, technische Kommunikation direkt zwischen Unternehmensplattform und Service statt. Durch diese Form der Architektur soll ein Kommunikationsflaschenhals vermieden werden. Da die Kommunikation von Energieflexibilität nicht über die Marktplattform abgebildet wird, kann die Einstufung der Marktplattform als kritische Infrastruktur zur Bündelung bzw. Steuerung elektrischer Leistung ebenfalls vermieden werden (BSI, 2021). Dennoch ist es möglich, dass andere Teile der Energiesynchronisationsplattform als kritische Infrastruktur eingestuft werden können.

Im Rahmen der Marktplattform gibt es vier Hauptakteure, die zu berücksichtigen sind:

- Der **Betreiber der Marktplattform** konzentriert sich auf den Betrieb und die Überwachung der Marktplattform.
- **Serviceanbieter** registrieren ihre Services auf der Marktplattform und können andere Services in Anspruch nehmen.
- **Industrieunternehmen** verfügen über die tatsächlichen Energieflexibilitätspotenziale und sind über ihre jeweilige Unternehmensplattform die Hauptnutzer von Services.
- **Weitere Servicenutzer** sind Unternehmen, die mit einem Service interagieren könnten, z. B. ein Netzbetreiber.

Die Interaktion von Industrieunternehmen und Serviceanbietern mit spezifischen Komponenten der Marktplattform zeigt *Abbildung 2* in einer vereinfachten Form.

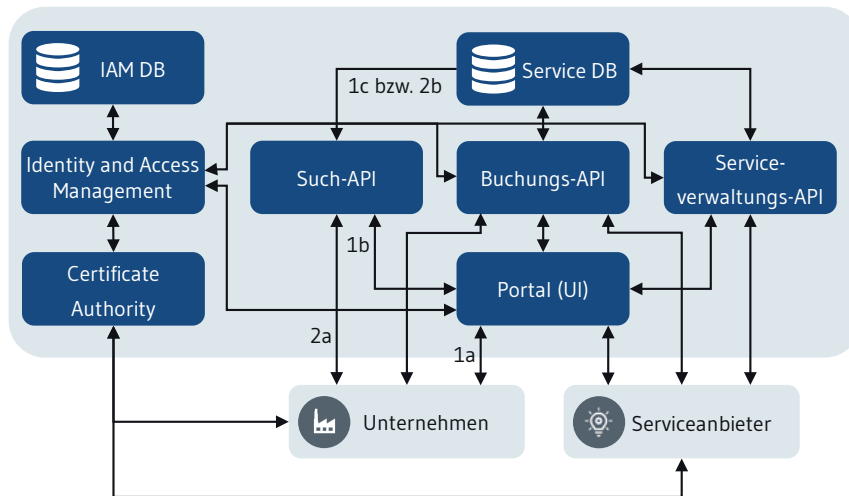


Abb. 2 Aufbau der Marktplattform mit Darstellung der Kommunikationsbeziehungen zwischen den Komponenten und externen Entitäten (Die Nummerierung von Pfeilen bezieht sich auf die möglichen Wege der Servicesuche)

Der erste Schritt für Serviceanbieter ist das Anbieten ihrer Services auf der Marktplattform. Sobald die Services auf der Marktplattform veröffentlicht sind, können Industrieunternehmen nach den am besten für sie geeigneten Services suchen. Die Suche kann dabei entweder manuell über die Website der Marktplattform (Portal mit User Interface (UI)) erfolgen (1a und indirekt 1b) oder direkt mittels einer Such-API (2a). In beiden Fällen wird auf die in einer Datenbank (DB) liegenden Service-Beschreibungen zugegriffen (1c bzw. 2b). Wenn das Industrieunternehmen auf der Marktplattform einen geeigneten Service identifiziert, kann es über die Marktplattform den Service beschaffen. Für die Erbringung des Service wird eine direkte Verbindung zwischen dem Service und der Unternehmensplattform hergestellt (Abbildung 1). Die Vermittlung bei der Buchung ist optional und setzt voraus, dass der Serviceanbieter seine Serviceschnittstelle mit einem geeigneten API-Gateway verwaltet.

Neben den Schnittstellen für die Kernfunktionalitäten gibt es auch Komponenten zur Absicherung der Plattform und des ESP-Ökosystems. Das Identity and Access Management (IAM) sorgt dafür, dass die meisten Aktionen auf der Marktplattform nur von autorisierten Entitäten durchgeführt werden können. Lediglich die Suche nach Services ist ohne Identifizierung und Autorisierung möglich, d. h. öffentlich zugänglich. Die Certificate Authority in der Marktplattform ist die Grundlage für die Synergie-Public-Key-Infrastruktur (PKI). Damit können plattform-, unternehmens- und serviceübergreifend Identitäten bestätigt und Vertrauens- und Sicherheitsfunktionalitäten umgesetzt werden. Ausführliche Erläuterungen hierzu finden sich in Kapitel 5.1.3 und bei Ronge et al. (2021).

2.3 Marktplattformseitige Services

Industrieunternehmen können für die Bewertung, Nutzung und Vermarktung von Energieflexibilität eine Vielzahl von Services unterschiedlicher Anbieter nutzen, die durch die Marktplattform vermittelt werden. Durch das Nutzen der Services kann Industrieunternehmen ein Zugang zu verschiedenen Energiemärkten ermöglicht werden. Aber auch die Unterstützung interner Entscheidungsprozesse und daraus resultierende Erlöse durch die Vermarktung von Energieflexibilität sind möglich. Detaillierte Steckbriefe zu einzelnen Services, die im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie entwickelt wurden, sind bei Wenninger et al. (2020) zu finden. Eine Auswahl dieser Services ist im Folgenden aufgeführt.

- Das Ziel des in *Kapitel A.1* bereits vorgestellten **Flexibilitätseinsatzplanungstools (Flex-Tool)** ist die energiemarktübergreifende Optimierung von Energieflexibilitätseinsätzen. Industrieunternehmen sollen dabei unterstützt werden, einen Energiemarkt zu identifizieren, an dem sie ihre Energieflexibilität zu möglichst hohen Erlösen vermarkten können. Darüber hinaus werden die Ausprägungen von Energieflexibilitätspotenzialen spezifiziert (z. B. feste Zeitintervalle festgelegt), aus denen ein »Einsatzplan« für Maschinen abgeleitet werden kann. Die Optimierung kann dabei sowohl minimale Kosten als auch maximale Erlöse zum Ziel haben.
- Der Service **Aggregator-Flexibilitätshandel** ermöglicht die Vermarktung von Energieflexibilität über einen Aggregator und somit einen Zugang zu Energieflexibilitätsmärkten für Industrieunternehmen, denen dies bisher nicht möglich war.
- Der **lokale Flexibilitätshandel (LFH)** ist für die Vermarktung von Energieflexibilität auf lokaler Ebene (am Standort des Unternehmens) konzipiert. Die Hauptdienstleistung ist die Bereitstellung von Energieflexibilität für den lokalen Verteilnetzbetreiber. Der Verteilnetzbetreiber kann für das Engpassmanagement Energieflexibilitätsangebote auswählen, die reserviert bzw. aktiviert werden sollen.
- Die **Prognosedienste für Märkte und Netze** stellen Prognosen für Strompreise verschiedener nationaler und lokaler Märkte bereit.

2.4 Unternehmensplattform

Die Unternehmensplattform ist die zweite Teilplattform innerhalb der Energiesynchronisationsplattform. Sie stellt das modulare, serviceorientierte, sichere und nach außen gekapselte IKT-System zur Bereitstellung von Energieflexibilität innerhalb eines Industrieunternehmens dar (Schel et al., 2018). Erstens finden in der Unternehmensplattform Aufnahme, Zusammenführung, Analyse und Optimierung von Prozess- und Produktionsdaten statt. Zweitens werden Systeme, Anlagen und Komponenten energiesynchron gesteuert und geregelt. Die UP ermöglicht dadurch einen energieflexiblen Ablauf der Produktion (Schel et al., 2018). Drittens ermöglicht die Unternehmensplattform eine Kommunikation zur Marktplattform und zu externen Services, um die Vermarktung von Energieflexibilität zu ermöglichen (siehe beispielhafter Prozessablauf in *Kapitel 4.2.5*). Eine Auswahl der UP-seitigen Komponenten

und Services wird in *Kapitel 2.5* vorgestellt. Die Unternehmensplattform strebt durch unterschiedliche Betriebskonzepte – On-Premises, in der Cloud oder hybrid – eine hinreichende Skalierbarkeit an und lässt sich so an die Bedürfnisse der Industrieunternehmen anpassen (Bauernhansl et al., 2019).

Im Kontext der Unternehmensplattform gibt es verschiedene Rollen, die zu berücksichtigen sind. Für eine ausführliche Auflistung einzelner Stakeholder sei auf Menci et al. (2021) verwiesen:

- **Plattformteilnehmer** sind Industrieunternehmen, die Energieflexibilität bereitstellen können. Sie nutzen Services («Apps») unterschiedlicher Hersteller auf der UP mit dem Ziel, eine passende Unterstützung für den energieflexiblen Betrieb ihrer Produktionsprozesse zu finden.
- Der **Plattformbetreiber** stellt den Betrieb der Plattform zur Bereitstellung von Services sowie die Grundfunktionalitäten zur Serviceautomatisierung und -orchestrierung sicher.
- **Serviceanbieter** entwickeln Serviceanwendungen («Apps») und stellen diese bereit, um den Funktionsumfang der Unternehmensplattform zu erweitern.

Abbildung 3 zeigt den generellen Aufbau der Unternehmensplattform mit ihren Schnittstellen zu unternehmensinternen Systemen und zu marktseitigen Diensten. Systeme und Anlagen können auf der Unternehmensplattform über Konnektoren bzw. spezifische Services eingebunden werden. Die Kernkomponenten und Services werden mit ihrem jeweiligen Einsatzzweck nachfolgend beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung der Architektur der Unternehmensplattform ist bei Menci et al. (2021) zu finden.

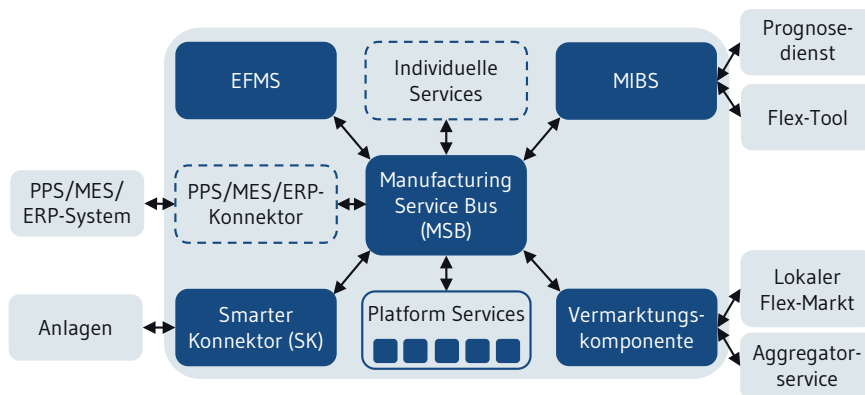


Abb. 3 Aufbau der Unternehmensplattform mit Darstellung der Kommunikationsbeziehungen zwischen den Komponenten und den externen Entitäten

2.5 Unternehmensplattformseitige Kernkomponenten und Services

Abbildung 3 zeigt die softwareseitigen Kernkomponenten der Unternehmensplattform (dunkelblau hervorgehoben), die zur Erfassung und Kommunikation von Energieflexibilität zwischen Maschinen und marktseitigen Services benötigt werden. Zum anderen gibt es weitere optionale Services, die in den Kommunikationsprozess innerhalb der Unternehmensplattform eingebunden werden können. Zur Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten und Services wird hauptsächlich das EFDM verwendet. Die in *Abbildung 3* aufgeführten Komponenten und Services werden im Folgenden aufgelistet. Detaillierte Steckbriefe zu allen Komponenten und Services sind in Grigorjan et al. (2020) zu finden.

- Der **Manufacturing Service Bus (MSB)** ist die zentrale Komponente der Unternehmensplattform. Über den MSB werden Informationen zwischen Services und Komponenten verteilt (hauptsächlich EFDMs). Der MSB ist als eine Middleware definiert, an die bestehende IT-Services angebunden werden können. Dabei unterstützt der MSB verschiedene offene und standardisierte Kommunikationsprotokolle.
- Der **Smarte Konnektor (SK)** ist die Integrationskomponente für die zusätzliche Einbindung von proprietären SPS-Protokollen. Als Softwareschnittstelle ermöglicht der Smarte Konnektor es, Steuerungsdaten mit IT-Systemen und Cloud-Komponenten zu verbinden und damit Steuerungs- und Energiedaten aus unterschiedlichen Quellen zu integrieren. Nach einer umfangreichen Konfiguration erstellt der Smarte Konnektor aus den ausgelesenen Daten Energieflexibilitätsdatenmodelle (EFDM) (*Kapitel 3*) und setzt deren Erbringung (Steuerung) nach einer erfolgten Vermarktung um.
- Der **Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS)** dient als Repository für die vom Smarten Konnektor oder anderen Services erstellten EFDM-Objekte des Industrieunternehmens. In seiner weiteren Funktion als Broker übermittelt der EFMS die EFDM-Objekte über den MSB an relevante Services (Vermarktungsservice, Optimierungsservice etc.).
- **Konnektoren für Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS), Manufacturing Execution Systems (MES) und Enterprise Resource Planning (ERP)** ermöglichen die Einbeziehung von Daten, die auf einer höheren Ebene der Automatisierungspyramide erfasst und von bestimmten individuellen Services angefragt und genutzt werden. Die Datenbereitstellung geschieht hierbei nicht zwingend über das EFDM.
- Der **Marktinformationsbeschaffungsservice (MIBS)** ermöglicht die Beschaffung von Informationen aus Services der Marktplattform zur Nutzung auf der Unternehmensplattform (z. B. Informationen zu Strompreisentwicklungen). Der MIBS fungiert dabei als Schnittstelle für die Anbindung dieser externen Services.
- Die **Vermarktungskomponente** ermöglicht die Kommunikation zwischen Unternehmensplattform und Vermarktungsservices, welche zuvor über die Marktplattform vermittelt wurden (z. B. Aggregator-Flexibilitätshandel). Die Vermarktung von zuvor in der Unternehmensplattform ermittelter Energieflexibilität kann in dieser Komponente manuell angestoßen werden oder vollautomatisiert geschehen. Der Vorteil aus Nutzersicht ist hier, dass der Vermarktungsprozess unabhängig vom Zielservice einheitlich und in einem zentralen System gesteuert wird.

Die Vermarktungskomponente übernimmt im Hintergrund die vermarktungsservicespezifische Kommunikation und die Transformation von EFDM nach vermarktungsservicespezifischem Datenmodell. Die Transformation wird von einem entsprechenden Vermarktungsadapter in der Vermarktungskomponente durchgeführt.

- Die **Platform Services** sind technische Basisdienste der Unternehmensplattform. Dazu gehören z. B. das Identitäts- und Berechtigungsmanagement oder ein Repository für installierte und installierbare Services (»Apps«).

Darüber hinaus gibt es weitere individuelle Services, die je nach Anwendungsfall eingesetzt werden können. Dazu gehören z. B. verschiedene Optimierungsservices und der Merge-Service. Detaillierte Erläuterungen zu Optimierungsservices sind in Schilp et al. (2021) zu finden.

- Der **Merge-Service** ist ein Beispiel für einen individuellen Service. Dieser kombiniert (aggregiert) einzelne Energieflexibilitäten und teilt (disaggregiert) kombinierte Energieflexibilitäten wieder in ursprüngliche Energieflexibilitäten auf. Dies gilt sowohl für Flexibilitätsräume als auch für Flexibilisierungsmaßnahmen (*Kapitel 3*). Dadurch können viele kleine Energieflexibilitäten gemeinsam auf einem Energiemarkt vermarktet werden, wodurch sich das vermarktbarere Energieflexibilitätspotenzial erhöht. Der Einsatz des Service verringert darüber hinaus die Komplexität nachgelagerter Optimierungsprobleme. Somit kann der Merge-Service zu einer Steigerung ökonomischer Nutzbarkeit der Energieflexibilitätspotenziale innerhalb eines Industrieunternehmens beitragen.

3 Energieflexibilitätsdatenmodell

Autoren: van Stiphoudt · Schöpf · Potenciano Menci · Lindner · Fridgen · Weigold

Für die Kommunikation von Energieflexibilität innerhalb der Energiesynchronisationsplattform, d. h. insbesondere innerhalb der Unternehmensplattform und idealerweise sogar auch mit externen, über die Marktplattform vermittelten Services, wurde das Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM) entwickelt. Das EFDM ermöglicht einen standardisierten Austausch von Informationen zu Energieflexibilität in einem generischen Format, und zwar unabhängig von der eigentlich physisch zugrundeliegenden Energieflexibilität. Die Spezifikation des EFDMs erfolgte in Zusammenarbeit mit der energieintensiven Industrie des SynErgie-Konsortiums (Schott et al., 2019). Dieses Kapitel geht auf die Ausgestaltung des EFDMs ein. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf Buhl et al. (2021) verwiesen. Die Anwendung des EFDMs innerhalb der ESP wird in *Kapitel 4.2.4* erläutert.

3.1 Notwendigkeit des Datenmodells

Durch digitale Kommunikationstechnologien ist es möglich, lokale Engpässe im Stromnetz (Smart Grid) zu identifizieren und durch entsprechende Maßnahmen zu schließen (Schott et al., 2019). Damit dies gelingt, ist eine einheitliche Beschreibung von Energieflexibilitäten von entscheidender Bedeutung, um die unterschiedlichen Arten von Energieflexibilität wirtschaftlich für eine sichere Stromversorgung

einsetzen zu können. Die Verwendung eines standardisierten Datenmodells zur Beschreibung von Energieflexibilität ermöglicht dabei eine automatisierte Kommunikation zwischen den verschiedenen Parteien innerhalb des Energiesystems. Dadurch können zwei Probleme vermieden werden: Erstens werden mögliche Fehlerquellen in der Übersetzung verschiedener Modelle vermieden. Zweitens entfallen durch einen standardisierten Datenaustausch Lock-in-Effekte für Nutzer der ESP. Sollten sich Anforderungen von Industrieunternehmen ändern oder andere Anreize den Wechsel eines Serviceanbieters erfordern, kann dies ohne hohe Kosten durch Anpassung der Schnittstellen erfolgen. Durch ein standardisiertes Datenmodell kann der Informationsaustausch verbessert, der Zugang zu Services und das Angebot an Flexibilitätsbereitstellungen erhöht sowie das Plattform-Ökosystem insgesamt vergrößert werden (Schott et al., 2019). Unter diesem Gesichtspunkt ist das Energieflexibilitätsdatenmodell entwickelt und mithilfe von Prototypen evaluiert, validiert und erweitert worden.

3.2 Ziel und Zweck des Datenmodells

Das Energieflexibilitätsdatenmodell bildet Energieflexibilität in einem Flexibilitätsraum und in konkreten Energieflexibilitätsmaßnahmen ab. Ein Flexibilitätsraum beschreibt hierbei die Möglichkeit eines energieflexiblen Systems, seine Leistung gegenüber dem Referenzbetrieb zu variieren. Die Erzeugung eines Digitalen Zwillings als virtuelles und vollständig realitätsgereutes Abbild einer Energieflexibilität wird nicht angestrebt. Die generische Beschreibung beschränkt sich daher auf ein Mindestmaß an Parametern und Kennzahlen, die alle technischen und energetisch relevanten Informationen enthalten, um Energieflexibilität für alle Anwendungsfälle der ESP zu beschreiben. Dadurch sollen zum einen die Komplexität und die Datenmenge der ausgetauschten Informationen beschränkt werden; zum anderen soll der Austausch sensibler Produktions- und Prozessdaten vermieden werden.

Das EFDM ist eine zentrale Grundlage für alle darauf aufbauenden Services innerhalb und außerhalb der ESP. Ausgehend davon können Datenmodelle für spezielle Anwendungsfälle, beispielsweise zur Optimierung abgeleitet werden (Schilp et al. 2021), die nur einen Teil der Informationen des EFDMs beinhalten. Für die Beschreibung von EFDMs wurde ein JSON-Schema entwickelt.

3.3 Klassen des Datenmodells

Ein Energieflexibilitätsdatenmodell stellt den Rahmen zur generischen Beschreibung von Flexibilitätsräumen und Flexibilitätsmaßnahmen mithilfe von Kennzahlen dar. Die technischen energieflexiblen Systeme werden durch die Klassen »Flexible Last«, »Energiespeicher« und »Abhängigkeit« charakterisiert. Über die Ausprägung der Kennzahlen der genannten Klassen werden die Freiheitsgrade der Energieflexibilität definiert und somit die zulässigen Möglichkeiten des technischen Systems, seine Leistung zu variieren, als Flexibilitätsraum beschrieben.

Neben den drei genannten Klassen zur Beschreibung des Flexibilitätsraums eines Systems beinhaltet das EFDM auch die Klasse »Energieflexibilitätsmaßnahme«, die eine konkrete Leistungsänderung des Systems innerhalb seines Flexibilitätsraums beschreibt.

Eine Übersicht über die verwendeten Klassen »Flexible Last«, »Energiespeicher«, »Abhängigkeiten« und »Energieflexibilitätsmaßnahmen« gibt *Abbildung 4* mit jeweils einer kurzen Beschreibung. Für weitere Beschreibungen, Herleitungen und Definitionen sei auf Schott et al. (2019) verwiesen. Jede Klasse beinhaltet unterschiedliche Kennzahlen. Die Kennzahlen beinhalten interne Schlüssel-Wert-Paare, die vom JSON-Schema benötigt werden.

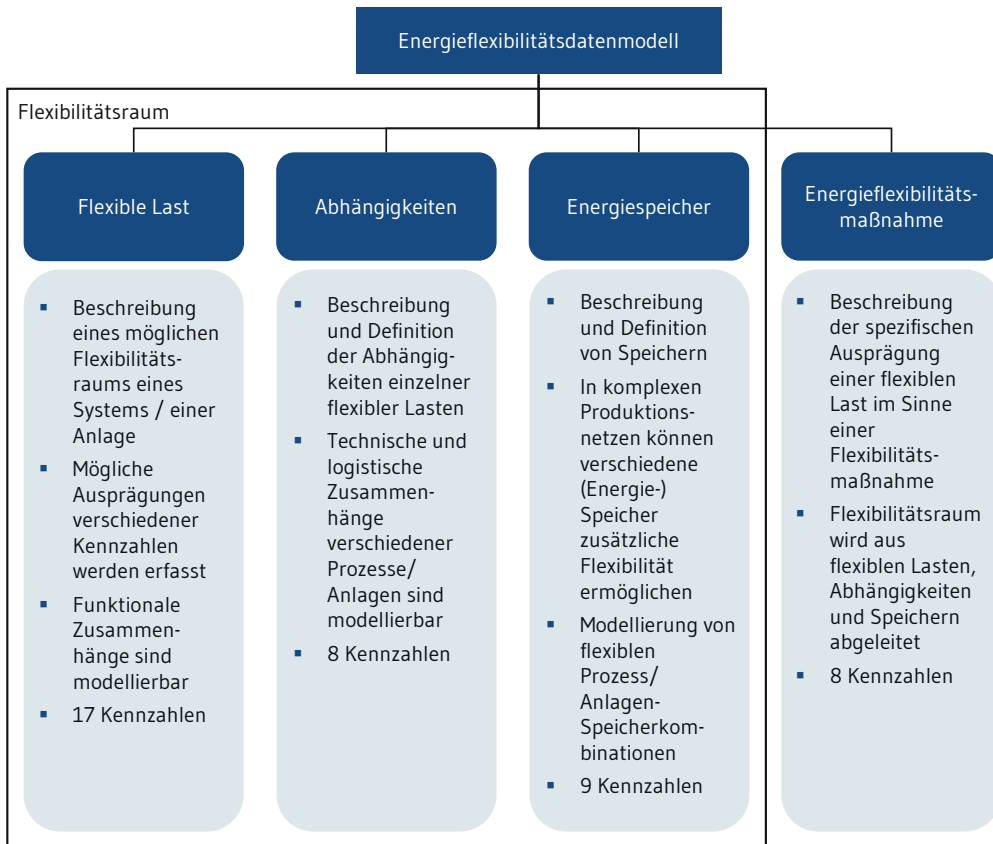


Abb. 4 Klassen des Energieflexibilitätsdatenmodells

3.3.1 Flexible Last

Eine flexible Last beschreibt ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, eine Leistungsänderung hervorzubringen. Ob es sich bei dem technischen System um einen Erzeuger oder Verbraucher von Energie und damit um eine positive oder negative Last handelt, ist dabei irrelevant. Bei der Definition einer flexiblen Last werden Beschränkungen der Leistungsänderung bzw. der energetischen Freiheitsgrade an sich berücksichtigt. Abhängigkeiten zu anderen flexiblen Lasten oder zu Energiespeichern werden nicht in der Klasse »Flexible Last« beschrieben. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Flexible Last« 17 Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

3.3.2 Energiespeicher

Ein Energiespeicher ist ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, Energie zu speichern. Grundsätzlich sind neben direkten Energiespeichern (z.B. Wärmespeicher oder Batteriespeicher) auch inhärente Speicher wie Produktspeicher (z.B. Halbstoffe bei der Papierproduktion) möglich. Energiespeicher können ohne flexible Lasten (oder im weiteren Sinne auch flexible Stromerzeuger) nicht für Energieflexibilität genutzt werden, da ohne eine flexible Last keine Leistungsänderung möglich ist. Beispielsweise kann die Energieflexibilität eines Wärmespeichers nur genutzt werden, wenn entsprechende Anlagen zur Wärmeversorgung und/oder -abnahme als flexible Lasten mit dem Speicher verbunden sind. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Energiespeicher« neun Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

3.3.3 Abhängigkeiten

Produktionsprozesse sind komplexe Systeme, die voneinander abhängige Prozesse beinhalten. Daher beinhaltet das Energieflexibilitätsdatenmodell die Klasse »Abhängigkeiten«, um diese Komplexität beschreiben zu können. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Abhängigkeiten« acht Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

3.3.4 Energieflexibilitätsmaßnahmen

Neben den drei Klassen »Flexible Last«, »Energiespeicher« und »Abhängigkeiten« zur Beschreibung des Flexibilitätsraums beschreibt eine Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM) eine bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels in einem Produktionssystem und die damit verbundenen Wechselwirkungen im Produktionssystem (Schott et al., 2019; VDI 5207 Blatt 1). Dies geht mit einer konkreten Leistungsänderung innerhalb des Flexibilitätsraums einher, weist selbst keine Freiheitsgrade mehr auf und ist zeitlich terminiert. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Energieflexibilitätsmaßnahme« acht Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

In der Klasse »Energieflexibilitätsmaßnahme« werden für die einzelnen Kennzahlen konkrete Werte z. B. als Sollwert für die ausführende Instanz vorgegeben bzw. definiert. Die maschinenseitige Regelung ist dafür zuständig, die Energieflexibilität umzusetzen und Toleranzen bestmöglich einzuhalten. Dies erfolgt beispielsweise bei SPS-gesteuerten Anlagen über entsprechende Regler (z. B. proportional–integral–derivative (PID)-Regler), welche anwendungsfallsspezifisch eingestellt sind.

3.4 Exemplarische Beschreibung

Die Forschungs- und Lernfabrik ETA an der TU Darmstadt stellt einen Forschungsdemonstrator in Realmaßstab dar und ermöglicht es so, die Entwicklungsergebnisse an realen Produktionsanlagen zu erproben. Darauf basierend wurde in einem Versuchsaufbau das EFDM für ein beispielhaftes Produktionsinfrastruktursystem erstellt (*Abbildung 5*).

Bei dem betrachteten System handelt es sich um die Prozesskältebereitstellung für die Maschinenkühlung einer Werkzeugmaschine. Hierbei kommt als flexible Last ein luftgekühltes Kompressionskälteaggregat zum Einsatz. Das Energieflexibilitätspotenzial wird durch die Kopplung eines Kältespeichers erhöht und ermöglicht dadurch den energieflexiblen Betrieb der Werkzeugmaschine als Energieverbraucher.

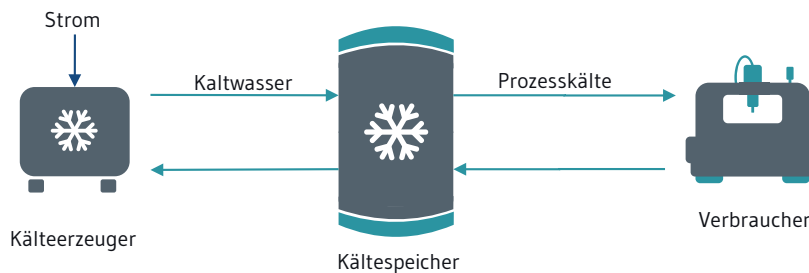


Abb. 5 Schematische Darstellung eines Beispielsystems in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt

Die Berechnung bzw. Erstellung des initialen EFDM liegt bei der für den Anlagenbetrieb zuständigen Person. Sie kann z. B. dem Energiemanagement, der Produktionsleitung oder auch der Instandhaltung eines Industrieunternehmens angehören. Ein Auszug aus dem EFDM für das in *Abbildung 5* gezeigte System ist in *Tabelle 1* und *Tabelle 2* aufgeführt. Die einzelnen Kennzahlen müssen dabei aus den maschinenspezifischen Daten sowie ihrer Verwendung entsprechend berechnet oder eingetragen werden. Detailliertere Ausführungen sind in Schott et al. (2019) und Buhl et al. (2021) zu finden.

Um anschließend ein EFDM zu erhalten, das den Spezifikationen im definierten JSON-Schema entspricht, wird der auf der Unternehmensplattform verfügbare Service »EFDM–GUI« verwendet. Dieser ermöglicht durch eine logische Abfrage der Kennzahlen jeder Klasse die Erstellung des system-

zugehörigen EFDs. Dieses kann im Anschluss z. B. an den Smarten Konnektor weitergegeben werden und ermöglicht eine Anbindung der Anlage an die Unternehmensplattform. Die informationstechnische Umsetzung wird in *Kapitel 4.2* sowie in Menci et al. (2021) näher beschrieben.

Tab. 1 Berechnete Kennzahlen für die flexible Last »Kälteaggregat« des Beispielsystems (Punkt als Dezimaltrennzeichen, Komma zur Abgrenzung der Komponenten eines Vektors oder von Intervallgrenzen, Werte in Sekunden werden zur Veranschaulichung teils als Zeitstempel dargestellt. (Buhl et al. (2019))

Kennzahl	Wert	Einheit
Energieflexibilitäts-ID	2009210002	–
Reaktionsdauer	60	s
Gültigkeit	[2021-09-20T06:00:00, 2021-09-20T11:00:00]	s
Leistungszustände	[0.8,6]	kW
Haltedauer	[30, infinity]	s

Tab. 2 Berechnete Kennzahlen für den Speicher des Beispielsystems

Kennzahl	Wert	Einheit
Speicher-ID	2009210003	–
Nutzbare Speicherkapazität	[0, 4.648]	kWh
Anfangsenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	(2.0, 2021-09-20T06:00:00)	(kWh, s)
Zielenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	(0, 2021-09-20T11:00:00)	(kWh, s)
Energieverluste	1.228/3600	% · s ⁻¹
Versorgungssysteme	(2009210002, 2.6)	(–, –)
Nicht beeinflussbarer Energiebedarf	(11:00:00, 0.477)	(s → kW)

4 Prozesse und Informationsflüsse

Autoren: Potenciano Menci · Winter · Grigorjan · Lindner · van Stiphoudt · Schöpf · Fridgen

4.1 Prozessmodell der Energiesynchronisationsplattform

Die Prozesse der Energiesynchronisationsplattform wurden mittels The Open Group Architecture Framework (TOGAF), einem Vorgehensmodell zur Entwicklung von Unternehmensarchitekturen, erhoben und modelliert. Ausgehend von den Zielen der ESP wurden Rahmenbedingungen, Geschäftsprozesse, Anwendungsprozesse und Informationsflüsse insbesondere in der Geschäftsarchitektur und der Informationssystemarchitektur abgebildet. Die Geschäftsprozesse der ESP wurden in unterschiedlichen Granularitäten modelliert. Einen Überblick über die Prozesse bietet die in *Abbildung 6* dargestellte Prozesslandkarte, in der die Prozessarchitektur in Kernprozesse, Managementprozesse und Supportprozesse untergliedert ist.

Die Kernprozesse beziehen sich auf die Ermittlung, Beschreibung, Vermarktung und Erbringung von Energieflexibilität. Die hier modellierten Prozesse sind Grundlage für die Implementierung der Energiesynchronisationsplattform (*Kapitel 2*). Im Rahmen der »Identifikation von Flexibilität« wird unter Zuhilfenahme relevanter Unternehmens-, Prozess- und Betriebsdaten (Sensorik, Produktionsplanung, etc.) die verfügbare Energieflexibilität bestimmt und mithilfe des Energieflexibilitätsdatenmodells beschrieben. Die ermittelten Energieflexibilitätsräume werden anschließend bewertet und es wird über deren Vermarktung entschieden. Nach erfolgter Vermarktung sind entsprechende Flexibilitätsmaßnahmen zu erbringen. Da all diese Abläufe teilweise unternehmensspezifisch sind, wurden Referenzprozesse definiert und bereitgestellt, die als Prozessvarianten an ein spezifisches Unternehmen angepasst werden können.

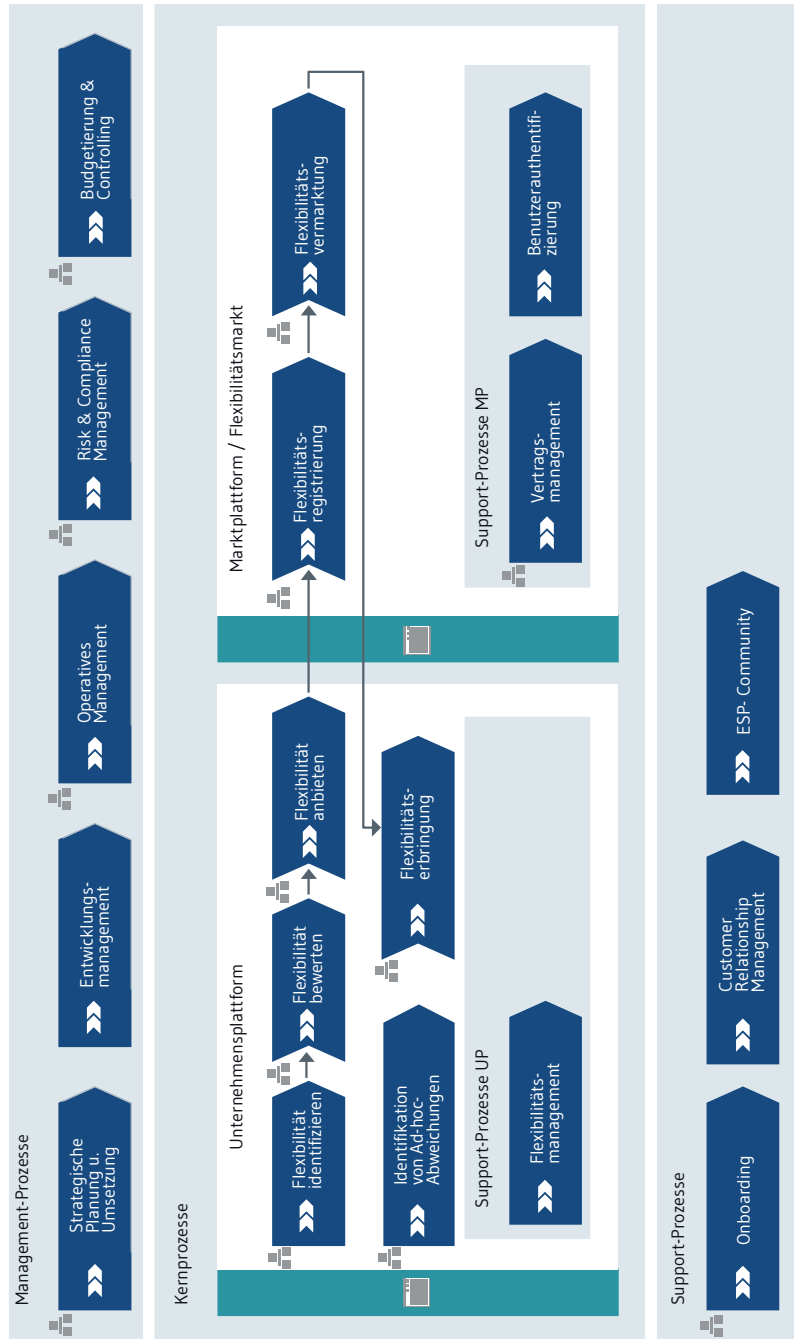


Abb. 6 Prozesslandkarte der Energiesynchronisationsplattform

4.2 Umsetzung von Prozessen

Nachfolgend wird beschrieben, wie ausgewählte Prozesse mit den Komponenten der Energiesynchronisationsplattform umgesetzt werden.

4.2.1 Erfassung von Energieflexibilität im Energieflexibilitätsdatenmodell

Der erste Schritt zur Erschließung von Energieflexibilität ist die Erfassung des Energieflexibilitätspotenzials. Dazu können Potenzialanalysen oder komplementäre Untersuchungen nach VDI 5207 Blatt 1 und 2 durchgeführt werden (VDI 5207 Blatt 1, 5207 Blatt 2). Mögliche einsetzbare Werkzeuge sind das Energieflexibilitätsaudit zur Identifikation von Energieflexibilität innerhalb einer Produktionslinie (siehe Kopernikus-Projekt SynErgie (2021b) für weitere Details und *Kapitel B.1*) und der E-Flex-Scanner zur Bewertung von Energieflexibilität auf Versorgungstechnikebene (siehe Kopernikus-Projekt SynErgie (2021a) für weitere Details und in *Kapitel B.1*). Nach Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials und einer entsprechenden Auswahl an Anlagen kann in einem nächsten Schritt eine Anbindung der ausgewählten Anlagen an die IT-Infrastruktur der ESP erfolgen. Dazu ist zunächst die Implementierung des Smarten Konnektors zur Anbindung von Anlagen oder anderer Konnektoren erforderlich, um beispielsweise ein MES anzubinden (Menci et al., 2021).

Nach erfolgter Implementierung und Anbindung an die IT-Infrastruktur der ESP kann die Beschreibung der Energieflexibilität jeder anzubindenden Anlage im EFDM erfolgen. Hierzu werden die Flexibilitätsräume der Anlage mithilfe der Kennzahlen des EFDMs beschrieben. Weitere Informationen über das EFDM können *Kapitel 3* entnommen werden. Zunächst muss dafür bestimmt werden, wie Anlagenparameter und Messwerte in EFDM-Kennzahlen überführt werden. Anschließend wird diese Parametrierung mittels UP-seitigem »EFDM GUI«-Service eingegeben und danach an den Smarten Konnektor übermittelt. Schließlich bestimmt der Smarte Konnektor im laufenden Betrieb aus den Eingangsdaten und seiner Parametrierung konkrete Flexibilitätsräume. Detaillierte Informationen dazu beschreiben Menci et al. (2021).

4.2.2 Optimierung bzw. Aggregation von Energieflexibilitäten

Bevor die erstellten EFDM-Objekte, konkret die flexiblen Lasten in den Flexibilitätsräumen, zur Vermarktung genutzt werden, besteht die Möglichkeit, verschiedene individuelle Services der Unternehmensplattform zu nutzen, z. B. Optimierungsservices oder den Merge-Service (Schilp et al., 2021). Diese bilden einen zentralen Bestandteil der Energiesynchronisationsplattform und sind auf verschiedenen Ebenen von Fabriken und Industrieanlagen einsetzbar. Sie sollen einen optimalen, energieflexiblen Betrieb ermöglichen. Zur Nutzung dieser Services werden die EFDM-Objekte vom Smarten Konnektor an den Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS), dem Repository für EFDM-Objekte, übermittelt. Ein Optimierungsservice oder der Merge-Service kann nun durch Pull Request diese EFDM-Objekte abrufen (Schilp et al., 2021). In komplexen Szenarien können mehrere solcher Services eine kaskadierte Verarbeitung vornehmen.

Optimierungsservices auf der Unternehmensplattform können auch Marktdaten wie beispielsweise Preisprognosen, die durch Services der Marktplattform bereitgestellt werden, für ihre Optimierungen nutzen. Die Anfrage erfolgt dabei über den Marktinformationsbeschaffungsservice. Neben Optimierungen auf der Unternehmensplattform gibt es auch Services der Marktplattform, die Optimierungen vor der eigentlichen Vermarktung bzw. der Nutzung von Vermarktungsservices durchführen. Ein Beispiel ist das Flexibilitätseinsatzplanungstool (*Kapitel 2.3* sowie *Kapitel A.1*), das optimale Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität identifiziert und eine Entscheidungsunterstützung bietet. Darüber hinaus können in einigen Fällen Ergebnisse von Optimierungen innerhalb von Services der Marktplattform auch von internen Services der Unternehmensplattform für ihre Optimierung genutzt werden.

4.2.3 Vermarktung von Energieflexibilität

Für die Vermarktung von Energieflexibilität stehen derzeit die Services von Aggregatoren und der lokale Flexibilitätshandel zur Verfügung (*Kapitel 2.3*). Die Kommunikation wird auf der Seite der Unternehmensplattform über die Vermarktungskomponente und einen für den jeweiligen Zielservice spezifischen Vermarktungsadapter hergestellt. Die Vermarktungskomponente ist eine allgemeine, interoperable Komponente. Da die Zielservices jedoch spezifisch sind, kann die Vermarktungskomponente diese nicht direkt ansprechen, sondern ist auf die Hilfe der Vermarktungsadapter angewiesen.

Ein Vermarktungsadapter agiert als Plug-in für die Vermarktungskomponente und ist Bindeglied zwischen der Unternehmensplattform und einem externen Vermarktungsservice. Er stellt dem Service die nötigen Daten in den passenden Datenformaten zur Verfügung. Da es sich bei dem Informationsaustausch innerhalb der Unternehmensplattform hauptsächlich um EFDM-Objekte handelt, aber externe Services zumeist (noch) nicht das Energieflexibilitätsdatenmodell verwenden, wandelt der servicespezifische Vermarktungsadapter die Informationen in das entsprechende Datenformat des Serviceanbieters um. In gleicher Weise wandelt der Vermarktungsadapter das Datenmodell des Serviceanbieters in das EFDM um, wenn der externe Service mit dem Industrieunternehmen kommunizieren möchte. Neben der Behandlung von Datenformaten ist ein Vermarktungsadapter auch zur Abwicklung der servicespezifischen Kommunikationsprozesse über servicespezifische Protokolle nötig. Daher verfügt jeder Vermarktungsservice über einen individuellen Vermarktungsadapter, der von der Marktplattform heruntergeladen und in die Unternehmensplattform eines Industrieunternehmens integriert werden kann.

4.2.4 Ausführung einer Energieflexibilitätsmaßnahme

Wurde Energieflexibilität erfolgreich vermarktet, wird im Falle eines Flexibilitätsabrufs ein Aktivierungssignal vom Service, der die Vermarktung durchgeführt hat (z. B. der Energieflexibilitätshandelsservice eines Aggregators), an die Vermarktungskomponente bzw. den zugehörigen Vermarktungsadapter in die Unternehmensplattform gesendet. Der Adapter übersetzt das Aktivierungssignal in eine Energieflexibilitätsmaßnahme im Energieflexibilitätsdatenmodell. Diese Maßnahme entspricht einem konkreten Lastgang innerhalb eines bestehenden Flexibilitätsraums. Die Energieflexibilitätsmaßnahme geht über den Manufacturing Service Bus an den Energieflexibilitätsmanagementservice und

wird von diesem weitergereicht an die Komponente bzw. den Service auf der Unternehmensplattform, die den Flexibilitätsraum gemeldet hat. Diese Komponente bzw. der Service ist für die Einleitung der weiteren nötigen Schritte verantwortlich, um die Maßnahme wie gefordert zu erbringen. Hierbei wird die Kette aller Komponenten bzw. Services, die zur Erzeugung der vermarkteten Energieflexibilität geführt hat, rückwärts durchlaufen bis zum relevanten Konnektor (etwa dem Smarten Konnektor). Dieser Prozess wird nachfolgend in *Kapitel 4.2.5* an einem Beispiel illustriert.

Sobald eine Energieflexibilitätsmaßnahme am entsprechenden Smarten Konnektor ankommt, ordnet er die Maßnahme über den entsprechenden Flexibilitätsraum einer Anlage zu. Zur Realisierung der Energieflexibilitätsmaßnahme sind in einer lokalen Konfigurationsdatei eine Reihe von Operationen hinterlegt. Diese beschreiben anlagenspezifisch die notwendigen Aktionen und Einstellungen, um den gewünschten Lastgang der Energieflexibilitätsmaßnahme zu erreichen. Die Konfigurationsdatei kann nur vom entsprechenden Smarten Konnektor eingesehen werden und steht außerhalb dessen (auch UP-seitig) nicht zur Verfügung.

Nachdem die Energieflexibilitätsmaßnahme für die angegebene Haltedauer aktiv war, soll die Vermarktungskomponente und letztlich der Käufer der Energieflexibilität über die erfolgreiche Durchführung informiert werden. Hierfür gilt es, noch ein entsprechendes Verfahren zu bestimmen.

4.2.5 Anwendungsbeispiel

In diesem Kapitel wird anhand eines Beispiels der Einsatz der Energiesynchronisationsplattform illustriert. In der betrachteten Anwendung (*Abbildung 7*) verfügt ein Industrieunternehmen über mehrere Metallschmelzöfen, die als flexible Lasten (z. B. Erhöhung der Nachfrage) eingesetzt werden können. Diese Energieflexibilität soll über einen Aggregator auf einem der Spotmärkte vermarktet werden.

Nach einer Potenzialerschaffung erstellt der Smarte Konnektor zu jedem Metallschmelzofen eine Beschreibung der flexiblen Last. Das generierte EFDM-Objekt wird im Anschluss vom Smarten Konnektor über den MSB an den EFMS zur Speicherung weitergegeben. Von dort aus wird der Merge-Service auf der Unternehmensplattform aufgerufen. Dieser fasst die flexiblen Lasten der einzelnen Metallschmelzöfen für die Vermarktung zusammen. Der Merge-Service stellt über den MSB eine Verbindung mit dem EFMS her und erstellt ein EFDM-Objekt für die zusammengeführte Energieflexibilität, das wiederum im EFMS gespeichert wird. Das neue EFDM-Objekt wird nun durch die Vermarktungskomponente (mit Unterstützung eines Vermarktungsadapters) an den Aggregator-Service weitergegeben, der die Energieflexibilität für Handelsgeschäfte auf dem Spotmarkt nutzt und ggf. schließlich die Energieflexibilität vom Industrieunternehmen abrufen. Ein Aktivierungssignal wird vom Aggregator an die Vermarktungskomponente gesendet, und diese schickt eine Flexibilitätsmaßnahme an den Merge-Service. Der Merge-Service übersetzt die aggregierte Maßnahme in mehrere Maßnahmen für die einzelnen Smarten Konnektoren und sendet sie an dieses. Der EFMS ist als EFDM-Repository wieder bei jeder Übermittlung der EFDM-Objekte zwischen Vermarktungskomponente und Merge-Service bzw. zwischen Merge-Service und Smartem Konnektor geschaltet. Die Smarten Konnektoren sorgen im letzten Schritt für die Steuerung der Metallschmelzöfen und somit für die Erbringung der vermarkteten und somit abgerufenen Energieflexibilitätsmaßnahme.

Das vorgestellte Beispiel veranschaulicht den Einsatz der Energiesynchronisationsplattform im Zusammenspiel mit den zuvor vorgestellten Komponenten und Services. Die automatisierte Kommunikation über standardisierte Schnittstellen innerhalb der Unternehmensplattform sowie nach außen mit Services, die eine Vermarktungsrolle einnehmen, wird für einen konkreten Anwendungsfall (Vermarktung von Energieflexibilität mehrerer Metallschmelzöfen) beschrieben. Dies verdeutlicht den Einsatzzweck der Energiesynchronisationsplattform als Unterstützer für eine automatisierte Vermarktung und die Bereitstellung von Energieflexibilität.

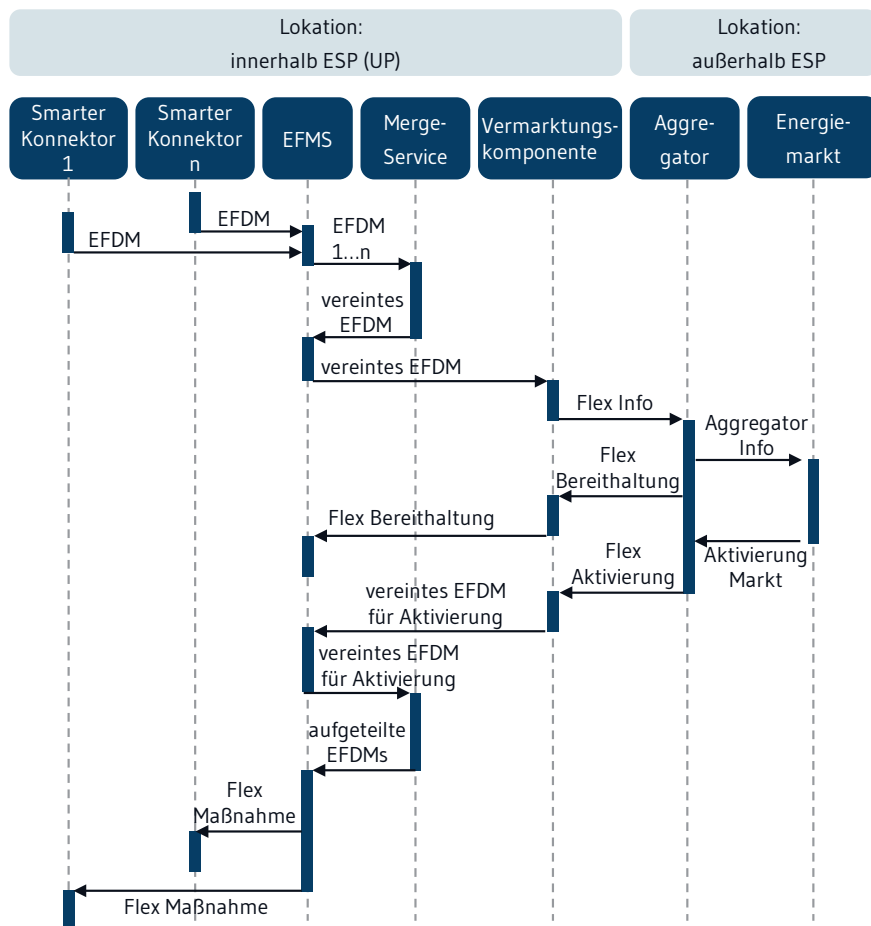


Abb. 7 Sequenzdiagramm: Die Energieflexibilität mehrerer Öfen wird über einen Aggregator vermarktet (EFDM: Energieflexibilitätsdatenmodell; EnerFlex: Energieflexibilität; ESP: Energiesynchronisationsplattform)

5 Informationstechnische Sicherheit

Autoren: Oeder · Ahrens · Winter

IT-Sicherheit ist eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb von IT-Systemen. Daher ist die Perspektive der IT-Sicherheit ein zentrales Querschnittsthema für die Energiesynchronisationsplattform. Um IT-Sicherheit bestmöglich gewährleisten zu können, ist eine systematische Herangehensweise mit bewährten Methoden notwendig. Dies bringt beim Planen, Entwickeln, Installieren und Betreiben eines Systems entsprechende Anforderungen und Aufgaben mit sich. Nachfolgend wird eine Auswahl an solchen Anforderungen und Aufgaben vorgestellt. Es erfolgt eine Unterteilung in begleitende Maßnahmen wie Prozesse aus dem Sicherheitsmanagement und technische Umsetzungsmaßnahmen für Entwicklung, Installation und Betrieb der Energiesynchronisationsplattform.

Die Anforderungen der Energiesynchronisationsplattform an die IT-Sicherheit kommen aus zwei Richtungen. Einerseits gibt es die Sicherheitsanforderungen, die sich aus dem industriellen Umfeld, also der Produktion, ergeben und andererseits die Anforderungen, welche aus einer Einstufung der Energiesynchronisationsplattform oder Teilen dieser als kritische Infrastruktur (KRITIS) resultieren könnten. Die Einstufung als KRITIS kann insbesondere für die Unternehmensplattform oder die durch die Marktplattform vermittelten Services relevant werden, wenn die Schwellenwerte für KRITIS überschritten werden. Für Erzeugungsanlagen und Anlagen oder Systeme zur Steuerung/Bündelung von elektrischer Leistung liegen diese ab Januar 2022 bei 104 MW installierter Nettonennleistung. Für Anlagen zur Erbringung von Primärregelleistung liegt der Wert bei 36 MW (BT-Drs. 19/26106, BSI, 2021). Während im industriellen Umfeld die Sicherstellung des Produktionsprozesses im Vordergrund steht, ist es bei KRITIS im Allgemeinen die Versorgungssicherheit und hier insbesondere die Zuverlässigkeit der Stromversorgung. Details und Anforderungen zur Umsetzung regeln die gesetzlichen Vorgaben und Standards (BT-Drs. 19/26106; BSI, 2021; bdew, 2019).

5.1 Maßnahmen des Security-Prozesses

Maßnahmen zur IT-Sicherheit sind immer mit zeitlichem, organisatorischem und personellem Aufwand verbunden und generieren zusätzliche Kosten. Damit die Anforderungen an die IT-Sicherheit und damit die umzusetzenden Maßnahmen auch dem tatsächlichen Schutzbedarf bei den Kernkomponenten und den Services der Energiesynchronisationsplattform entsprechen, ist es erforderlich, Bedrohungen und Risiken zu analysieren und mögliche Schäden im Falle eines erfolgreichen Cyber-Angriffs abzuschätzen sowie Maßnahmen zu ergreifen, die in einem ausreichenden Maße vor den Schäden schützen. Für die Bedrohungsanalyse wurde ein sogenanntes Threat Modeling durchgeführt. Damit die zu treffenden Maßnahmen dem tatsächlichen Schutzbedarf entsprechen, erfolgte eine Einstufung in eines von fünf Sicherheitslevels (SL). Durch die Nutzung kryptografischer Zertifikate kann die Identität von Teilnehmern sichergestellt werden; ebenso dienen sie zum verschlüsselten Datenaustausch und gewährleisten die Authentizität von Daten. Zusätzlich sorgt das Rollen- und Rechteverwaltung für eine eindeutige Zuordnung von Verantwortlichkeiten und schützt vor unberechtigten Zugriffen. Durch das Life Cycle Management wird sichergestellt, dass die Sicherheitsstandards über den gesamten Lebenszyklus der Plattformen und der Services aufrechterhalten werden.

5.1.1 Threat Model

Für die Durchführung des Threat Modeling der Energiesynchronisationsplattform wurde die STRIDE-Methodik gewählt (Kohnfelder und Garg, 1999; Shostack, 2014). STRIDE steht für die folgenden sechs möglichen Angriffsarten:

- **Spoofing:** Vortäuschen einer fremden Identität
- **Tampering:** Manipulation von Daten
- **Repudiation:** Leugnung einer Handlung
- **Information Disclosure:** Einsicht in Informationen durch unautorisierte Dritte
- **Denial of Service:** Herbeigeführter Ausfall einer Funktion der Software
- **Elevation of Privilege:** Überwinden von Zugriffsbeschränkungen, um unautorisierte Handlungen durchzuführen

Als Ergebnis der durchgeführten Analysen zeigte sich, dass unter anderem die Integrität und Authentizität der Nachrichten innerhalb der Unternehmensplattform noch nicht auf dem ganzen Kommunikationsweg gesichert ist. Derzeit ist die Integrität und Vertraulichkeit der Kommunikation zwischen einem Service und dem Manufacturing Service Bus (MSB) über Transport Layer Security gesichert. Dies bedeutet aber nicht, dass damit auch die Kommunikation zwischen zwei Services sicher ist, obwohl beide Services über den MSB kommunizieren. Eine Designentscheidung der Unternehmensplattform ist es, dass die Vertraulichkeit der Nachrichten vom MSB gebrochen wird. Der Grund dafür sind die Funktionen des MSB wie die Transformation von Datenformaten, das inhaltsbasierte Routing und das Extrahieren von Inhalten aus Nachrichten. Für diese Funktionen muss der MSB den Inhalt der Nachrichten lesen können, und daher wäre eine Verschlüsselung kontraproduktiv. Zudem kann die Integrität der Nachrichten nicht gewährleistet werden, weil der MSB selbst Nachrichten manipulieren kann und für die bereits erwähnte Transformation dies auch muss. Zusätzlich ist es auch möglich, dass ein Service eine Nachricht mit einem falschen Urheber an den MSB sendet. Derzeit erfolgt die Autorisierung innerhalb der Unternehmensplattform ausschließlich durch den MSB; dadurch wird der MSB zum Single Point of Failure.

Für die Marktplattform und die darüber angebotenen Services ergab das Threat Modeling die folgenden wesentlichen Ergebnisse: Die Umstellung der Architektur der Marktplattform zu einem Service-Broker, der den Kontakt vermittelt, trägt zur Verringerung der Angriffsfläche bei. Lediglich die Registrierung, die Suche nach Services und die Kontaktvermittlung zwischen Unternehmen und Service müssen abgesichert werden. Hinzukommt, dass ein Ausfall der Marktplattform nicht zu einem Ausfall aller über sie angebotenen Service führt. Dafür sind diese Services verpflichtet, selbst eine Authentifizierung, Autorisierung und die Absicherung des Kommunikationskanals durchzuführen.

Als ESP-übergreifende Erkenntnisse können folgende Punkte festgehalten werden: Bei der Mehrheit der Services der Unternehmensplattform und der Marktplattform existierte noch kein oder kein ausreichendes Logging-Konzept. Zur Erhöhung der Funktionssicherheit muss bei den Services noch eine Datenvalidierung erfolgen, und die Integration der Services kann noch verbessert werden.

5.1.2 Sicherheitslevel

Für die Einstufung in den passenden Sicherheitslevel ist der Schutzbedarf der Informationen festzulegen, die eine Komponente verarbeitet, sowie das Risiko eines Angriffs auf die Komponente zu ermitteln. Als Bewertungskriterium für den Schutzbedarf der Daten dient die Einschätzung des möglichen Schadens im Falle eines erfolgreichen Angriffs, der den Verlust der Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit zufolge hat. Die abgestuften Sicherheitslevel (SL 0 bis SL 4) stellen mit zunehmendem Sicherheitslevel höher werdende Anforderungen an die zu ergreifenden IT-Sicherheitsmaßnahmen. Dabei wird der Angreifertypus in die Betrachtungen einbezogen (geringste Fähigkeiten bis zu staatlichen Organisationen) und ebenso die notwendigen Maßnahmen, die dem tatsächlichen Schutzbedarf der Daten entsprechen. Eine detaillierte Übersicht zu den Sicherheitslevels ist Ronge et al. (2021) zu entnehmen.

Für die Komponenten der Unternehmensplattform gilt, dass meist der Verfügbarkeit sowie der Integrität von Daten die höchste Priorität zugemessen wird. Werden für die Optimierung der Energieflexibilität Auftragsdaten oder Produktionsdaten benötigt und diese über den MSB zwischen Services ausgetauscht, resultieren hieraus ggf. zusätzliche Anforderungen an den Schutz der Vertraulichkeit dieser Daten. Gleiches gilt für den Datenaustausch, der über den MIBS zwischen externen Services und lokalen Services erfolgt. Durch Filterung und Anonymisierung an der Datenquelle kann hierbei oft ein zu hoher Sicherheitslevel vermieden werden.

In der Phase der Erstellung von Flexibilitätsinseraten ist ein hoher Schutz gegen Manipulation gefordert. Bei der Umsetzung einer gebuchten Flexibilität kommen hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit hinzu, damit diese auch tatsächlich umgesetzt wird.

Aus Sicht der Netzbetreiber (Stromnetze) steigen mit der Höhe der angebotenen und vermarkteten Leistung die Anforderungen. Sie finden ihr Maximum, wenn ein System als KRITIS gilt. Aus Unternehmenssicht steht hingegen zumeist die Einhaltung von Produktionszielen (u. a. Einhaltung von Lieferterminen) im Vordergrund. Der niedrigste Sicherheitslevel, der beim Einsatz in KRITIS gewählt werden kann, ist SL3. Für die Kernkomponenten der Unternehmensplattform und der Marktplattform zeigte die Analyse, dass auch ohne Einordnung als KRITIS meist eine Einstufung in SL 3 erfolgte, während für andere Services häufiger auch niedrigere Sicherheitslevel ausreichend sind (*Tabelle 3* und *Tabelle 4*).

Tab. 3 Sicherheitslevel von Kernkomponenten und ausgewählten Services der Unternehmensplattform

Komponente oder Services der Unternehmensplattform	Art	Sicherheitslevel
Platform Services	Kernkomponente	SL 3
Vermarktungskomponente	Kernkomponente	SL 3
Manufacturing Service Bus (MSB-Middleware, IaaS-Interface)	Kernkomponente	SL 3
Smarter Konnektor (SK)	Kernkomponente	SL 3 (ggf. SL 4, wenn höchste Verfügbarkeit gefordert)
Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS)	Kernkomponente	SL 3
Marktinformationsbeschaffungsservice (MIBS)	Kernkomponente	SL 2 (nur Marktinformationen) SL 3 (beliebige Dienste)
Merge-Service	Service	SL 2
Diverse Optimierungsservices	Service	SL 2 bis SL 3

Tab. 4 Sicherheitslevel der Marktplattform an sich und von ausgewählten, an die Marktplattform angebotenen Services

Komponenten der Marktplattform oder externe Services	Art	Sicherheitslevel
Marktplattform	Kernkomponente	SL 3
Aggregator-Flexibilitätshandel	Service	SL 3
Lokaler Flexibilitätshandel	Service	SL 3
Flexibilitätsplanungstool (Flex-Tool)	Service	SL 2
Prognosedienste für Märkte und Netze	Service	SL 2

5.1.3 Nutzung von kryptografischen Zertifikaten

Die Energiesynchronisationsplattform hat eine eigene Public Key Infrastructure (PKI). Die zentrale Zertifizierungsstelle (Certificate Authority, CA) der PKI wird auf der MP betrieben. Die PKI beinhaltet ein sogenanntes Wurzelzertifikat, welches den Vertrauensanker für die gesamte PKI bildet. Direkt unter dem Wurzelzertifikat befinden sich zwei Zwischenzertifikate. Mit dem einen Zwischenzertifikat stellt die CA weitere Zwischenzertifikate für die an der ESP teilnehmenden energieflexiblen Industrieunternehmen aus. Mit dem zweiten Zwischenzertifikat unter dem Wurzelzertifikat stellt die CA wiederum Zwischenzertifikate für die auf der Marktplattform registrierten Services aus.

Sowohl die Unternehmen als auch die marktplattformseitigen Services können mit ihren Zwischenzertifikaten eine eigene CA betreiben und damit Subsysteme und Zugriffskonten in der Energiesynchronisationsplattform mit Zertifikaten versorgen. So können beispielsweise Komponenten der Unternehmensplattform die Zertifikate nutzen, um EFDM-Objekte zu signieren, oder Nutzer, um sich beim lokalen Flexibilitätshandel mit Zertifikaten zu authentifizieren.

Der Aufbau der PKI ist in *Abbildung 8* illustriert. Gezeigt werden auch die Zertifikate der sogenannten Online Certificate Status Protocol Responder (OCSP-Responder) auf Seiten der Marktplattform, womit die OCSP-Funktionalität zum Prüfen des Widerrufsstatus von Zertifikaten umgesetzt wird.

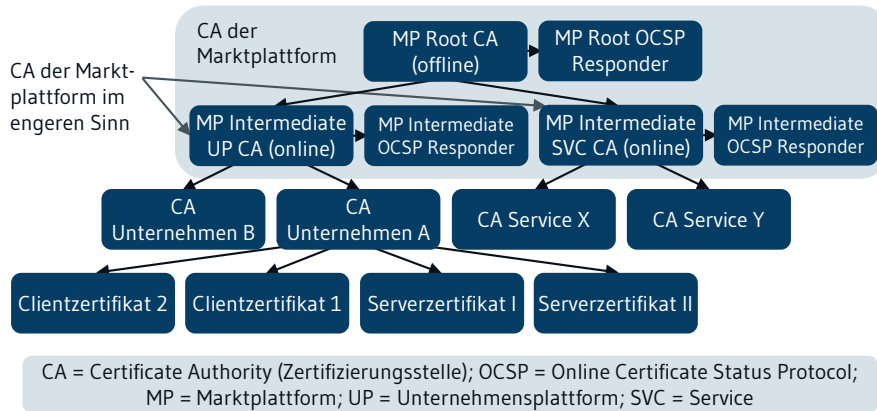


Abb. 8 Aufbau der SynErgie-PKI

5.1.4 Rollendefinitionen und Rechtemanagement

Ein weiteres Sicherheitsmerkmal der Energiesynchronisationsplattform ist die Umsetzungen eines geeigneten Rechte- und Zugriffsmanagements. Für die ESP und ihre Teilplattformen wurde ein rollenbasiertes Rechtekonzept gewählt. Basis eines rollenbasierten Rechtekonzepts ist die Definition von Rollen, denen ganz spezifische Aufgaben übertragen und die für die Aufgaben erforderlichen Rechte eingeräumt werden. Je granularer die Definition der Rollen erfolgt, desto übersichtlicher ist die Vergabe der notwendigen Rechte. Die Besetzung einer Rolle erfolgt durch die Zuweisung der Rolle zu einer Stelle, also einem Mitarbeiter. Ein Rollenkonzept ermöglicht, dass ein Mitarbeiter mehrere Rollen in einem Unternehmen übernimmt. Ebenso kann eine Rolle aber auch mehreren Mitarbeitern zugeordnet werden.

Bei kritischen Infrastrukturen ist die Besetzung von Rollen an Bedingungen geknüpft. Hier sind die Anforderungen aus dem internationalen Standard ISO/IEC 27001 Anhang A (27001:2017) zu beachten, die sich speziell mit dem Thema der Sicherheitsüberprüfungen und Beurteilung der Befähigung bei der Vergabe und Besetzung von Rollen beschäftigen.

Für die Beschreibung der erforderlichen Rollen im Rahmen des Deployments und des Betriebs der Plattformen werden diese in sechs Kategorien unterteilt: Infrastrukturbetreiber, Plattformbetreiber, Administratoren, Nutzer, IT-Sicherheitsteam und Incident Team.

5.1.5 Security Life Cycle Management

Die Services von Unternehmens- und Marktplattform unterliegen, wie jedes andere Produkt auch, einem Lebenszyklus. Dieser beginnt bei der ersten Idee, erstreckt sich über die Entwicklung und den Betrieb und endet mit der Außerbetriebnahme bzw. mit der Deinstallation des Service. Jede einzelne Phase im Lebenszyklus eines Service oder einer Komponente muss hierbei Beachtung finden (*Abbildung 9*). Das Security Life Cycle Management (S-LCM) legt für jede Lebensphase eines Service der Energiesynchronisationsplattform Anforderungen fest und definiert Maßnahmen, die in der jeweiligen Lebensphase umzusetzen sind. Damit das erforderliche Sicherheitsniveau angemessen bleibt, ist eine kontinuierliche Überprüfung erforderlich. Ändern sich beispielsweise Funktionen eines Service, Angriffsrisiken oder gesetzliche Rahmenbedingungen, so kann dies eine Änderung des erforderlichen Sicherheitslevels für die Services erfordern oder auch Anpassungen der definierten Maßnahmen innerhalb des Sicherheitslevels.



Abb. 9 Lebensphasen im Lebenszyklus eines Service

5.2 Umsetzungsmaßnahmen

Aus den Sicherheitslevels und dem Threat Modeling leiten sich umfangreiche IT-Sicherheitsanforderungen an die Energiesynchronisationsplattform ab. Diese führen durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen zu einer Reduzierung des Risikos, Opfer einer Cyber-Attacke zu werden. Bei der Durchführung der Workshops zum Threat Modeling und der Bestimmung der Sicherheitslevel zeigten sich mögliche Schwachstellen, die durch nachfolgend beschriebene, serviceübergreifende Umsetzungsmaßnahmen adressiert werden können.

5.2.1 Filterung der Daten an der Datenquelle – Vererbung von Anforderungen

Die Daten sollten – sofern dies möglich ist – bereits an der Datenquelle dem Need-to-Know-Prinzip entsprechend gefiltert, abstrahiert oder redigiert werden, damit die Anforderungen an die Vertraulichkeit und dementsprechend die erforderlichen Maßnahmen überschaubar und handhabbar bleiben. Ansonsten könnte eine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung von Daten erforderlich sein, was durch die brokerbasierte Kommunikation über den MSB (*Kapitel 5.1.1*) erschwert wird.

5.2.2 Nutzerauthentifizierung über einen zentralen SSO-Service mit der Möglichkeit zur Anbindung an existierende Benutzerverwaltungssysteme

Viele Services müssen Benutzer authentifizieren. Um die Angriffsfläche zu verkleinern, ist es ratsam, die Authentifizierung auf einen Single-sign-on-Service auszulagern (SSO-Service). Dadurch werden sensible Daten wie Passwörter an wenigen Orten gespeichert. Zudem wird die Außerbetriebnahme von Nutzerkonten erleichtert und der Entwicklungsaufwand des Service verringert.

5.2.3 Zentrales Logging in der Unternehmensplattform und einheitliches Format für Log-Nachrichten

Zu einer erfolgreichen Sicherheitsstrategie gehört neben der Reduktion der Risiken, der Minimierung des potenziellen Schadens und der Aufwandserhöhung für den Angreifer auch die Erkennung und Protokollierung eines Angriffs. Nur wenn man einen Angriff erkennt, ist man in der Lage, aktiv dagegen vorzugehen; und nur wenn man einen Angriff nachvollziehen kann, kann man ihn in der Zukunft verhindern. Die Sammlung und Analyse wird in einem Unternehmen idealerweise zentral von der IT verwaltet. Log-Nachrichten werden dazu von einem Security Information and Event Management (SIEM) gesammelt und von einem Intrusion Detection System (IDS) oder einem Intrusion-Prevention-System (IPS) verarbeitet. Diese Systeme benötigen daher auch die sicherheitsrelevanten Ereignisse aus der Unternehmensplattform, um ihre Aufgaben zu erledigen.

Innerhalb der Unternehmensplattform muss ein zentraler Log-Server vorgesehen werden, damit die Anbindung der Plattform an die Unternehmens-IT leichter vonstattengeht. Für die Log-Nachrichten muss ein einheitliches Format definiert werden. Dieses dient der Übersichtlichkeit und erleichtert eine automatisierte Auswertung und Analyse von Einträgen durch SIEM, IDS und IPS.

5.2.4 Bessere Unterstützung für ein automatisiertes Deployment

Viele Services auf der Unternehmensplattform bieten eine Web-Schnittstelle in Form einer grafischen Benutzeroberfläche an, mit welcher der Service im laufenden Betrieb neu konfiguriert werden kann. Dies verursacht zwei Probleme: Zum einen muss eine solche Web-Schnittstelle von einem Menschen

bedient werden und kann nicht ohne Weiteres automatisiert werden. Zum anderen benötigt diese Web-Schnittstelle eine Authentifizierung und Autorisierung, welche innerhalb des Service umgesetzt werden muss.

Es ist daher empfehlenswert, stattdessen eine Konfigurationsdatei zu verwenden, die durch die Authentifizierung und Autorisierung des Betriebssystems geschützt werden kann. Eine Konfigurationsdatei lässt sich auch einfacher in Continuous Integration / Continuous Delivery Pipelines (CI/CD-Pipelines) verwenden.

5.2.5 Signieren der EFDM-Nachrichten

Innerhalb der Unternehmensplattform werden Informationen zwischen Services über den MSB ausgetauscht. Somit besteht kein Ende-zu-Ende gesicherter Kanal zwischen den involvierten Services. Geschützt ist hier nur die Kommunikation zwischen dem jeweiligen Service und dem MSB. Zudem ist der Ursprung einer Nachricht für einen empfangenden Service nicht überprüfbar. Viele Services vertrauen jedoch darauf, dass der MSB nur Informationen und Nachrichten übermittelt, die von bestimmten Services kommen. Dabei ist aber nicht ausgeschlossen, dass der MSB als »Confused Deputy« handelt (siehe Hardy, 1988 für Details). Um das Problem abzumildern, müssen Nachrichten, die über den MSB versandt werden, vom Sender signiert werden und die Empfänger müssen diese Signatur überprüfen.

5.2.6 Testdaten für das Energieflexibilitätsdatenmodell

Für die Übertragung von EFDM-Objekten wird das Energieflexibilitätsdatenmodell in das JSON-Format serialisiert. Allerdings hat der JSON-Standard Unklarheiten, die zum Sicherheitsproblem werden können. Um dem zuvorzukommen, sollte eine Datenbasis an validen und nicht validen Testdaten für das Energieflexibilitätsdatenmodell erstellt werden. Mit diesen Testdaten können dann alle Services, die EFDM-Objekte empfangen, auf deren Konformität mit der EFDM-Spezifikation und auf Robustheit im Umgang mit dem JSON-Format überprüft werden.

5.2.7 Kapselung auf Netzwerk- und Anwendungsebene

Umfangreiche IT-Infrastrukturen erfordern eine fortschrittliche Strategie für die Netzwerksicherheit. Dabei ist es nicht ausreichend, das gesamte Netzwerk mit einer Firewall nach außen abzugrenzen. Vielmehr sollte das interne Netzwerk in kleine, logische Einheiten segmentiert sein, und alle diese Einheiten sollten mit Netzwerksicherheitsmaßnahmen voneinander gekapselt werden. Dies verhindert, dass ein Angreifer, der an einer Stelle in das Firmennetz eingedrungen ist, sich ungestört weiträumig im Netzwerk bewegen und weitere Systeme infiltrieren kann. Zudem hat die äußere Firewall eines Unternehmens in der heutigen vernetzten Welt viele Öffnungen, sodass die äußere Angriffsfläche groß und unübersichtlich ist. Durch geeignete Segmentierung kann man hier zu übersichtlichen, geschützten Bereichen gelangen.

Für die Einbettung der Unternehmensplattform in eine Unternehmensinfrastruktur bedeutet dies, dass die Plattform in einem eigenständigen, geschützten Netzwerksegment oder in einer geschützten Cloud-Umgebung betrieben werden sollte. Verbindungen mit anderen, ebenfalls gekapselten Bereichen wie dem Büronetz oder dem Produktionsnetz sind somit nur über explizit freigegebene und geschützte Zugriffswege möglich.

Ebenso ist es zu vermeiden, dass beliebige Komponenten der Unternehmensplattform Verbindungen mit Systemen außerhalb haben können. Stattdessen sind hierfür in der Architektur der Unternehmensplattform dedizierte Konnektoren sowie der MIBS und die Vermarktungskomponente vorgesehen (*Kapitel 2*). Weiterhin sollten die einzelnen Services innerhalb der Unternehmensplattform voneinander gekapselt sein, d. h. nur über definierte Schnittstellen zugänglich sein, Eingangsdaten bzgl. Format, Struktur und Inhalt validieren sowie für die eigene Datenhaltung private Ablageorte haben, die gegen den Zugriff anderer Services geschützt sind.

6 Demonstratoren

Autoren: Schlereth · Kalchschmid · Lindner · Kaymakci · Schimmelpfennig · Schulz, J.

Zur Validierung der entwickelten Konzepte und Lösungen sowie der technischen Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels werden Unternehmens- und Marktplattform sowohl im Forschungsumfeld als auch im industriellen Umfeld erprobt. Darüber hinaus wird die Energiesynchronisationsplattform in Form einer Demonstrationsplattform mit innovativen, regionalen Marktmechanismen in einem konzeptionellen Testbetrieb in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg unter Beteiligung der ansässigen Unternehmen und Netzbetreiber getestet (*Kapitel A.3*). Im Folgenden werden die Demonstratoren und die zentralen Erkenntnisse vorgestellt. Die Demonstratoren decken entweder branchenübergreifende Anwendungsfälle ab, oder sie sind branchenspezifisch.

6.1 Übersicht der Demonstratoren

6.1.1 Nutzung von inhärenten Speichern und bivalenten Verbrauchern in der gesamtkostenbasierten Produktionssteuerung

Anhand eines Anwendungsfalls im Forschungsumfeld wird demonstriert, wie bivalente Verbraucher und inhärente Speicher in Produktionssystemen berücksichtigt und gezielt genutzt und so in der Produktionsplanung und -steuerung sinnvoll eingesetzt werden können. Zum Nachweis der dadurch erzielbaren Vorteile wird ihre Nutzung durch Anwendung des Unternehmensplattform-Service »Gesamtkostenbasierte Produktionssteuerung« ökonomisch bewertet.

6.1.2 Pooling und Optimierung von Produktionsinfrastruktur

Ein weiterer Demonstrator im Forschungsumfeld illustriert, wie Anlagen durch einen gemeinsam optimierten Betrieb in der Produktionsinfrastruktur flexibler und kosteneffizienter zum Einsatz kommen können. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie verschiedene Services der Unternehmensplattform miteinander interagieren, um durch einen optimierten Anlagenbetrieb das größtmögliche Potenzial zur Einsparung von Energiekosten zu realisieren.

6.1.3 Regelkreis einer Aluminiumelektrolyse mit dem Flexibilitätseinsatzplanungstool

Der industrielle Demonstrator veranschaulicht anhand eines Anwendungsfalls der TRIMET Aluminium SE das Zusammenspiel zwischen Unternehmens- und Marktplattform und verdeutlicht dabei die sich ergebenden Vorteile im Zusammenspiel mit dem Flexibilitätseinsatzplanungstool. Das Flexibilitätseinsatzplanungstool unterstützt Unternehmen dabei, den optimalen Zeitpunkt und Energiemarkt für den Einsatz ihrer Energieflexibilität zu finden. So können die wirtschaftlichen Erlösmöglichkeiten bei der Energieflexibilitätsvermarktung erhöht werden. Das Ergebnis wird an die Unternehmensplattform zurückgespielt und visualisiert. Seitens TRIMET kommt hierbei das System »Flexys« zum Einsatz. Eine detailliertere Vorstellung erfolgt in *Kapitel B.1*.

6.1.4 Intelligente Betriebsführung eines Schmelzofen-Verbunds

Der industrielle Demonstrator der intelligenten Betriebsführung eines Schmelzofenverbunds soll die energieflexible, optimale Fahrweise der elektrischen Heizelemente ein oder mehrerer bivalenter Öfen darstellen. Dabei werden durch Services auf der Unternehmensplattform die Lastkurve der Öfen optimiert, Energieflexibilitäten identifiziert und Energieflexibilitätsdatenmodelle bereitgestellt.

6.1.5 Anbindung existierender IoT-Plattformen an die ESP

In der Praxis finden industrielle IoT-Plattformen zunehmend Anwendung. Die damit in Unternehmen bereits vorhandene Konnektivität zu Maschinen und Anlagen kann für eine schnelle Anbindung an die Energiesynchronisationsplattform (ESP) genutzt werden. Dies wird in einem Demonstrator im Forschungsumfeld exemplarisch veranschaulicht.

6.1.6 Konzeptioneller Testbetrieb in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Im konzeptionellen Testbetrieb der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wird die Energiesynchronisationsplattform im regionalen Kontext unter Einbezug aller relevanten Stakeholder erprobt. Instanzen der Unternehmensplattform werden bei den energieflexiblen Fabriken implementiert, damit diese über die Marktplattform auf unterschiedliche Services zugreifen können, etwa den

lokalen Flexibilitätshandel. Verteilnetzbetreiber haben ebenfalls Zugang zur Marktplattform und die darauf angebotenen Services, um das industrielle Nachfrageflexibilitätsangebot zur regionalen Netzstabilisierung zu testen.

6.2 Wichtigste Erkenntnisse

Eine kontinuierliche Absprache zwischen den Unternehmen und den Anbietern von Services ist unverzichtbar, um frühzeitig kritische Abhängigkeiten und Herausforderungen erkennen zu können. Zudem ist umfassendes (branchenspezifisches) Know-how und eine detaillierte physikalische Beschreibung der Prozesse erforderlich, um die Demonstration erfolgreich durchzuführen. Auch ist das kollektive Ausfüllen des Energieflexibilitätsdatenmodells sehr wichtig, um ein gemeinsames Verständnis von den betroffenen Prozessen zu entwickeln. Die Implementierung der Unternehmensplattform ist je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Aufwänden verbunden, die sich durch die in den Unternehmen bestehenden Anlagen, Produktionsprozesse und IT-Systeme sowie die gehobenen Energieflexibilitätspotenziale ergeben.

Die Demonstratoren zeigen, dass die meisten Flexibilisierungsprojekte bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) auch Digitalisierungsprojekte sind, da oftmals die Verarbeitung von Daten aus der Produktion im Vordergrund steht und bislang nicht durchgängig umgesetzt ist.

Trotz dieser Herausforderungen ergeben sich aus der Nutzung der Energiesynchronisationsplattform vielfältige Chancen. Sie ermöglicht durch eine breite Aufstellung an Services und Komponenten die Behandlung und übergreifende Optimierung verschiedenster produktions- und energietechnischer Problemstellungen. Eine rein unternehmensplattformspezifische Optimierung (Pooling und Optimierung von Produktionsinfrastruktur) ist dabei ebenso möglich wie die energiewirtschaftliche Optimierung durch die Kombination aus UP und MP (Regelkreis bei TRIMET). Neben den existierenden Lösungen veranschaulichen die Demonstratoren beispielhaft, wie andere (IoT-)Plattformen angebunden werden können oder der konzeptionelle lokale Flexibilitätshandel in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg Anwendung findet. Die Beispiele zeigen die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten der Energiesynchronisationsplattform hinsichtlich externer Systeme und Flexibilitätsnutzer.

7 Fazit und Ausblick

Autoren: Schlereth · Bauer · Bauernhansl

Die in Bauernhansl et al. (2019) entwickelte Konzeption der Energiesynchronisationsplattform konnte verbessert und um relevante Services und Komponenten erweitert werden. Damit ist das Ziel, die Nutzung industrieller Energieflexibilität zu automatisieren und die Kommunikation zu standardisieren, einen Schritt näher gerückt. Die Betrachtungsweisen beider Plattformen sind dabei unterschiedlich: Die Marktplattform fungiert einerseits als Vermittler zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern und umfasst andererseits auch eigene Services, um beispielsweise den Flexibilitätseinsatz zu optimieren. Demgegenüber umfasst die Unternehmensplattform eigens entwickelte Services zur Erfassung, Optimierung und Nutzung von Energieflexibilitäten.

Durch das Vorgehensmodell TOGAF konnten die Prozesse der Energiesynchronisationsplattform in unterschiedlichen Granularitäten entwickelt und modelliert werden. Das entwickelte Energieflexibilitätsdatenmodell ermöglicht einen standardisierten Austausch von Informationen zu Energieflexibilität in einem generischen Format und ermöglicht in seiner aktuellen Version eine umfassende Modellierung durch eine Aufteilung in vier verschiedene Klassen. Bezüglich der IT-Sicherheit konnten umfassende Threat Models sowie Rollen- und Rechtedefinitionen für die Softwarekomponenten erstellt werden. Aus den Threat Models sowie den zuvor definierten Sicherheitslevels konnten zudem umfangreiche Anforderungen an die IT-Sicherheit abgeleitet werden. Die Ergebnisse wurden in Demonstratoren erprobt. Neben allgemeinen Anwendungsfällen im Forschungsumfeld konnte die Energiesynchronisationsplattform auch bei industriellen Partnern erfolgreich eingesetzt werden.

Für die Zukunft ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. So stehen die Implementierung sowie Validierung der Unternehmensplattform und marktseitigen Services in der Praxis sowie die Standardisierung der Energiesynchronisationsplattform und des Energieflexibilitätsdatenmodells im Fokus. Die Erarbeitung eines Teilmodells für die Verwaltungsschale auf Basis des Energieflexibilitätsdatenmodells und seine Standardisierung wird angestrebt, und die Umsetzung in weiteren IoT-Plattformen ist geplant. Hinsichtlich der Optimierung sollten weitere algorithmische Ansätze untersucht und verbessert werden.

8 Literatur

BAUER, D., E. ABELE, R. AHRENS, T. BAUERNHANSL, G. FRIDGEN, M. JARKE, F. KELLER, R. KELLER, J. PULLMANN, R. REINERS, G. REINHART, D. SCHEL, M. SCHÖPF, P. SCHRAML und P. SIMON, 2017. Flexible IT-platform to Synchronize Energy Demands with Volatile Markets [online]. *Procedia CIRP*, 63, 318–323. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2017.03.088

BAUERNHANSL, T., D. BAUER, E. ABERLE, R. AHRENS, L. BANK, M. BRUGGER, E. COLANGELO, H. EIGENBROD, G. FRIDGEN, V.F. GONZALEZ, A. GRIGORJAN, JARKE, M., R. KELLER, R. LODWIG, J. PULLMANN, REINHART, G., M. RÖSCH, A. SAUER, D. SCHEL, A. SCHLERETH, P. SCHOTT, F. SCHULZ, J. SEDLMEIR, P. SEITZ, P. SIMON und T. WEBER, 2019. Industrie 4.0 als Befähiger für Energieflexibilität. In: A. Sauer, E. Abele und H.U. Buhl, Hg. *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 9783839614792.

BDEW, 2019. B3S Aggregatoren [online] [Zugriff am: 17. September 2020]. Verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190301_B3S-fuer-Anlagen-zur-Steuerung-und-Buendelung-elektrischer-Leistung.pdf

BSI – BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK, 2021. BSI-Kritisverordnung [online] [Zugriff am: 10. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/BSI-KritisV.pdf>

BUHL, H.U., S. DUDA, P. SCHOTT, M. WEIBELZAHL, S. WENNINGER, G. FRIDGEN, S.P. MENCI, M. SCHÖPF, C. VAN STIPHOUDT, M. WEIGOLD und M. LINDNER, 2021. Das Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642370

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. 27001:2017, DIN EN ISO/IEC 27001:2017.

HARDY, N., 1988. The Confused Deputy: (or why capabilities might have been invented). *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 22(4), 36–38. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*.

KOHNFELDER, L. und P. GARG, 1999. The threats to our products. *Microsoft Interface*, Microsoft Corporation, 33. *Microsoft Interface*, Microsoft Corporation.

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021a. E-Flex Scanner [online]. 26. April 2021 [Zugriff am: 21. November 2021]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/e-flex-scanner>

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021b. Energieflexibilitätsaudit [online]. 13. September 2021 [Zugriff am: 21. November 2021]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/eflexaudit>

LÜBBECKE, M., A. KOSTER, P. LETMATHE, R. MADLENER, B. PEIS und G. WALTHER, 2016. *Operations Research Proceedings 2014*. Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-28695-2.

MAIER, F., H. BELHASSAN, N. KLEMPF, F. KOETTER, E. SIEHLER, D. STETTER und A. WOHLFROM, 2017. Decision Support for Structured Energy Procurement. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems: SCITEPRESS – Science and Technology Publications*, S. 77–86. ISBN 978-989-758-241-7.

MCGOVERN, J., S. TYAGI, M.E. STEVENS und S. MATHEW, 2003. Chapter 2 – Service-Oriented Architecture [online]. In: J. McGovern, S. Tyagi, M.E. Stevens und S. Mathew, Hg. *Java Web Services Architecture*. San Francisco: Morgan Kaufmann, S. 35–63. ISBN 978-1-55860-900-6.

MENCI, S.P., G. FRIDGEN, C. VAN STIPHOUDT, J. SCHILP, J. KÖBERLEIN, T. BAUERNHANSL, A. SAUER, A. GRIGORJAN, D. SCHEL, A. SCHLERETH, F. SCHULZ, M. WEIGOLD, M. LINDNER, J. SCHIMMELPFENNIG und C. WINTER, 2021. Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642369

ROESCH, M., D. BAUER, L. HAUPT, R. KELLER, T. BAUERNHANSL, G. FRIDGEN, G. REINHART und A. SAUER, 2019. Harnessing the Full Potential of Industrial Demand-Side Flexibility: An End-to-End Approach Connecting Machines with Markets through Service-Oriented IT Platforms [online]. *Applied Sciences*, 9(18), 3796. *Applied Sciences*. Verfügbar unter: [doi:10.3390/app9183796](https://doi.org/10.3390/app9183796)

RONGE, K., A. OEDER, J. SCHIMMELPFENNIG, C. WINTER und R. AHRENS, 2021. IT-Sicherheit für die Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642372

SCHEL, D., D. BAUER, F.G. VASQUEZ, F. SCHULZ und T. BAUERNHANSL, 2018. IT Platform for Energy Demand Synchronization Among Manufacturing Companies [online]. *Procedia CIRP*, 72, 826–831. ISSN 22128271. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.procir.2018.03.237](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.237)

SCHILP, J., L. BANK, J. KÖBERLEIN, T. BAUERNHANSL, A. SAUER, C. KAYMAKCI, H. EIGENBROD, G. FRIDGEN, R. BAHMANI, S.P. MENCI, M. SCHÖPF, C. VAN STIPHOUDT, M. WEIGOLD und M. LINDNER, 2021. Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642371

SCHOTT, P., J. SEDLMEIR, N. STROBEL, T. WEBER, G. FRIDGEN und E. ABELE, 2019. A Generic Data Model for Describing Flexibility in Power Markets [online]. *Energies*, 12(10), 1893. *Energies*. Verfügbar unter: [doi:10.3390/en12101893](https://doi.org/10.3390/en12101893)

SCHOTT, P., R. AHRENS, D. BAUER, F. HERING, R. KELLER, J. PULLMANN, D. SCHEL, J. SCHIMMELPFENNIG, P. SIMON, T. WEBER, E. ABELE, T. BAUERNHANSL, G. FRIDGEN, M. JARKE und G. REINHART, 2018. Flexible IT platform for synchronizing energy demands with volatile markets [online]. *it – Information Technology*, 60(3), 155–164. ISSN 1611-2776. Verfügbar unter: doi:10.1515/itit-2018-0001

SHOSTACK, A., 2014. *Threat Modeling: Designing for Security*: Wiley Publishing. ISBN 1118809998.

STRBAC, G., 2008. Demand side management: Benefits and challenges [online]. *Energy Policy*, 36(12), 4419–4426. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2008.09.030

TSAI, W.T., X. ZHOU, Y. CHEN, B. XIAO, R.A. PAUL und W. CHU, 2007. Roadmap to a Full Service Broker in Service-Oriented Architecture. In: *IEEE International Conference on e-Business Engineering (ICEBE'07)*, S. 657–660.

VDI 5207, Blatt 1: *Energieflexible Fabrik – Grundlagen*. 2020.

VDI 5207, Blatt 2: *Energieflexible Fabrik – Identifikation und technische Bewertung*. 2021.

WENNINGER, S., L. HANNY, G. KERPEDZIEV, C. JOHNSÉN und V. BÜHNER, 2020. Services der Marktplattform. Steckbriefe [online]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/Services-Marktplattform.pdf>



Technologien für energieflexible Fabriken

- C.1 Chlor-Alkali-Elektrolyse
- C.2 Lastflexible Extraktion biobasierter Carbonsäuren
- C.3 Flexible Luftzerlegungsanlagen
- C.4 Papierherstellung
- C.5 Aluminiumelektrolyse
- C.6 Klimatisierungs- und Raumluftechnik
- C.7 Prozesskälte
- C.8 Prozesswärme
- C.9 Bivalenter Nichteisenmetalldruckguss
- C.10 Bivalente Wärmebehandlung in der Massivumformung
- C.11 Hybride Beheizung in der Stahlindustrie
- C.12 Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicher



Abschnitt C »Technologien für energieflexible Fabriken« stellt Technologien zur Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen für eine Vielzahl unterschiedlicher industrieller Branchen vor, welche im Kopernikus-Projekt SynErgie betrachtet und entwickelt werden. Hierbei lassen sich branchenspezifische Produktionstechnologien sowie branchenübergreifende Querschnittstechnologien unterscheiden. Die Technologien decken ein breites Portfolio von chemischer Industrie (C.1 bis C.3), der Papierherstellung (C.4), der Aluminiumelektrolyse (C.5), der Klimatisierung und Wärmetechnik (C.6 bis C.8), Prozessen mit bivalenter oder hybrider Beheizung (C.9 bis C.11) und fabrikinterner Sektorkopplung (C.12) ab.

Die entsprechenden Kapitel diskutieren die Energieflexibilitätspotenziale sowie die Entwicklung und Umsetzung der entsprechenden Flexibilisierungsmaßnahmen in unterschiedlichen Technologiefeldern. Um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, folgen die einzelnen Kapitel einer einheitlichen Struktur. Nach einer Einführung in die betrachtete Technologie und die Problemstellung werden die in Forschungsarbeiten untersuchten Energieflexibilitätsmaßnahmen aufgeführt. Darauf aufbauend wird eine Analyse des Energieflexibilitätspotenzials dargestellt. Alle dort identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen lassen sich in die möglichen Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieflexiblen Fabrik aus VDI 5207 Blatt 1 einordnen (*Abbildung 1*). Darüber hinaus werden die an den diskutierten Forschungsarbeiten beteiligten industriellen Unternehmen vorgestellt. Im Anschluss daran folgt eine tiefergehende Diskussion der Energieflexibilitätsmaßnahmen, die in den Forschungsarbeiten untersucht wurden, sowie eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Hierdurch erhält der Leser Einblicke in die methodische Bewertung und Umsetzung vielversprechender Energieflexibilitätsmaßnahmen aus unterschiedlichen Branchen.

Literatur

SAUER, A., E. ABELE und H. U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

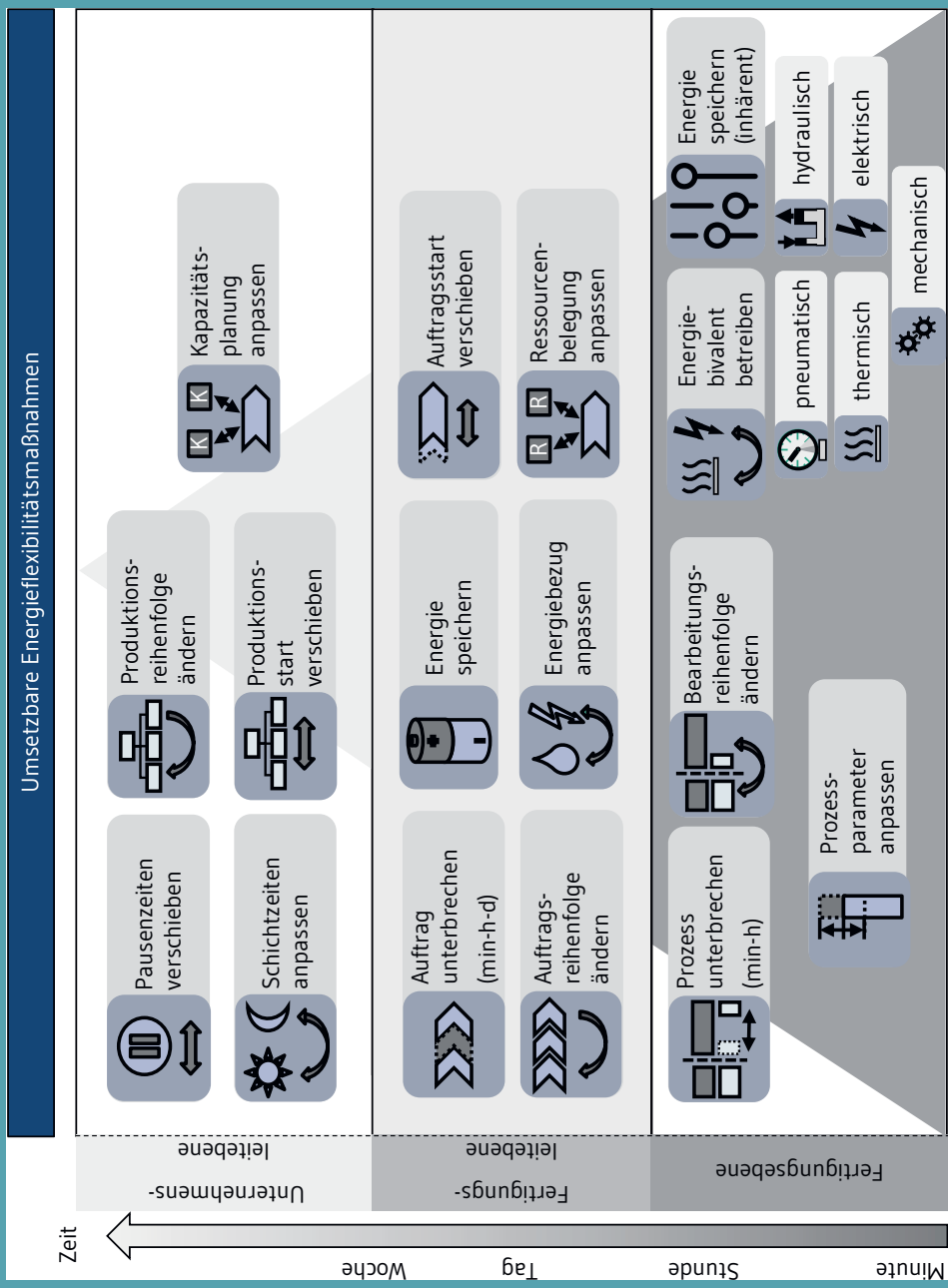


Abb. 1 Übersicht möglicher Energieflexibilitätsmaßnahmen in der energieflexiblen Fabrik (VDI 5207-1; Sauer et al., 2019)





C.1

Chlor-Alkali-Elektrolyse

Management Summary

Die Chlor-Alkali-Elektrolyse ist ein weit verbreiteter und sehr stromintensiver Produktionsprozess und birgt großes Potenzial im Zuge der Flexibilisierung des deutschen Energiemarkts. Trotz vieler Optionen zur Flexibilisierung der Chloralkali-Elektrolyse (Klaucke et al., 2017) bestehen Limitierungen beim Verlassen des optimalen Betriebspunkts, der Langzeitstabilität der Komponenten und des Einflusses reduzierter Chlorproduktion in Kombination mit benötigten Speicherkapazitäten (Ausfelder et al., 2018; Sauer, 2019). Neben der Möglichkeit, den Prozess über variables Lastenmanagement zu flexibilisieren, sind weitere Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) als Kombinationen zweier verschiedener Reaktionsrouten, eine Verknüpfung mit einem Wasserelektrolyseur, einer Brennstoffzelle oder einer Batterie denkbar. Die Energieflexibilitätsmaßnahmen werden basierend auf ihren Ein- und Ausgangsströmen gegeneinander abgewogen und in Bezug auf ihr wirtschaftliches Potenzial verglichen. Abschließend werden die unterschiedlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen in einer Life-Cycle-Assessment-Studie auf ihre ökologischen Auswirkungen untersucht.

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
Cl_2	Chlor	–
e^-	freies Elektron	–
H_2	Wasserstoff	–
H_2O	Wasser	–
$NaOH$	Natriumhydroxid	–
OH^-	Hydroxidion	–
O_2	Sauerstoff	–
Cl^-	Chloridion	–
Na^+	Natriumion	–

Autoren

Baitalow, Kristina
kristina.baitalow@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Lüthje, Jannik
jannik.luethje@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Mitsos, Alexander
alexander.mitsos@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Nilges, Benedikt
benedikt.nilges@lth.rwth-aachen.de
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), RWTH
Aachen University
Schinkelstraße 8, 52062 Aachen

Von der Aßen, Niklas
niklas.vonderassen@lth.rwth-aachen.de
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), RWTH
Aachen University
Schinkelstraße 8, 52062 Aachen

Wessling, Matthias
matthias.wessling@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

1 Grundlagen und Potenziale der Chlor-Alkali-Elektrolyse

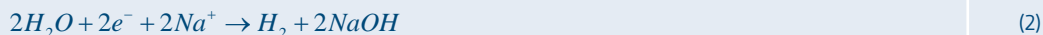
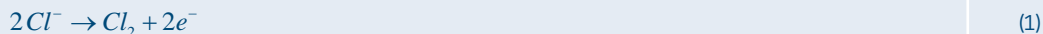
Autoren: Baitalow · Lühje · Wessling · Mitsos

1.1 Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse

Mit den beiden Hauptprodukten Chlor und Natronlauge ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) eines der wichtigsten Verfahren der chemischen Grundstoffindustrie. Chlor und Natronlauge finden in einer Vielzahl chemischer Produkte Anwendung, unter anderem in der Kunststoffherstellung und Papierindustrie. Es wird geschätzt, dass sich etwa 55 Prozent aller chemischen Endprodukte im Verlauf ihrer Herstellung in irgendeiner Form auf die Produkte der CAE zurückführen lassen (Ausfelder et al., 2018). Mit ihrem großen Produktionsumfang und einem Energiebedarf von ca. 11 TWh/a zeigt die CAE ein enormes Potenzial zur Anwendung in einem flexiblen Lastenmanagement, sowohl in Deutschland als auch weltweit (Ausfelder et al., 2018).

Der CAE-Prozess findet in elektrochemischen Zellen statt, die als Einheiten von mehreren sogenannten Stacks in kontinuierlicher Produktion parallelisiert werden.

Abbildung 1 zeigt links den konventionellen CAE-Prozess. Beim konventionellen Betrieb einer CAE-Zelle wird auf der Anodenseite Natriumchlorid in Lösung zugeführt. Die Chlorid-Ionen oxidieren an der Anode zu Chlor. Die positiv geladenen Natrium-Ionen passieren die Membran auf die Kathodenseite, wo sie an der Kathode mit Wasser zu den Nebenprodukten Natronlauge und Wasserstoff reagieren. Damit wird neben Natriumchlorid auch Wasser der Zelle zugeführt. Die Reaktionen des konventionellen Prozesses lauten gemäß Gleichung 1 (Chlorproduktion, Anode) und Gleichung 2 (Wasserstoffproduktion, Kathode):



Ein vielversprechender Ansatz, die CAE für das Lastmanagement zu nutzen, ist die sogenannte »schaltbare Sauerstoffverzehrkathode (sSVK)« (Covestro, 2017).

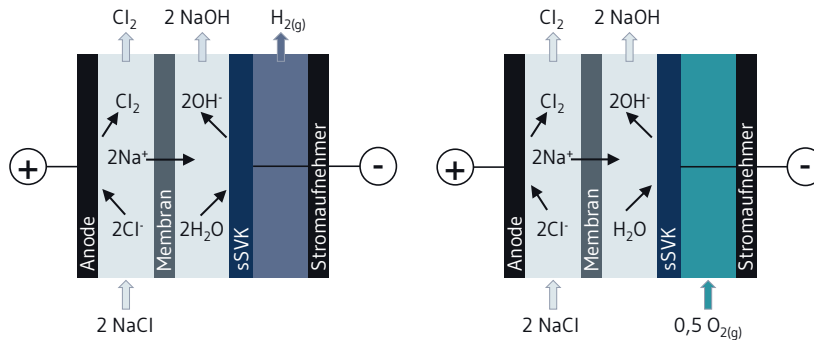
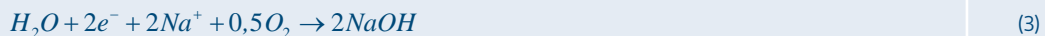


Abb. 1 Chlor-Alkali-Elektrolyse im konventionellen Betrieb (l.) sowie im Sauerstoffverzehrmodus (r.)

Abbildung 1 zeigt auf der rechten Seite den sSVK-Betrieb. Beim Einsatz der sSVK wird die Wasserstoffbildungsreaktion unterdrückt, indem der Zelle kathodenseitig reiner Sauerstoff zugeführt wird. Die sSVK trennt die Edukte Wasser und Sauerstoff räumlich voneinander und katalysiert gleichzeitig die Kathodenreaktion in ihren Poren. Durch den Einsatz der sSVK im Sauerstoffverzehrmodus kann bei gleichbleibender Chlorproduktion der Energiebedarf des Prozesses theoretisch um ca. 33 Prozent gesenkt werden (Jörissen et al., 2011); im Realbetrieb findet man eine tatsächliche Senkung von ca. 25 Prozent. Damit ist die Sauerstoffverzehrreaktion bei moderaten Strompreisen eine energiesparende Alternative zum konventionellen Prozess. Folgende Reaktion läuft im Sauerstoffverzehrmodus an der sSVK ab:



Bei niedrigen Strompreisen kann wiederum in den Wasserstoffmodus geschaltet werden, der aufgrund höherer Zellspannung einen 25 Prozent höheren Energiebedarf aufweist. Dieser Vorgang wird im Folgenden als Schalten bezeichnet. Dabei müssen Wasserstoff- und Sauerstoffströme stets voneinander getrennt sein, um die Bildung eines hochexplosiven Sauerstoff-Wasserstoff-Gemischs, dem sogenannten Knallgas, auszuschließen. Ein Spülvorgang zwischen beiden Modi muss daher gründlich und möglichst kurz sein, um einen wirtschaftlichen Lastwechsel zu ermöglichen (Brée et al., 2019).

Neben der Optimierung des Spülprozesses wird in diesem Teilprojekt auch die Langzeitstabilität der Komponenten nach mehrmaligen Lastwechseln untersucht. Für einen kompletten Schaltzyklus muss der Elektrolyseur auf den stromlosen Zustand heruntergefahren und nach dem Spülvorgang wieder auf den gewünschten Betriebspunkt hochgefahren werden. Auswirkungen dieses prozessbedingten Stresses auf die Komponenten werden im Rahmen von Laborexperimenten untersucht.

Der komplexe Zusammenhang aus Rohstoff- und Strompreisen, Spülzeit und Betriebsweise wird in diesem Teilprojekt simulativ untersucht. Die resultierenden Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Flexibilisierungsmaßnahme und ökologische Aspekte werden abschließend im Rahmen einer LCA-Studie diskutiert.

1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Chlor-Alkali-Elektrolyse

Im folgenden Kapitel werden potenzielle Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) in der Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) und deren wirtschaftliche Bewertungen beschrieben. Typische Energieflexibilitätsmaßnahmen der Chlorherstellung mittels CAE sind Anpassungen in der Produktionsrate oder perspektivisch der Wechsel zwischen den beiden oben beschriebenen Kathodenreaktionen mit unterschiedlichem Energieverbrauch.

Tabelle 1 zeigt mögliche Energieflexibilitätsmaßnahmen und deren Kombinationen, die zur Umsetzung bei Chlorproduzenten denkbar wären. Neben der bereits erwähnten schaltbaren CAE (Roh et al., 2019) werden nachfolgend weitere Flexibilisierungsoptionen vorgestellt und untersucht (Brée et al., 2020).

Tab. 1 Überblick ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen bei deutschen Chlorproduzenten

Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM)	Umsetzungspartner	Branche
Lastenmanagement des Standard-CAE-Prozesses	Chlorproduzent	Chemische Industrie
Lastenmanagement des CAE-Prozesses mit SVK	Chlorproduzent	Chemische Industrie
Lastenmanagement und Schaltung des CAE-Prozesses mit sSVK	Chlorproduzent	Chemische Industrie
Lastenmanagement des CAE-Prozesses als Kombination aus konventioneller und schaltbarer SVK	Chlorproduzent	Chemische Industrie
Schaltbare CAE im Steady-State mit flexiblem Wasserelektrolyseur	Chlorproduzent/Standortbetreiber	Chemische Industrie
Konventionelle CAE im Steady-State mit flexibler Brennstoffzelle	Chlorproduzent/Standortbetreiber	Chemische Industrie
Konventionelle CAE im Steady-State mit Batterie	Chlorproduzent/Standortbetreiber	Chemische Industrie

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der Energieflexibilitätsmaßnahmen aufbauend auf der Studie von Brée et al. (2020). Mögliche Elemente und deren Kombinationen sind der Wasserstoff- bzw. Sauerstoffmodus der CAE, ein Wasserelektrolyseur, eine Brennstoffzelle sowie ein Speicher (z. B. Batterie). Die jeweiligen Modi der Elektrolyseure (Wasserstoff- bzw. Sauerstoffmodus in der CAE oder Wasserelektrolyse) bzw. Brennstoffzelle werden über die ein- und austretenden Stoffströme dargestellt.

Elektrolyseure und Brennstoffzelle werden als Stack-Ansammlung dargestellt. Rote Linien symbolisieren ein variables Lastenmanagement (schwankender Verlauf) bzw. eine konstante Fahrweise (linearer Verlauf).

Die erste Option ist der Standard CAE-Prozess (OV-STC). In der heutigen industriellen Praxis wird die CAE meist bei einer Auslastung von 95 Prozent betrieben (Ausfelder et al., 2018). Zur Bereitstellung von Energieflexibilität muss daher in Überkapazität investiert werden.

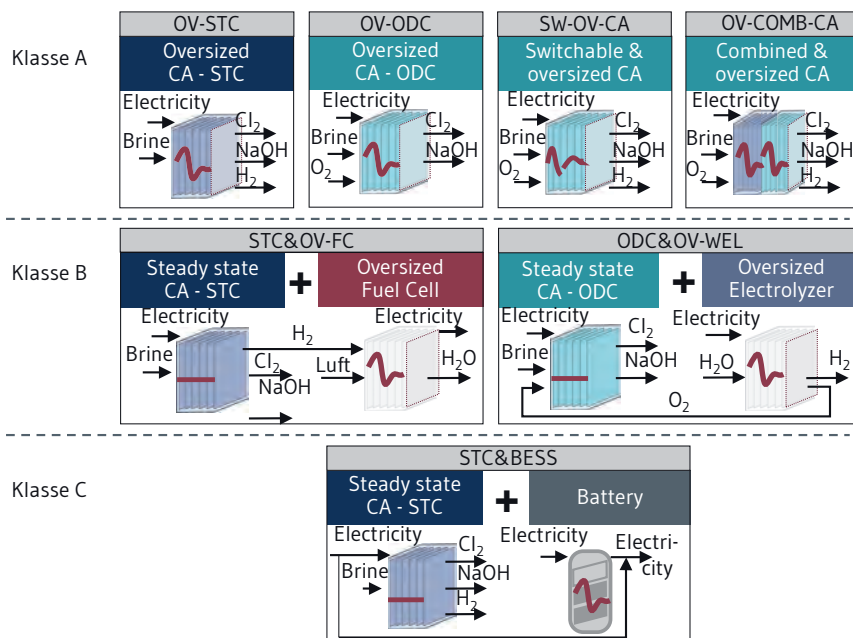


Abb. 2 Übersicht über verschiedene Flexibilisierungsoptionen des CAE-Prozesses

Der Prozess kann auch rein mit der Sauerstoffverzehrkathode (OV-ODC) betrieben werden. Auch hier muss der Prozess überdimensioniert werden, um flexibel betrieben werden zu können.

Standard- und Sauerstoffverzehrkathode können über zwei verschiedene Konfigurationen kombiniert werden: direkt über die vorher diskutierte schaltbare Sauerstoffverzehrkathode in derselben Elektrolysezelle (SW-OV-CA) oder über eine Kombination der einzelnen Reaktionen in einem Elektrolyseur (OV-COMB-CA). In der zweiten Konfiguration werden konventionelle und schaltbare Kathoden anteilig aufgeteilt auf die Zellen im Elektrolyseur, die sogenannten Stacks.

Nutzt man die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode (SW-OV-CA), können die beiden in *Kapitel 1.2.1* vorgestellten Kathodenreaktionen – Wasserstoff- und Sauerstoffmodus – flexibel mit ca. einer Stunde Vorlauf geschaltet werden. Zeitpunkt und Dauer der einzelnen Modi werden durch die Optimierung eines gemischt-ganzzahligen linearen Modells (MILP) bestimmt. Dabei wird die Lösung des Modells vor allem vom Strompreis und den Rohstoffpreisen von Sauerstoff, Natronlauge und Chlor, sowie Bedarf und Rohstoffpreis von Wasserstoff beeinflusst.

Werden beide als nicht schaltbare Kathoden kombiniert (OV-COMB-CA), ist ein Anteil der Stacks mit Standardkathode und der Rest der Zellen mit Sauerstoffverzehrkathode bestückt. Kombiniert mit einer Überdimensionierung, kann das Lastenmanagement je nach Strompreis zusätzlich durch den Fokus auf Wasserstoff- bzw. Sauerstoffmodus unterstützt werden.

Alle diese Flexibilisierungsoptionen lassen sich zur Klasse A zusammenfassen: Sie bieten Flexibilität durch Modifikation des klassischen CAE-Prozesses. Mit Überdimensionierung und Chlorspeicher kann die Produktionsrate stufenweise zwischen 50 und 110 Prozent variiert werden.

In Klasse B wird Flexibilität durch die Bereitstellung der Rohstoffströme realisiert. Die CAE wird auf maximaler Last gefahren und über die Stoffströme Sauerstoff beziehungsweise Wasserstoff flexibilisiert. Für die CAE mit Sauerstoffverzehrkathode wird der benötigte Sauerstoff über die Wasserelektrolyse produziert (ODC&OV-WEL). Da die Wasserelektrolyse flexibel nach Strompreis betrieben wird, wird ein Speicher für den Sauerstoff benötigt. Die Größe dieses Speichers bestimmt das maximale Maß der Flexibilität. Bei Einsatz der Standardkathode kann der produzierte Wasserstoff in einer Brennstoffzelle (STC&OV-FC) zusammen mit Luft zur Stromerzeugung genutzt werden. Der Strom kann dann entweder zur Reduzierung des Strombedarfs der CAE genutzt oder am Strommarkt verkauft werden. Durch Einsatz eines Speichers für Wasserstoff kann die Brennstoffzelle flexibel betrieben werden.

In Klasse C wird die CAE mit unabhängigen, flexiblen Hilfseinheiten verbunden. Beispielsweise wird hier eine Batterie verwendet, die es erlaubt, die CAE unter Maximallast zu fahren und trotzdem von den schwankenden Strompreisen zu profitieren.

1.3 Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse bei der Covestro Deutschland AG

Die Covestro Deutschland AG gehört zu den weltweit führenden Polymer-Anbietern. Ihre Schwerpunkte liegen in der Herstellung von Materialien für die Automobilindustrie, die Elektro- und Elektronikbranche sowie für die Freizeitartikel, Bau- und Sportindustrie. Weltweit betreibt Covestro Elektrolysen unterschiedlicher Technologien (NaCl-Membranelektrolyse, NaCl-SVK, HCl-Diaphragma, HCl-SVK) und zeichnet sich durch eine hohe Expertise im Bereich der Chlorproduktion sowie Elektrolysetechnologien aus. Die SVK-Technologie (Covestro, 2017) wurde von Covestro gemeinsam mit thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers, der RWTH Aachen und weiteren Partnern 2017 entwickelt.

Als Unternehmen mit ambitionierten Nachhaltigkeitszielen und als ein großer Stromkonsument unterstützt die Covestro Deutschland AG die Entwicklung hin zu einem höheren Anteil erneuerbarer Energien am Strommix und möchte einen wesentlichen Teil zur künftigen Energietransformation beizutragen. Insbesondere in Bezug auf den Stromverbrauch und das Abfangen von Lastspitzen liegt hier enormes Potenzial vor.

Vielversprechende Energieflexibilitätspotenziale der Chlorherstellung sind die Regelungen der Produktionsrate (auch bekannt als Demand Side Management), der Wechsel der Kathodenreaktionen mit unterschiedlichem Energieverbrauch zum Abfangen von Lastspitzen oder die Speicherung überschüssiger Energie mithilfe von Batterien bzw. durch den Einsatz von Brennstoffzellen.

1.4 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

Derzeit werden in Deutschland jährlich ca. 3,2 Megatonnen Chlor mittels Membranverfahren produziert (Euro Chlor, 2019). Unter Berücksichtigung des standortspezifischen Bedarfs des Nebenprodukts Wasserstoff sowie der Verfügbarkeit von Sauerstoff wird daher konservativ davon ausgegangen, dass ein Drittel der Chlorproduktion schaltbar genutzt werden kann (Sauer et al., 2019). Dies entspricht einer Kapazität von 1,1 Mt/a. Unter der Annahme des Stromverbrauchs aus der Studie von Jung et al. (2014) ergeben sich ca. 290 MW installierte Anschlussleistung. Geht man von einer Stromersparung von 20 Prozent im Sauerstoffmodus aus, ergibt sich ein Potenzial von 58 MW zur Reduktion von Lastspitzen im Stromnetz.

Das Energieflexibilitätspotenzial ist für alle Energieflexibilitätsmaßnahmen gleich (Tabelle 2). Der Betrieb mit sSVK ist weder zeitlich noch technisch begrenzt, sondern lediglich von den Rohstoff- und Energiepreisen abhängig. Damit können sowohl Wasserstoff- als auch Sauerstoffmodus beliebig lange gefahren werden. Legt man die direkten Emissionen des Strommixes im Jahr 2019 zugrunde, kann das CO₂-Vermeidungspotenzial zu 0,26 Mt/a abgeschätzt werden, wenn der Prozess dauerhaft im Sauerstoffmodus betrieben wird. Diese Betrachtung vernachlässigt jedoch die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus der schaltbaren Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) und berücksichtigt zudem nicht die flexible Fahrweise der Elektrolyse (Detailanalyse in Kapitel 1.3.2).

Tab. 2 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Chlor-Alkali-Elektrolyse

Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM)	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Lastenmanagement des Standard-CAE-Prozesses	58 MW
Lastenmanagement des CAE-Prozesses mit SVK	Abrufhäufigkeit: bis 1.250-mal pro Jahr
Lastenmanagement und Schaltung des CAE-Prozesses mit sSVK	
Lastenmanagement des CAE-Prozesses als Kombination aus konventioneller und schaltbarer SVK	
Schaltbare CAE im Steady-State mit flexiblem Wasserelektrolyseur	
Konventionelle CAE im Steady-State mit flexibler Brennstoffzelle	
Konventionelle CAE im Steady-State mit Batterie	

2 Technische Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Baitalow · Wessling

2.1 Auswirkung flexibler Fahrweise auf die Langzeitstabilität

Um eine realistische, flexible Fahrweise der Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) im industriellen Betrieb zu gewährleisten, ist die Langzeitstabilität der schaltbaren Sauerstoffverzehrkathode (sSVK) beim mehrfachen Schalten zwingend erforderlich. Dies wurde im Labormaßstab für bis zu 1000 Schaltzyklen experimentell untersucht. Hierfür wurde eine Laborzelle in einem Versuchsstand zur Durchführung elektrochemischer Experimente eingebunden. Mithilfe eines LabVIEW-Programms konnten am Versuchsstand vollständig automatisiert Schaltzyklen durchgeführt werden. Ein einzelner Schaltprozess bestand aus Wasserstoffmodus, Spülung, Sauerstofffüllung und Sauerstoffmodus. Wasserstoff- bzw. Sauerstoffreaktion wurden bei $6,7 \text{ kA/m}^2$ und 1 M Natronlauge als Elektrolyt durchgeführt. Die Spüldauer wurde auf das Gasvolumen der Laborzelle abgeschätzt. Dieser Ablauf wurde 1.000-mal wiederholt und dabei die Zellspannung gemessen. *Abbildung 3* zeigt die gemittelte Zellspannung für je 200 Schaltzyklen. Über den gesamten Verlauf wurde ein Anstieg von 0,2 V im Wasserstoff- bzw. 0,16 V im Sauerstoffmodus beobachtet. Zu diesem Spannungsanstieg kommt der Spannungsanstieg anderer Systemkomponenten hinzu, die über die Degradation der Komponenten entstehen; der Einfluss der Schaltzyklen auf diese Komponenten ist noch nicht ermittelt. In Summe gilt es noch den Spannungsanstieg über die Gesamtdauer der Schaltzyklen zu bewerten.

Um strömungstechnische Einflüsse und Leckagen im Dauerbetrieb auszuschließen, wurde ein vergleichsweise großer Elektrodenabstand von ca. 8 mm gewählt. Dies führt dazu, dass die Zellspannung über den üblichen (aus der CAE bekannten) Werten liegt (Jörissen et al., 2011). Beim Vergleich der Anfangs- und Endwerte für die Zellspannung zeigen die Laborexperimente bereits Potenzial für eine stabile Langzeitperformanz der sSVK im Wechselbetrieb einer flexiblen CAE. Die Werte müssen jedoch in weiteren Feldexperimenten bestätigt werden.

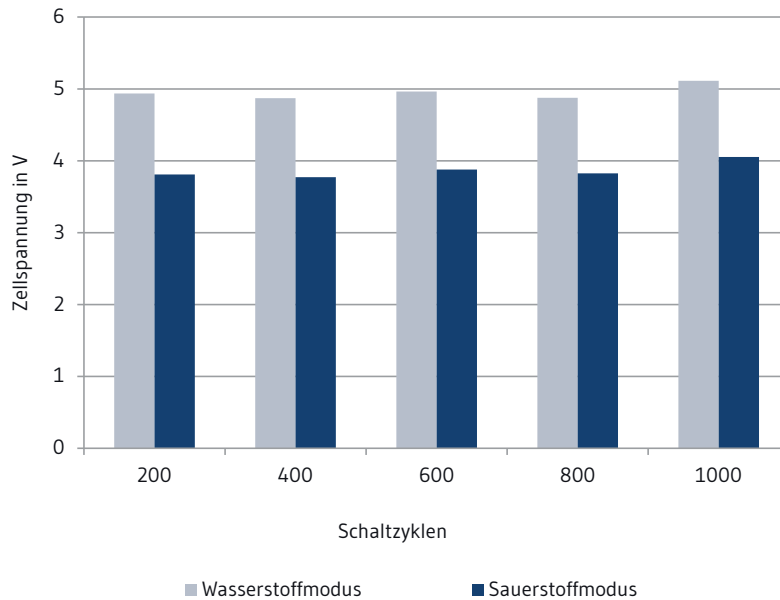


Abb. 3 Verlauf der Zellspannung für den Wasserstoff- bzw. Sauerstoffmodus über 1.000 Schaltzyklen bei 1 M Natronlauge

2.2 Spülverhalten einer Chlor-Alkali-Elektrolysezelle

Ein wesentlicher Schritt in Richtung Umsetzung als schaltbare Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) ist die Ermittlung von Spülzeiten realer Industriezellen. Da während des energiesparenden Modus kathodenseitig Sauerstoff benötigt wird und im Modus mit höherem Energieverbrauch kathodenseitig Wasserstoff erzeugt wird, muss der Kathodenraum vor dem Wechsel gespült werden. Werden die jeweiligen Gase nicht vollständig aus dem Kathodenraum entfernt, besteht das Risiko der Bildung eines explosionsfähigen Gasgemisches (Knallgas). Im Spülvorgang wird das Inertgas Stickstoff verwendet, um die jeweiligen Gase der Reaktionsmodi zu verdrängen. CFD-Simulation können mögliche Totvolumina visuell darstellen; experimentell ermittelte Spülzeiten sollen die Erkenntnisse in der Anwendung belegen.

Abbildung 4 zeigt eine reale CAE-Industriezelle mit zusätzlicher Plexiglasscheibe zur Strömungsvisualisierung am Versuchsstand der Aachener Verfahrenstechnik an der RWTH Aachen. Da während des Schalt- und Spülprozesses die CAE und damit die Chlorproduktion abgeschaltet werden, ist ein Chlorspeicher notwendig. Die Spülzeit sollte 30 Minuten nicht überschreiten, da andernfalls zu viel Chlor gespeichert werden müsste. Das Zelldesign muss daher so entwickelt werden, dass ein sicherer Betrieb einer großtechnisch schaltbaren CAE möglich ist.

Bisherige Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass beim herkömmlichen Zelldesign deutliche Totvolumina im Kathodenraum vorhanden sind. Experimente mit Gaswechseln und einem Nebelgenerator konnten dies bestätigen. Zudem hat sich eine klare Abhängigkeit vom Dichteverhältnis der jeweiligen Gase gezeigt: Leichteres Gas strömt in den oberen Bereich der Zelle und füllt diese von oben nach unten; schwereres Gas sinkt zu Boden und verdrängt das vorliegende Gas von unten nach oben. Im Falle der CAE hat Wasserstoff die kleinste Dichte, ist damit also das leichteste Gas, gefolgt von Stickstoff und Sauerstoff.

Anpassungen sowohl zum Zelldesign als auch zum Spülvorgang sollten daher in weiteren Untersuchungen beleuchtet werden. Neben der generellen Machbarkeit wurde ein bestehender Optimierungsbedarf der Strömungsführung hinsichtlich Zelldesign und Spülsteuerung identifiziert.

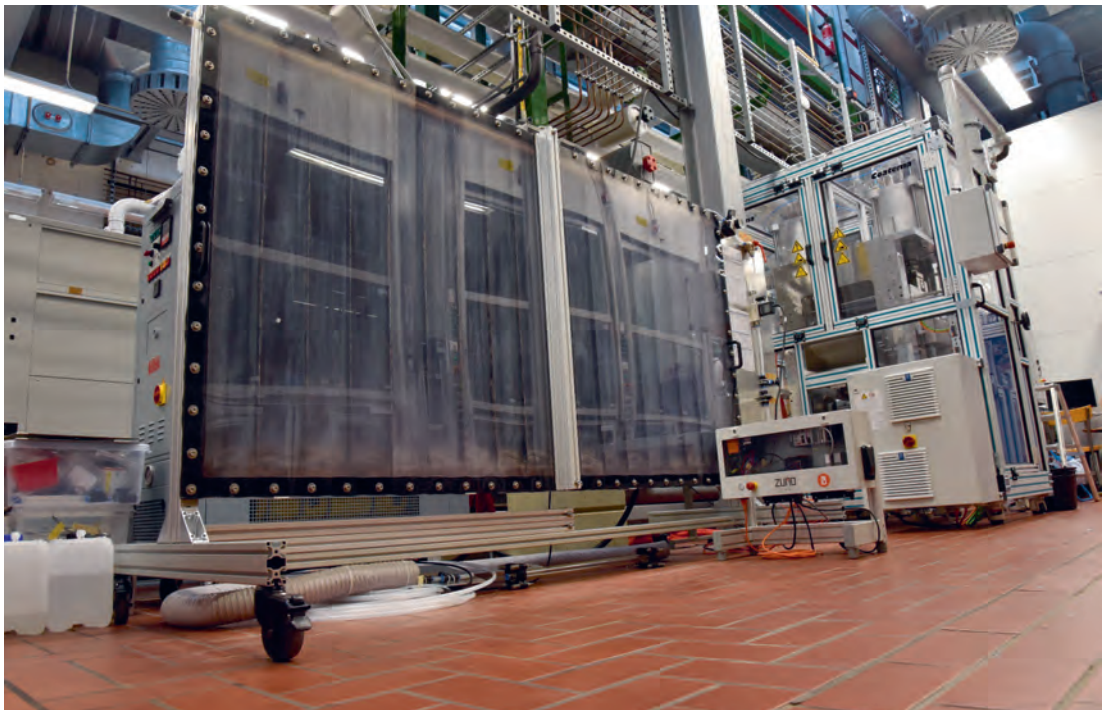


Abb. 4 Versuchsstand mit einer CAE-Industriezelle im Technikum der Aachener Verfahrenstechnik an der RWTH Aachen

3 Wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Lüthje · Nilges · von der Aßen · Mitsos

3.1 Energieflexibilitätsoptionen und ihre Auswirkungen auf den Gesamtprozess

Zum Vergleich der Flexibilisierungsoptionen wird die optimale Betriebsweise der Prozessalternativen über eine Woche ermittelt (Brée et al., 2020). Dazu werden verschiedene Preisprofile und Wasserstoffpreise zugrunde gelegt. Zusätzlich werden verschiedene Überdimensionierungen der Prozesse miteinander verglichen. Der klassische CAE-Prozess mit Standardkathode und 50 MW Kapazität ist dabei der Referenzfall. *Tabelle 3* gibt eine Übersicht über die vier definierten Szenarien. Das Strompreisprofil aus dem Jahr 2018 basiert auf historischen Daten, während für 2030 ein prognostiziertes Strompreisprofil verwendet wird (Kern et al., 2018).

Tab. 3 Um die in Kapitel 1.4 vorgestellten Energieflexibilitätsmaßnahmen zu vergleichen, werden vier Szenarien mit unterschiedlicher Entwicklung von Strom- und Wasserstoffpreisen definiert.

Szenario	Strompreisprofil	Wasserstoffpreis
1	2018	0,5€/kg
2	2018	2,0€/kg
3	2030	0,5€/kg
4	2030	2,0€/kg

Die umfangreiche Diskussion der Auszahlungszeiten der Prozessoptionen für die vier Szenarien wird hier nur kurz zusammengefasst. Für mehr Informationen sei auf Brée et al. (2020) verwiesen.

Ein Vergleich der Auszahlungszeiten zeigt, dass Flexibilisierungsoptionen der Klasse A den ökonomischen Vergleich dominieren. Je nach Wasserstoffpreis sind leicht überdimensionierte CAE-Prozesse mit Standard- oder Sauerstoffverzehrkathode optimal. In den Szenarien 1, 3 und 4 ist die kombinierte Chlor-Alkali-Elektrolyse der schaltbaren CAE überlegen. Von den Prozessen aus Klasse B und C sind für die Szenarien 1 und 3 die Brennstoffzellen-Varianten am profitabelsten; für die Szenarien 2 und 4 sind es die Prozessoptionen mit Batterie. Für alle Szenarien und Energieflexibilitätsoptionen zeigt sich, dass sich kleine Überdimensionierung (2,5 MW) schneller auszahlen als größere Überdimensionierungen.

3.2 LCA-Studie der Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die ökologischen Auswirkungen der schaltbaren Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) können durch die Methode des Life Cycle Assessments (LCA) bewertet werden. Dabei werden die Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet und umfassen somit neben den direkten Umweltwirkungen des Prozesses auch jene zur Herstellung der Eingangsprodukte sowie der Anlagen-

komponenten. Die Bewertung der schaltbaren Elektrolyse wird durch den Vergleich mit einem Referenzsystem durchgeführt, das dieselbe Funktion erfüllen muss (Abbildung 5). Als Funktion der schaltbaren Elektrolyse werden die Herstellung einer festen Menge der Produkte Chlor, Natronlauge und Wasserstoff sowie die Bereitstellung der flexiblen Stromabnahme definiert. Neben der stofflichen Nutzung des Wasserstoffs wird zudem dessen energetische Nutzung untersucht, da der Wasserstoff in einigen Industrieparks zur Wärmebereitstellung genutzt wird. Das Referenzsystem setzt sich aus der konventionellen Elektrolyse sowie Kurz- und Langzeitspeichern für Strom zusammen. Somit kann das Referenzsystem die gleichen Produkte erzeugen und die Flexibilität in der Stromabnahme garantieren. Die Betriebsweise der Prozesse wird über eine ökonomische Optimierung festgelegt. Zur Bestimmung der Umweltwirkungen wurde die Methode Environmental Footprint 2.0 verwendet, die vom Joint Research Center der Europäischen Kommission empfohlen wird (Hauschild et al., 2014).

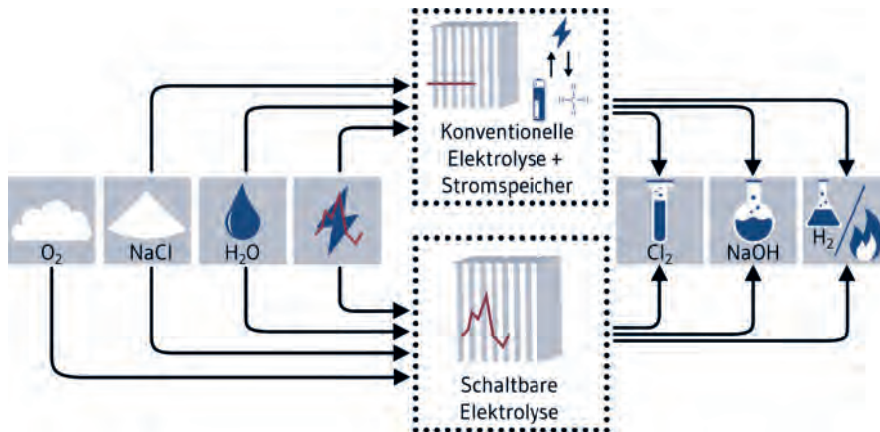


Abb. 5 Vergleich der schaltbaren Elektrolyse mit dem Referenzsystem, das aus der konventionellen Elektrolyse und Stromspeichertechnologien besteht

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass bei der stofflichen Nutzung des erzeugten Wasserstoffs das Referenzsystem in fast allen Umweltwirkungskategorien besser abschneidet als die schaltbare Elektrolyse, darunter auch bei den Treibhausgasen. Dies liegt insbesondere an dem im Vergleich zu sonstigen Herstellungsverfahren für Wasserstoff hohen Wirkungsgrad der konventionellen CAE.

Für den Fall der energetischen Nutzung des Wasserstoffs sind die Umweltwirkungen der schaltbaren Elektrolyse vergleichbar mit jenen des Referenzsystems. Deutliche Vorteile hat die schaltbare Elektrolyse in der Kategorie Humantoxizität, da im Referenzsystem hier höhere Umweltwirkungen durch die Stromspeicherkonstruktion auftreten (Nilges et al., 2022).

4 Literatur

AUSFELDER, F., H.E. DURA, K. ARNOLD, G. HOLTZ, R.-U. DIETRICH und S. ESTELMANN, 2018. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse. [online]. Frankfurt am Main: Florian Ausfelder, Antje Seitz, Serafin von Roon. ISBN 978-3-89746-206-9.

BRÉE, L.C., A. BULAN, R. HERDING, J. KUHLMANN, A. MITSOS, K. PERREY und K. ROH, 2020. Techno-Economic Comparison of Flexibility Options in Chlorine Production [online]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(26), 12186–12196. ISSN 0888-5885. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.iecr.0c01775

BRÉE, L.C., K. PERREY, A. BULAN und A. MITSOS, 2018. Demand side management and operational mode switching in chlorine production [online]. *AIChE Journal*, 65(7), e16352. ISSN 0001-1541. Verfügbar unter: doi:10.1002/aic.16352

COVESTRO DEUTSCHLAND AG. Bifunktionelle Elektrode und Elektrolysevorrichtung für die Chlor-Alkali-Elektrolyse. Erfinder: A. BULAN, R. WEBER UND F. BIENEN. Anmeldung: 4. April 2017. International.

EURO CHLOR, 2019. Chlor-alkali Industry Review 2018–2019 [online], 17 [Zugriff am: 3. November 2021]. Verfügbar unter: <https://www.eurochlor.org/publication/chlor-alkali-industry-review-2018-2019/>

HAUSCHILD, M., M. GOEDKOOP, J. GUINEE, R. HEIJUNGS, M. HUIJBREGTS, O. JOLLIET, M. MARGANI, A. DE SCHRYVER, D. PENNINGTON, R. PANT, S. SALA, M. BRANDAO und M.A. WOLF, 2011. International Reference Life Cycle Data System – ILCD handbook. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context – based on existing environmental impact assessment models and factors [online]. Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-79-17451-3.

JÖRISSEN, J., T. TUREK und R. WEBER, 2011. Chlorherstellung mit Sauerstoffverzehrkathoden. [online]. *Energieeinsparung bei der Elektrolyse. Chemie in unserer Zeit*, 45(3), 172–183. ISSN 00092851. Verfügbar unter: doi:10.1002/ciuz.201100545

JUNG, J., S. POSTELS und A. BARDOW, 2014. Cleaner chlorine production using oxygen depolarized cathodes? [online]. A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 80(1), 46–56. ISSN 09596526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.086

KERN, T., F. BÖING, S. VON ROON, 2018. Merit Order Netz-Ausbau 2030-Preiszeitreihe Basisszenario. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH.

KLAUCHKE, F., T. KARSTEN, F. HOLTRUP, E. ESCHE, T. MOROSUK, G. TSATSARONIS und J.-U. REPKE, 2017. Demand Response Potenziale in der chemischen Industrie [online]. *Chemie Ingenieur Technik*, 89(9), 1133–1141. ISSN 0009286X. Verfügbar unter: doi:10.1002/cite.201600073

NILGES, B., C. BURGHARDT, K. ROH, C. REINERT und N. VON DER ASSEN, 2022. Comparative Life Cycle Assessment of Demand-Side Management via Operational Optimization.

ROH, K., L.C. BRÉE, K. PERREY, A. BULAN und A. MITSOS, 2019. Flexible operation of switchable chlor-alkali electrolysis for demand side management [online]. *Applied Energy*, 255(c), 113880. ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apenergy.2019.113880

SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.





C.2

Lastflexible Extraktion biobasierter
Carbonsäuren

Management Summary

Carbonsäuren können als Plattformchemikalien eingesetzt werden. Aktuell werden sie vorwiegend petrochemisch aus fossilen Rohstoffen hergestellt. Die biotechnologische Herstellung von Carbonsäuren mittels einer Fermentation aus nachwachsenden Rohstoffen stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, die petrochemischen Herstellungsrouten zu ersetzen, sofern eine kosteneffiziente und emissionsarme Prozesstechnik für die Produktaufarbeitung verfügbar ist. Konventionelle Aufarbeitungsprozesse machen bis zu 60 Prozent der gesamten Herstellkosten aus. Bei der Aachener Verfahrenstechnik an der RWTH Aachen wurde ein elektrifizierter, lastflexibler Aufarbeitungsprozess entwickelt, der dazu beiträgt, die Herstellkosten der Carbonsäuren zu reduzieren, sodass die biotechnologische Herstellungsrouten wettbewerbsfähig werden kann. Der elektrifizierte Prozess konnte bereits erfolgreich mit den zwei Carbonsäuren Itacon- und Bernsteinsäure getestet werden. Wenn zur Deckung des bestehenden Bedarfs an Carbonsäuren lastflexible biotechnologische Produktionsverfahren eingesetzt werden, kann in Deutschland perspektivisch ein Energieflexibilitätspotenzial von bis zu 650 MW erschlossen werden. Zusätzlich können weitere Energieflexibilitätspotenziale durch die Speicherung und Weiterverwendung des im elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses anfallenden Wasserstoffs genutzt werden.

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
F	Faraday-Konstante	C/mol
I	Stromstärke	A
P	Leistung	W
f	Catch-up-Capacity-Faktor	
n	Stoffmenge	mol
t	Zeit	s
z	Anzahl der übertragenen Elektronen in einer elektrochemischen Reaktion	–
η	Effizienz	–

Autoren

Schröder, Christian
christian.schroeder@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Jupke, Andreas
andreas.jupke@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Gausmann, Marcel
marcel.gausmann@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

1 Grundlagen und Potenziale der elektrifizierten Carbonsäureherstellung

Autoren: Schröder · Gausmann · Jupke

Im Folgenden werden zunächst der konventionelle Herstellungsprozess für fermentativ hergestellte Carbonsäuren vorgestellt und die Vorteile eines elektrifizierten Prozesses erläutert. Anschließend werden die Möglichkeiten der Flexibilisierung dieses Prozesses beschrieben und die Energieflexibilitätspotenziale abgeschätzt.

Lastflexible Elektrifizierung der industriellen biotechnologischen Carbonsäure-Produktion

Carbonsäuren sind wichtige Zwischenprodukte für die chemische Industrie. Heutzutage werden diese noch überwiegend aus fossilen Rohstoffen hergestellt. Durch Bestrebungen, fossile durch biobasierte Rohstoffe zu ersetzen, gewinnt die Produktion von Carbonsäuren mittels Fermentation auf Basis von Kohlenhydraten zunehmend an Bedeutung. Das US-Energieministerium zählt zehn Carbonsäuren als wertvolle biobasierte Chemikalien auf, darunter Itacon- und Bernsteinsäure (Werpy und Petersen, 2004). Allerdings stellt hierbei die kostenintensive Aufarbeitung, die etwa 60 Prozent der gesamten Herstellkosten ausmachen kann, eine Herausforderung dar (Bechthold et al., 2008). In *Abbildung 1* sind eine Auswahl von Carbonsäuren, die fermentativ hergestellt werden können, und mögliche Endprodukte dargestellt.

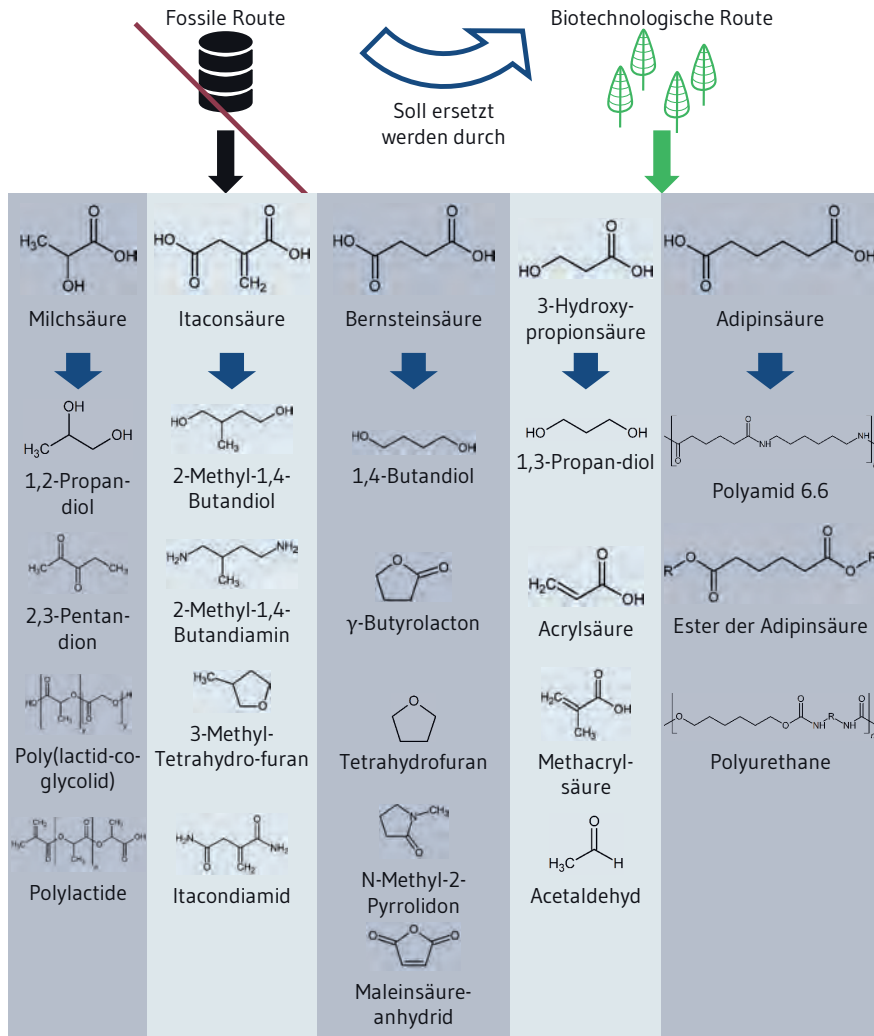


Abb. 1 Carbonsäuren, die durch lastflexibel, elektrifizierte Verfahren der industriellen Biotechnologie hergestellt werden können, und mögliche Endprodukte (Becker et al., 2015)

Die Fermentation von Carbonsäuren erfolgt häufig bei einem neutralen pH-Wert, da die eingesetzten Mikroorganismen bei diesen Bedingungen die höchste Produktivität und Ausbeute erzielen. Durch die Produktion von Carbonsäuren sinkt während der Fermentation der pH-Wert ab, sodass die Produktivität der Mikroorganismen abnimmt. Um dem entgegenzusteuern, werden pH-Stellmittel

hinzugegeben, um den pH-Wert im neutralen Bereich zu stabilisieren. Allerdings liegen Carbonsäuren bei neutralem pH-Wert als Salz vor. Dies lässt sich beispielhaft an dem Dissoziationsgleichgewicht von Bernsteinsäure in *Abbildung 2* erkennen.

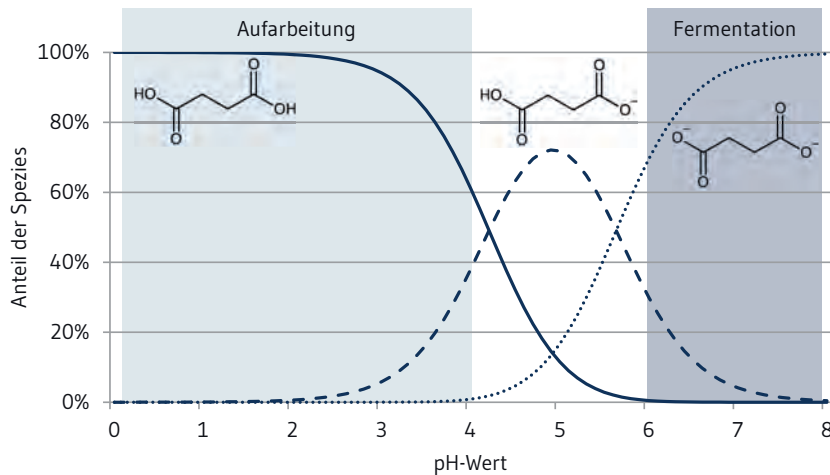


Abb. 2 Dissoziationsgleichgewicht von Bernsteinsäure zwischen einem pH-Wert von 0 bis 8 (Gausmann et al., 2020)

Um anschließend die Carbonsäure zu erhalten, werden in den Aufarbeitungsschritten nach der Fermentation wieder pH-Stellmittel benötigt, die den pH-Wert erniedrigen. Dies führt jedoch zur Entstehung von Salz-Emissionen im äquivalenten molaren Verhältnis zur produzierten Carbonsäure. Beispielhaft ist in *Abbildung 3* der klassische Aufarbeitungsprozess für fermentativ hergestellte Bernsteinsäure dargestellt (Datta et al., 1989).

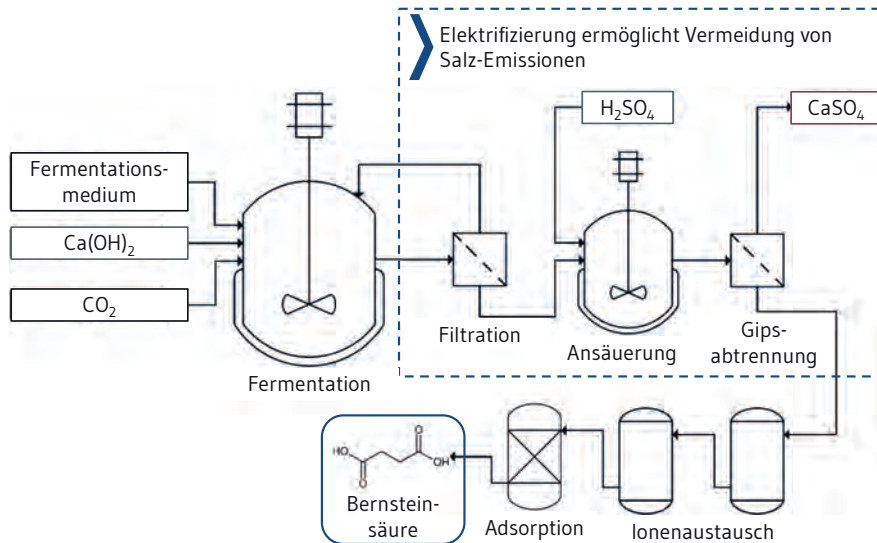


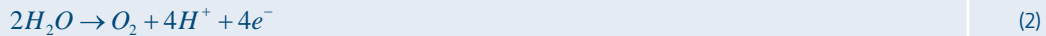
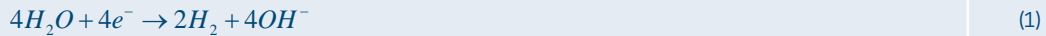
Abb. 3 Aufarbeitungsprozess für die biotechnologische Herstellung von Bernsteinsäure mittels Calcium-Fällung. Grau: pH-Stellmittel; rot: Salz-Emissionen (Datta et al., 1989)

Während der Fermentation wird Calciumhydroxid hinzugegeben, um den pH-Wert im neutralen Bereich zu halten. Das produzierte Succinat (Salz der Bernsteinsäure) fällt als Calciumsuccinat aus. Durch eine zweistufige Filtration und anschließende Wäsche wird das Calciumsuccinat aufgereinigt. Nun wird durch Zugabe von Schwefelsäure der pH-Wert wieder erniedrigt, um Bernsteinsäure zu erhalten. Da in diesem Schritt Schwefelsäure im Überschuss hinzugegeben wird, folgt anschließend eine Neutralisation mit Calciumhydroxid, wodurch Gips entsteht. Nach der Abtrennung des Gipses wird die Bernsteinsäure durch Ionenaustausch und Adsorption aufgereinigt, um die gewünschte Produktqualität zu erhalten.

Dies verdeutlicht, dass die Aufarbeitung aufwendig und kostenintensiv ist. Vor allem der Einsatz von pH-Stellmitteln (Calciumhydroxid und Schwefelsäure) und die entstehenden Salz-Emissionen (Calciumsulfat respektive Gips) beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Der entstehende Gips kann aufgrund der biologischen Verunreinigungen nicht als Baustoff eingesetzt werden. Diese Verunreinigungen beeinträchtigen die Farbqualität des Endmaterials unzulässig, sodass der Gips als Abfall deponiert werden muss.

Eine Elektrifizierung des Prozesses kann die Wirtschaftlichkeit der Aufarbeitung von fermentativ hergestellten Carbonsäuren deutlich verbessern. Dadurch kann in Zukunft die biotechnologische Herstellung von Carbonsäuren wettbewerbsfähig gegenüber der Herstellung aus fossilen Rohstoffen

werden. Der elektrifizierte Aufarbeitungsprozess stellt pH-Stellmittel »on site« her, indem der pH-Shift durch die Elektrolyse von Wasser erzeugt wird. In zwei Elektrolytkammern einer Elektrolysezelle laufen elektrochemische Reaktionen gemäß *Gleichung 1* (Kathode) und *Gleichung 2* (Anode) ab.



Somit müssen keine pH-Stellmittel (grau in *Abbildung 3* dargestellt) während des Prozesses hinzugegeben werden. Zusätzlich ermöglicht dies die Vermeidung von Salz-Emissionen (rot in *Abbildung 3* dargestellt). Die Elektrifizierung des Prozesses erlaubt zudem eine lastflexible Fahrweise, die es ermöglicht, den Prozess bei fluktuierender Stromverfügbarkeit zu betreiben. In den folgenden Kapiteln wird die Flexibilisierung des Prozesses näher beschrieben.

Flexibilisierung des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses

Die Flexibilisierung des Prozesses lässt sich in zwei Flexibilitätsmaßnahmen nach der VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1 einordnen (VDI 5207 Blatt 1:2020). Diese sind in *Tabelle 1* aufgeführt.

Tab. 1 Übersicht der Energieflexibilitätsmaßnahmen des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses für die biotechnologische Herstellung von Carbonsäuren

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Energie speichern (inhärent)	Aachener Verfahrenstechnik, RWTH Aachen	Chemische Industrie
Energie speichern	Aachener Verfahrenstechnik, RWTH Aachen	Chemische Industrie

Die erste Flexibilitätsmaßnahme auf der Fertigungsebene ist »Energie speichern (inhärent)«. Der lastflexible Betrieb wird durch ein Lastmanagementsystem realisiert, das die Leistung und den Durchsatz der Elektrolysezelle anpasst. Durch Speichertanks vor und nach dem Elektrolyseur kann die Elektrolyse lastflexibel betrieben werden. Die Speichertanks sind notwendig, da die Fermentation und die restlichen Prozessschritte vorzugsweise bei stationären Bedingungen betrieben werden. Das Lastmanagementsystem plant den Betrieb des Prozesses basierend auf Strommarktdaten des Day-Ahead-Markts. Dabei sollen die Stromkosten, die für die Elektrolyse benötigt werden, minimiert und gleichzeitig ein vorgegebenes Produktionsziel erreicht werden. Das Lastmanagementsystem kann auch auf den Handel am Intraday-Markt oder für die Bereitstellung der Elektrolyse als Regelreserve erweitert werden.

Auf der Fertigungsleitebene wird die zweite Flexibilitätsmaßnahme »Energie speichern« adressiert. Die Wasserelektrolyse ermöglicht primär die Veränderung des pH-Werts, um aus dem Salz der Carbonsäure die Carbonsäure zu erhalten. Außerdem wird während der Elektrolyse Wasserstoff an der Anode und Sauerstoff an der Kathode produziert (*Gleichungen 1* und *2*). Diese beiden Gase könnten leicht vom Prozessstrom separiert werden. Insbesondere Wasserstoff ist durch seine hohe Energie-

dichte ein wertvoller sowie lagerfähiger Energieträger. Er kann mit moderatem Aufwand kostengünstig gespeichert werden. Der gespeicherte Wasserstoff kann entweder als Energieträger zur Überbrückung von »Dunkelflauten« dienen oder in einem chemischen Verbundnetz stofflich verwertet werden.

1.1 Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials

Die aktuellen und zukünftigen Marktvolumina der Carbonsäuren, die der elektrifizierte Aufarbeitungsprozess adressiert, sind in *Abbildung 4* dargestellt. Die zukünftigen Marktvolumina für 2025 und 2030 wurden auf Basis von prognostizierten Wachstumsraten bis 2026 abgeschätzt.

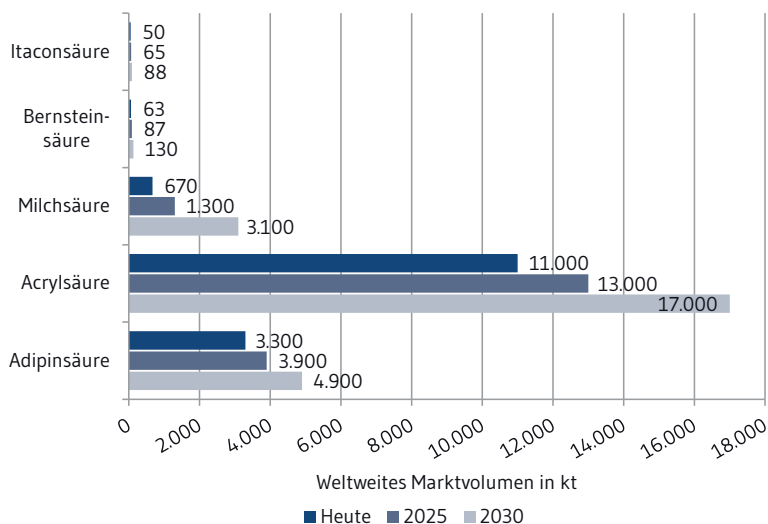


Abb. 4 Weltweite Marktvolumina für die Zielmoleküle des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses; ermittelt auf Basis von prognostizierten Marktvolumina und Wachstumsraten (360 Research Reports, 2020; ChemAnalyst, 2021a; ChemAnalyst, 2021b; Li et al., 2021; Market Data Forecast, 2021a; Market Data Forecast, 2021b; Market Data Forecast, 2021c; Statista GmbH, 2021; WEASTRA s.r.o., 2012)

Die geringen Marktvolumina der Itacon- und Bernsteinsäure bieten zwar nur geringe Elektrifizierungspotenziale, ermöglichen jedoch den Einstieg in lastflexible Aufarbeitungstechnologien mit einem geringeren Investitionsrisiko als bei bereits großvolumig hergestellten Carbonsäuren. Der Aufarbeitungsprozess ist bereits erfolgreich für Itacon- und Bernsteinsäure demonstriert worden. Es besteht das Potenzial, durch die Erweiterung auf andere biotechnologisch hergestellte Carbon-

säuren zukünftig weitere Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotenziale zu erschließen. Hierzu bietet sich z. B. Milchsäure an, die bereits heute ein Marktvolumen von 670 Kilotonnen besitzt. Außerdem besitzt Milchsäure mit ca. 19 Prozent die größte prognostizierte Wachstumsrate. Heutzutage erfolgt die Herstellung von Acrylsäure und Adipinsäure ausschließlich durch den Einsatz von fossilen Rohstoffen. In Zukunft könnte die Adipinsäure auch biotechnologisch hergestellt und mithilfe des elektrifizierten Prozesses aufgearbeitet werden. Hierfür wurden aktuelle Marktvolumina von 3,3 Megatonnen ermittelt. Ein deutlich größeres Einsatzgebiet für den elektrifizierten Aufarbeitungsprozess stellt der Acrylsäure-Markt dar, der ein etwa dreifach größeres Marktvolumen als der Adipinsäure-Markt besitzt. Die Acrylsäure wird dabei durch die biotechnologische Herstellung von 3-Hydroxypropionsäure und anschließender Dehydratisierung hergestellt (Blaschke et al., 2014). In Summe könnten mit dem elektrifizierten Aufarbeitungsprozess im Jahr 2030 etwa 26 Megatonnen Carbonsäuren aufgearbeitet werden.

Zur Energieflexibilisierung des Prozesses für die Herstellung von biobasierten Carbonsäuren werden die beiden Elektrolysezellen des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses durch Pufferkapazitäten von den anderen Prozessschritten entkoppelt. Durch die Pufferkapazitäten in Form von Speichertanks können die anderen Prozessschritte konstant betrieben werden, während die Last der Elektrolysezellen variiert. Damit die Tanks nicht leer- und nicht überlaufen, wird ein Lastmanagementsystem benötigt, das den energieflexiblen Betrieb des Prozesses plant. Gleichzeitig muss das Lastmanagementsystem bei der Planung des Betriebs berücksichtigen, dass eine bestimmte Menge der Carbonsäure innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums produziert wird. Dies kann nur erreicht werden, wenn die Last der Elektrolysezellen sowohl reduziert als auch erhöht werden kann. Je nach Erhöhung der Last müssen ausreichend Pufferkapazitäten vorhanden sein. Dies korreliert mit erhöhten Investitionskosten. Um die Mehrkapazität für die Energieflexibilisierung zu quantifizieren, wird der sogenannte Catch-up-Capacity-Faktor f eingeführt (Gleichung 3).

$$P_{red} = P_{nenn} \cdot (1 - f) \quad (3)$$

Der Catch-up-Capacity-Faktor verknüpft die Nennleistung P_{nenn} mit der reduzierten Leistung P_{red} . Aus Gleichung 3 ergibt sich auch, dass der Catch-up-Capacity-Faktor Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Da im energieflexiblen Betrieb die gleiche Produktionsmenge wie im konstanten Betrieb produziert werden soll, ergibt sich Gleichung 4 mit der erhöhten Leistung P_{erh} der Dauer der Lasterhöhung t_{erh} und der Dauer der Lastverringerng t_{red} .

$$P_{red} \cdot t_{red} + P_{erh} \cdot t_{erh} = P_{nenn} \cdot (t_{red} + t_{erh}) \quad (4)$$

Mit Gleichung 3 und Gleichung 4 erhält man die erhöhte Leistung laut Gleichung 5.

$$P_{erh} = P_{nenn} \cdot \left(1 + \frac{t_{red}}{t_{erh}} \cdot f \right) \quad (5)$$

Mit den heutigen Marktvolumina aus *Abbildung 4* ergeben sich bei einem Catch-up-Capacity-Faktor von 0,3 und der Annahme, dass die Elektrolysezellen ihre Last für acht Stunden pro Tag erhöhen bzw. 16 Stunden pro Tag erniedrigen können, Energieflexibilitätspotenziale wie in *Abbildung 5* dargestellt.

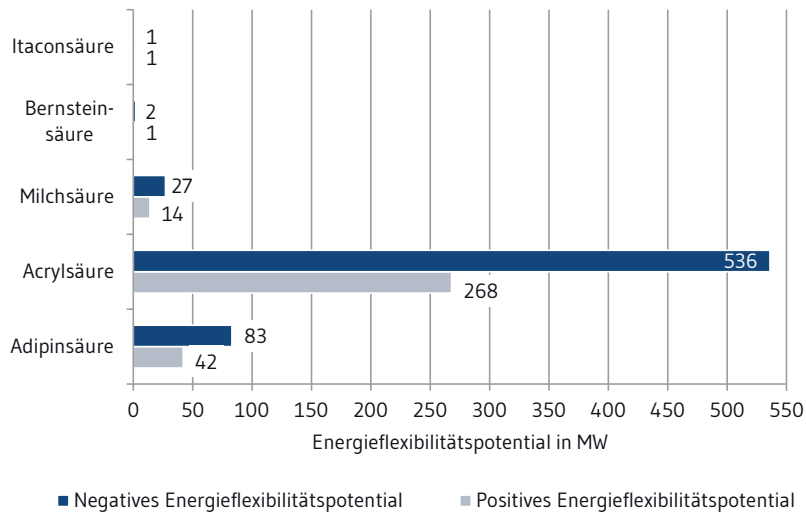


Abb. 5 Energieflexibilitätspotenziale für die Zielmoleküle des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses

Das negative Energieflexibilitätspotential gibt das Potenzial einer Lasterhöhung an und das positive Energieflexibilitätspotential das Potenzial einer Lastverringerung. Für Itacon- und Bernsteinsäure ergeben sich Energieflexibilitätspotenziale bis 3 MW und für Milchsäure bis 55 MW. Wenn in Zukunft auch die Adipin- und die Acrylsäure biotechnologisch hergestellt würden, ergeben sich positive Energieflexibilitätspotenziale von bis zu 536 MW bzw. negative Energieflexibilitätspotenziale von bis zu 1073 MW.

Die aufgeführten Energieflexibilitätspotenziale zeigen, dass zukünftig große Energieflexibilitätspotenziale durch die Elektrifizierung der Carbonsäureaufarbeitung erschlossen werden können. Eine Übersicht der geschätzten Energieflexibilitätspotenziale für Deutschland, die die Carbonsäuren Itacon-, Bernsteinsäure und Milchsäure umfasst, ist in *Tabelle 2* gegeben.

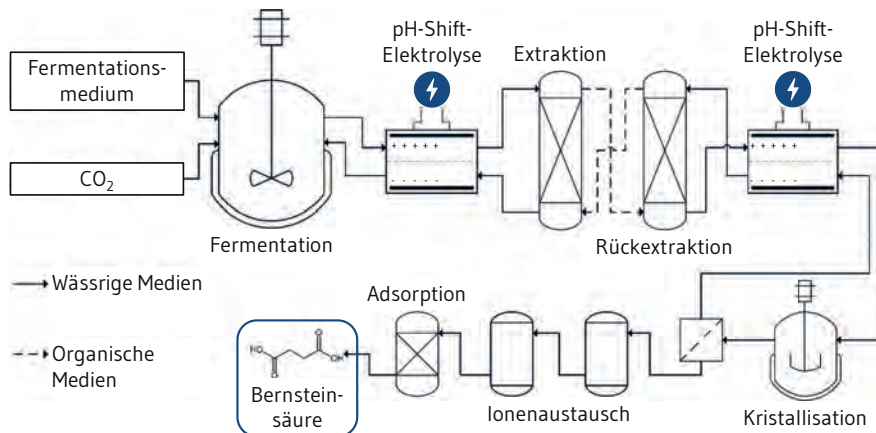
Tab. 2 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Lastverringering	6 MW Abrufdauer: 16 h Abrufhäufigkeit: 365-mal pro Jahr
Lasterhöhung	12 MW Abrufdauer: 8 h Abrufhäufigkeit: 365-mal pro Jahr

2 Technische Umsetzung

Autoren: Schröder · Gausmann · Jupke

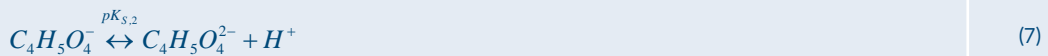
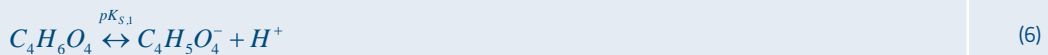
Der elektrochemische Aufarbeitungsprozess wurde bei der Aachener Verfahrenstechnik an der RWTH Aachen realisiert. Das Fließbild des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses ist in *Abbildung 6* dargestellt.

**Abb. 6** Fließbild des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses

Der biotechnologische Herstellungsprozess beginnt bei der Fermentation der Carbonsäure. Während Mikroorganismen Carbonsäure produzieren, sinkt der pH-Wert in der Fermentation ab, da Carbonsäuren typischerweise pK_5 -Werte zwischen 2,5 und 6,5 besitzen (López-Garzón und Straathof, 2014).

Dies schadet den Mikroorganismen, die dann die Produktion der Carbonsäure verringern beziehungsweise einstellen. Deshalb wird bei Absinken des pH-Werts eine Base zugegeben, um den pH-Wert im neutralen Bereich zu halten. Nach der Fermentation folgt zunächst die Abtrennung der Zellen, in der Regel durch Filtration. Da die Fermentation bei einem neutralen pH-Wert abläuft, liegt die Carbonsäure als Carboxylat-Anion in wässriger Lösung vor (*Abbildung 2*).

Der anschließende elektrochemische Aufarbeitungsprozess beginnt bei der ersten pH-Shift-Elektrolyse. Die Elektrolysezelle besteht aus zwei Kammern, die durch eine Kationentauschermembran voneinander getrennt sind. Das Substrat der Fermentation wird durch die Kammer der Anode geführt. An der Anode findet die elektrochemische Reaktion gemäß *Gleichung 2* statt. Durch die dabei produzierten Protonen wird das Carboxylat-Anion protoniert und der pH-Wert sinkt. Während der pH-Shift-Elektrolyse wird der pH-Wert so weit verringert, bis die Carbonsäure in ihrer vollständig protonierten Form vorliegt. Die Verringerung des pH-Werts ist abhängig vom Dissoziationsgleichgewicht der Carbonsäure, das durch die pK_S -Werte beschrieben werden kann. Als Beispiel ist in *Gleichung 6* und *Gleichung 7* das Dissoziationsgleichgewicht der Bernsteinsäure dargestellt ($pK_{S,1} = 4,207$ und $pK_{S,2} = 5,635$, *Abbildung 2*) (Gausmann et al., 2020).



Die Menge der produzierten Protonen ist abhängig von der angelegten Stromstärke I und der Zeit t . Die Stoffmenge der produzierten Protonen n_{Protonen} lässt sich mit dem Faraday'schen Gesetz (*Gleichung 8*) berechnen.

$$n_{\text{Protonen}} = \frac{I \cdot t}{z \cdot F} \quad (8)$$

In *Gleichung 8* stellt z die Anzahl der übertragenen Elektronen in der elektrochemischen Reaktion und F die Faraday-Konstante dar. Gleichzeitig zur elektrochemischen Reaktion an der Anode läuft an der Kathode die elektrochemische Reaktion nach *Gleichung 1* ab. Die Kationentauschermembran, die die beiden Kammern der Elektrolysezelle voneinander trennt, ermöglicht, dass nur positiv geladene Ionen diese passieren können. Deshalb schließen Kationen aus dem Substrat in der Anodenkammer den Stromkreis, indem diese zur Kathodenkammer migrieren. Durch die elektrochemische Reaktion an der Kathode werden Hydroxid-Ionen produziert, und die Kationen bilden zusammen mit Hydroxid-Ionen eine Base. Diese wird der Fermentation als pH-Stellmittel zugeführt, sodass keine zusätzlichen pH-Stellmittel in der Fermentation benötigt werden. Die Effizienz der pH-Shift-Elektrolyse $\eta_{\text{pH-Shift}}$ ist

das Verhältnis der produzierten Protonen, die für die Protonierung der Carbonsäure verwendet werden ($n_{\text{Protonen} \rightarrow \text{HA}}$) zu den insgesamt produzierten Protonen (n_{Protonen}) und lässt sich mit Gleichung 9 berechnen.

$$\eta_{\text{pH-Shift}} = \frac{n_{\text{Protonen} \rightarrow \text{HA}}}{n_{\text{Protonen}}} \quad (9)$$

Die gesamten produzierten Protonen werden mit dem Faraday'schen Gesetz (Gleichung 8) berechnet.

Abbildung 7 zeigt die Unterschiede der pH-Shift-Elektrolyse im Vergleich zur Polymer-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse) und der alkalischen Elektrolyse.

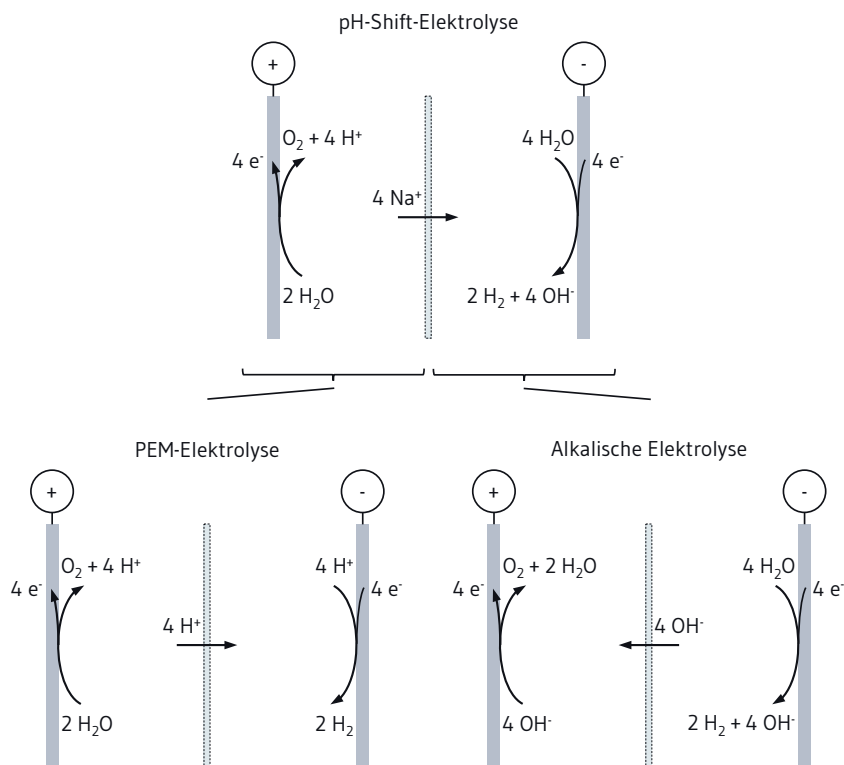
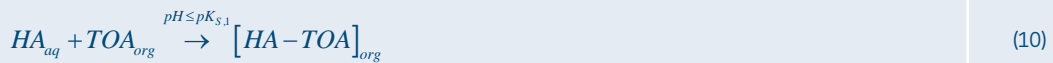


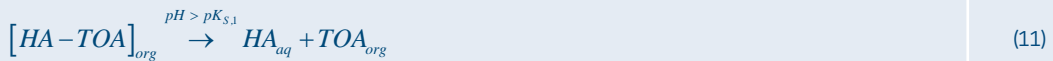
Abb. 7 Vergleich der pH-Shift-Elektrolyse mit der PEM-Elektrolyse und der alkalischen Elektrolyse

Die pH-Shift Elektrolyse kombiniert die elektrochemische Reaktion der Anode aus der PEM-Elektrolyse mit der elektrochemischen Reaktion der Kathode aus der alkalischen Elektrolyse. Im Gegensatz zu den konventionellen Elektrolysearten, bei denen Protonen oder Hydroxid-Ionen den Stromkreis schließen, werden dafür bei der pH-Shift-Elektrolyse Kationen aus dem Fermentationssubstrat verwendet (zum Beispiel Natrium-Ionen in *Abbildung 7*).

Nach der ersten pH-Shift-Elektrolyse folgt die Extraktion der Carbonsäure. Als Extraktionsmittel kann zum Beispiel Tri-n-octylamin (TOA) verwendet werden. Dieses bildet durch Wasserstoffbrückenbindungen mit der protonierten Carbonsäure (HA) einen Komplex (HA-TOA) in der organischen Phase. Der Reaktivextraktionsmechanismus ist in *Gleichung 10* dargestellt.



Der Komplex kann in der anschließenden Rückextraktion wieder aufgebrochen werden, indem die organische Phase mit einer alkalischen Lösung in Kontakt gebracht wird (*Gleichung 11*).



Die Carbonsäure liegt somit wieder in einer wässrigen Lösung vor, und das Extraktionsmittel kann erneut für die Extraktion verwendet werden. Die alkalische Lösung für die Rückextraktion wird von der zweiten pH-Shift-Elektrolyse zur Verfügung gestellt. Um die Effizienz der Extraktion $\eta_{Extraktion}$ zu bestimmen, wird das Verhältnis aus der Menge der extrahierten Carbonsäure in der organischen Phase $n_{HA,org}$ zu der Menge der Carbonsäure in der wässrigen Phase $n_{HA,aq}$ in *Gleichung 12* definiert.

$$\eta_{Extraktion} = \frac{n_{HA,org}}{n_{HA,aq}} \quad (12)$$

Analog ergibt sich die Effizienz der Rückextraktion $\eta_{Rückextraktion}$ in *Gleichung 13*.

$$\eta_{Rückextraktion} = \frac{n_{HA,aq}}{n_{HA,org}} \quad (13)$$

Nachdem die Carbonsäure in die alkalische Lösung rückextrahiert wurde, wird diese in die Anodenkammer der zweiten pH-Shift-Elektrolyse geführt, um die Carbonsäure wieder vollständig zu protonieren.

Nach der zweiten pH-Shift-Elektrolyse folgt als letzter Aufreinigungsschritt eine Kristallisation. Hier können verschiedene Verfahrensvarianten der Kristallisation angewandt werden, zum Beispiel eine Kühlungskristallisation oder eine Verdampfungskristallisation. Außerdem kann in Kombination mit der zweiten pH-Shift-Elektrolyse eine pH-Shift-Kristallisation durchgeführt werden (Kocks et al.,

2020). Dabei wird die pH-Abhängigkeit der Löslichkeit von Carbonsäuren ausgenutzt, um die Carbonsäure zu kristallisieren. Anschließend kann die kristallisierte Carbonsäure vom wässrigen Überstand abgetrennt werden. Der wässrige Überstand wird danach der Kathodenkammer der zweiten pH-Shift-Elektrolyse zugeführt. Die Effizienz der Kristallisation $\eta_{\text{Kristallisation}}$ ist gemäß Gleichung 14 definiert.

$$\eta_{\text{Kristallisation}} = \frac{n_{\text{HA},s}}{n_{\text{HA},0} - n_{\text{HA},\text{SLE}}} \quad (14)$$

Diese lässt sich aus der Menge der kristallisierten Carbonsäure $n_{\text{HA},s}$ der Menge der Carbonsäure nach der pH-Shift-Elektrolyse in der wässrigen Phase $n_{\text{HA},0}$ und der Menge der Carbonsäure $n_{\text{HA},\text{SLE}}$ die aufgrund des Fest-Flüssig-Gleichgewichts gelöst in der wässrigen Phase verbleibt, berechnen.

An dem Versuchsstand der Aachener Verfahrenstechnik konnte mit diesem Prozess kristalline Bernsteinsäure mit einer Reinheit von über 97 Prozent produziert werden. Die Gesamteffizienz des Verfahrens η_{Gesamt} ergibt aus dem Produkt der Effizienzen der einzelnen Prozessschritte (Gleichung 15).

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{pH-Shift},1} \cdot \eta_{\text{Extraktion}} \cdot \eta_{\text{Rückextraktion}} \cdot \eta_{\text{pH-Shift},2} \cdot \eta_{\text{Kristallisation}} \quad (15)$$

Außerdem bietet der Prozess die Möglichkeit, die Extraktion und die Rückextraktion in die pH-Shift-Elektrolysezellen zu integrieren (Abbildung 8).

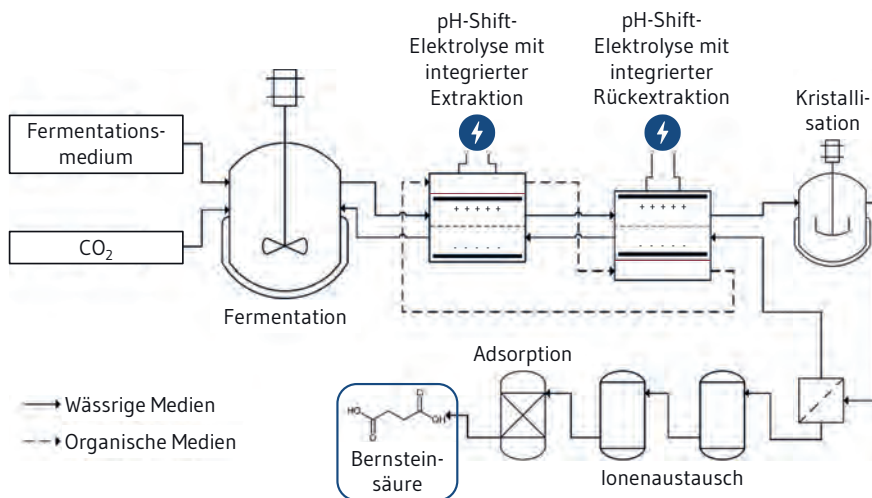


Abb. 8 Prozessschema des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses mit integrierter Extraktion und Rückextraktion

Dieser Prozess konnte bereits im kleinen Maßstab mit Bernsteinsäure demonstriert werden (Gausmann et al., 2020). Dazu wird die wässrige Phase in der Anodenkammer der ersten pH-Shift-Elektrolyse mit der organischen Phase in Kontakt gebracht, sodass während der Elektrolyse die protonierte Bernsteinsäure sofort extrahiert wird. Die organische Phase wird anschließend in die Kathodenkammer der zweiten pH-Shift-Elektrolyse geleitet und dort für die Rückextraktion mit der wässrigen Phase in Kontakt gebracht. Die wässrige Phase mit der rückextrahierten Carbonsäure wird dann in die Anodenkammer geleitet, um dort eine integrierte pH-Shift-Kristallisation durchzuführen. Mit diesem Verfahren konnten Bernsteinsäure-Kristalle mit Reinheiten von 97 und 99 Prozent hergestellt werden (Gausmann et al., 2020).

Eine weitere Verfahrensvariante mit direkter Extraktion ist in *Abbildung 9* dargestellt.

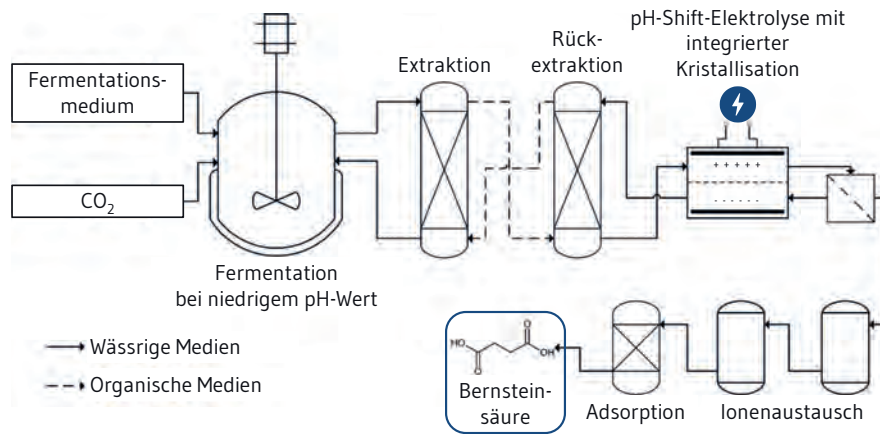


Abb. 9 Prozessschema des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses bei einer Fermentation mit einem sauren pH-Wert

Dieser Prozess wurde zur Aufarbeitung von biotechnologisch hergestellter Itaconsäure angewendet (Gausmann et al., 2021). Itaconsäure kann mit Mikroorganismen des Stamms *Ustilago cynodontis* biotechnologisch hergestellt werden. Diese erreichen auch bei niedrigen pH-Werten hohe Titer und Produktivitäten, sodass die Fermentation im Sauren betrieben werden kann. Dadurch entfällt die erste pH-Shift-Elektrolyse, und die Itaconsäure kann direkt in ihrer protonierten Form extrahiert werden. Die nachfolgenden Prozessschritte bestehen aus der Rückextraktion und der pH-Shift-Elektrolyse. Anschließend wurde eine Kühlungskristallisation durchgeführt, um die Kristalle der Itaconsäure zu erhalten. Es konnten Itaconsäurekristalle mit einer Reinheit von über 99 Prozent produziert werden (Gausmann et al., 2021).

Zukünftig soll der elektrochemische Aufarbeitungsprozess auf die in *Kapitel C.2.1.3* beschriebenen Carbonsäuren erweitert werden. Je nach Carbonsäure kann eine der drei vorgestellten Prozessvarianten eingesetzt werden.

3 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Schröder · Gausmann · Jupke

Die Stromkosten für das elektrochemische Aufbereitungsverfahren betragen etwa ein Viertel der gesamten Produktionskosten für die Herstellung biobasierter Carbonsäuren. In *Abbildung 10* sind die Betriebskosten für die pH-Shift-Elektrolyseure in Abhängigkeit von der Zellspannung und den Stromkosten dargestellt.

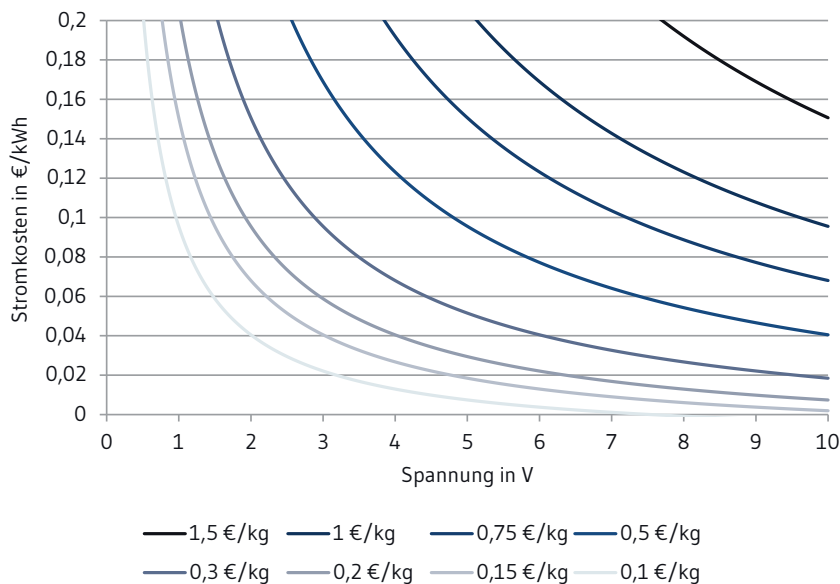


Abb. 10 Spezifische Betriebskosten der pH-Shift-Elektrolyseure pro Kilogramm Bernsteinsäure in Abhängigkeit der Zellspannung und Stromkosten

Aktuell werden am Versuchsstand der Aachener Verfahrenstechnik Zellspannungen zwischen 7 und 10 V erreicht. Mit neu entwickelten Zelldesigns wird eine Verringerung auf 3 bis 4 V angestrebt. In Zukunft soll der Aufarbeitungsprozess mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden. Heute liegen die Stromgestehungskosten für PV-Anlagen zwischen 0,04 und 0,13 €/kWh, für Wind-

anlagen (Onshore) zwischen 0,05 und 0,10 €/kWh und für Windanlagen (Offshore) zwischen 0,09 und 0,14 €/kWh (Kost et al., 2021). Entsprechend betragen die spezifischen Kosten zwischen 0,17 und 0,56 Euro pro Kilogramm Bernsteinsäure. Für 2040 werden Stromgestehungskosten für erneuerbare Energien zwischen 0,02 und 0,10 €/kWh geschätzt, sodass sich die spezifischen Elektrizitätskosten auf 0,10 bis 0,38 Euro pro Kilogramm reduzieren können (Kost et al., 2021).

Am Beispiel einer Fallstudie soll das Potenzial des elektrifizierten Aufarbeitungsprozesses verdeutlicht werden. Dafür wird angenommen, dass eine Produktionsanlage 60 Kilotonnen Bernsteinsäure pro Jahr produziert. Das Fließbild des lastflexiblen elektrifizierten Prozesses ist in *Abbildung 11* dargestellt.

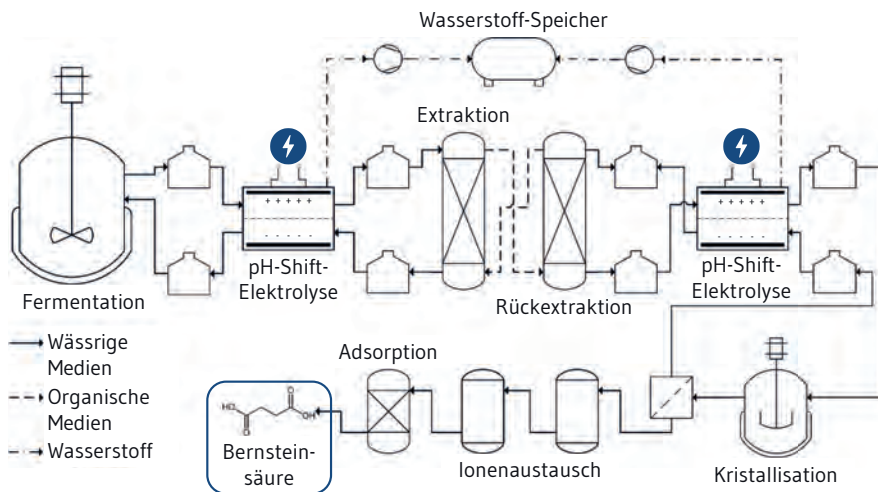


Abb. 11 Fließbild des lastflexiblen elektrifizierten Prozesses

Für die beiden pH-Shift-Elektrolyseure wird eine Anschlussleistung von zusammen ca. 25 MW benötigt. Unter der Annahme, dass die Anlage eine Catch-up-Capacity von 0,3 besitzt, kann die Leistung auf 28 MW erhöht und auf 17 MW erniedrigt werden. Dies entspricht einer Flexibilität von jeweils etwa 60 MWh pro Tag, die der Prozess sowohl zur Verfügung stellen als auch zusätzlich verbrauchen kann. Zusätzlich zu dem lastflexiblen Betrieb wird während der pH-Shift-Elektrolyse Wasserstoff produziert. Dieser Wertstoff kann gespeichert und langfristig als Flexibilitätsspeicher verwendet werden, da dieser z. B. rückverstromt werden oder Einsatz in einer Wasserstoffwirtschaft finden kann. Bei einer Produktion von 60 Kilotonnen Bernsteinsäure pro Jahr fallen im gleichen Zeitraum im Prozess 2 Kilotonnen Wasserstoff an. Dies entspricht einer Flexibilität von 186 MWh pro Tag. Somit kann der

Prozess eine Flexibilität von zehn Prozent durch die lastflexible Betriebsweise und eine Flexibilität von 31 Prozent durch die Speicherung und Weiterverwendung des produzierten Wasserstoffs bereitstellen.

4 Literatur

360 RESEARCH REPORTS, 2020. Global Adipic Acid Market Research Report 2020 [online] [Zugriff am: 4. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.360researchreports.com/global-adipic-acid-market-15056087>

BASF SE. Verfahren zur Dehydratisierung von 3-Hydroxypropionsäure zu Acrylsäure. Erfinder: T. Blaschke, O. Lang, N.T. Würz, C. Raith, M. Hartmann UND M. Zajaczkowski-Fischer. Anmeldung: 21. August 2014. Wo 2015/036218 A1.

BECHTHOLD, I., K. BRETZ, S. KABSASCI, R. KOPITZKY und A. SPRINGER, 2008. Succinic Acid: A New Platform Chemical for Biobased Polymers from Renewable Resources [online]. Chemical Engineering & Technology, 31(5), 647–654. Chemical Engineering & Technology. Verfügbar unter: doi:10.1002/ceat.200800063

BECKER, J., A. LANGE, J. FABARIUS und C. WITTMANN, 2015. Top value platform chemicals: bio-based production of organic acids [online]. Current opinion in biotechnology, 36, 168–175. Current opinion in biotechnology. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.copbio.2015.08.022

CHEMANALYST, 2021a. Acrylic Acid Price Trend and Forecast [online] [Zugriff am: 4. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/acrylic-acid-20>

CHEMANALYST, 2021b. Adipic Acid Price Trend and Forecast [online] [Zugriff am: 4. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/adipic-acid-1106>

DATTA, R., D.A. GLASSNER, M.K. JAIN, J.R. VICK ROY. Fermentation and purification process for succinic acid. Erfinder: R. Datta, D.A. Glassner, M.K. Jain und J.R. Vick Roy. Anmeldung: 28. Juni 1989. US 5,168,055.

GAUSMANN, M., C. KOCKS, J. PASTOORS, J. BÜCHS, N. WIERCKX und A. JUPKE, 2021. Electrochemical pH-T-Swing Separation of Itaconic Acid for Zero Salt Waste Downstream Processing [online]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(28), 9336–9347. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. Verfügbar unter: doi:10.1021/acssuschemeng.1c02194

GAUSMANN, M., C. KOCKS, M. DOEKER, A. EGGERT, T. MASSMANN und A. JUPKE, 2020. Recovery of succinic acid by integrated multi-phase electrochemical pH-shift extraction and crystallization [online]. Separation and Purification Technology, 240. ISSN 13835866. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.seppur.2019.116489

KOCKS, C., J. GÖRTZ, A. HOLTZ, M. GAUSMANN und A. JUPKE, 2020. Electrochemical Crystallization Concept for Succinic Acid Reduces Waste Salt Production [online]. Chemie Ingenieur Technik, 92(3), 221–228. ISSN 0009-286X. Verfügbar unter: doi:10.1002/cite.201900088

KOST, C., S. SHAMMUGAM, V. FLURI, D. PEPPER, A.D. MEMAR und T. SCHLEGL, 2021. Stromgestehungskosten erneuerbare Energien [online]. Juni 2021. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf

LI, Y., S.S. BHAGWAT, Y.R. CORTÉS-PEÑA, D. KI, C.V. RAO, Y.-S. JIN und J.S. GUEST, 2021. Sustainable Lactic Acid Production from Lignocellulosic Biomass [online]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(3), 1341–1351. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. Verfügbar unter: doi:10.1021/acssuschemeng.0c08055

LÓPEZ-GARCÓN, C.S. und A.J.J. STRAATHOF, 2014. Recovery of carboxylic acids produced by fermentation [online]. Biotechnology advances, 32(5), 873–904. Biotechnology advances. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.biotechadv.2014.04.002

MARKET DATA FORECAST, 2021a. Itaconic Acid Market [online] [Zugriff am: 4. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/itaconic-acid-market>

MARKET DATA FORECAST, 2021b. Lactic Acid Market [online] [Zugriff am: 4. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/lactic-acid-market>

MARKET DATA FORECAST, 2021c. Succinic Acid Market [online] [Zugriff am: 4. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/succinic-acid-market>

STATISTA GMBH, 2021. Market value of acrylic acid worldwide from 2015 to 2020, with a forecast for 2021 to 2026 [online] [Zugriff am: 4. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1244500/global-market-value-cyclopentane/>

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

WEASTRA S.R.O., 2015. WP 8.1. Determination of market potential for selected platform chemicals [online]. Itaconic acid, Succinic acid, 2,5-Furandicarboxylic acid. Verfügbar unter: <https://documents.pub/document/market-potential-for-selected-platform-chemicals.html>

WERPY, T. und G. PETERSEN, 2004. Top Value Added Chemicals from Biomass [online]. Volume I – Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. Verfügbar unter: <https://www.osti.gov/biblio/15008859-top-value-added-chemicals-from-biomass-volume-results-screening-potential-candidates-from-sugars-synthesis-gas>





C.3

Flexible Luftzerlegungsanlagen

Management Summary

Kryogene Luftzerlegungsanlagen zählen aufgrund ihres hohen elektrischen Energiebedarfs sowie der Möglichkeit, die im Prozess verflüssigten Gase als Energiespeicher zu nutzen, zu den in der Literatur am meisten betrachteten Prozessen zur Energieflexibilitätsbefähigung. Mit in Deutschland ca. 930 MW Anschlussleistung bei einer angestrebten Energieflexibilitätsbefähigung von über 60 Prozent kann der lastflexible Betrieb von Luftzerlegungsanlagen einen signifikanten Beitrag zur Stabilisierung eines auf volatilen erneuerbaren Energiequellen basierenden Stromnetzes beitragen.

Die Energieflexibilitätsbefähigung von Luftzerlegungsanlagen erfordert sowohl robuste Prozesskomponenten mit einem breiten, effizienten Betriebsbereich als auch die Entwicklung innovativer Betriebsstrategien, um die Anlagen zu schnellen Lastwechseln zu befähigen. Hierdurch können ein breites Lastspektrum, kurze Reaktionszeiten auf Marktänderungen und ein langlebiger Betrieb der Anlagen gewährleistet werden.

In diesem Kapitel werden verbesserte Energieflexibilitätsdesigns und neue Betriebskonzepte für die Anlagenkomponenten Wärmeübertrager und Kompressoren vorgestellt. Ferner wird die Entwicklung von »Advanced Process Control« für Gesamtanlagen unter Verwendung Digitaler Zwillinge und numerischer Optimierung diskutiert.

Autoren

Ecker, Anna-Maria
anna.ecker@linde.com
Linde GmbH, Linde Engineering
Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6, 82049 Pullach im Isartal

Flüggen, Rainer
rainer.flueggen@linde.com
Linde GmbH, Linde Engineering
Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6, 82049 Pullach im Isartal

Frank, Roman
roman.frank@unibw.de
Institut für Strahlantriebe (isa), Universität der
Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Fritsch, Philipp
philipp.fritsch@tum.de
Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik (APT),
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Gentsch, Maik
maik.gentsch@tu-berlin.de
Mess- und Regelungstechnik (MRT), Technische
Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Haider, Patrick
patrick.haider@tum.de
Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik (APT),
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Heinz, Paul
paul.heinz@linde.com
Linde GmbH, Linde Engineering
Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6, 82049 Pullach im Isartal

Kender, Robert
robert.kender@tum.de
Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik (APT),
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

King, Rudibert
rudibert.king@tu-berlin.de
Mess- und Regelungstechnik (MRT), Technische
Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Klein, Harald
harald.klein@tum.de
Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik (APT),
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Lochner, Stefan
stefan.lochner@linde.com
Linde GmbH, Linde Engineering
Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6, 82049 Pullach im Isartal

Mhamdi, Adel
adel.mhamdi@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Mitsos, Alexander
alexander.mitsos@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Niehuis, Reinhard
reinhard.niehuis@unibw.de
Institut für Strahlantriebe (isa), Universität der
Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Pottmann, Martin
martin.pottmann@linde.com
Linde GmbH, Linde Engineering
Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6, 82049 Pullach im Isartal

Rehfeldt, Sebastian
sebastian.rehfeldt@tum.de
Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik (APT),
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Schulze, Jan
jan.schulze@avt.rwth-aachen.de
Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen
University
Forckenbeckstraße 51, 52074 Aachen

Wacker, Christian
christian.wacker@man-es.com
MAN Energy Solutions SE
Egellsstraße 21, 13507 Berlin

Wunderlich, Bernd
bernd.wunderlich@linde.com
Linde GmbH, Linde Engineering
Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6, 82049 Pullach im Isartal

1 Grundlagen und Potenziale von energieflexiblen Luftzerlegungsanlagen

Autoren: Schulze · Lochner · Wacker · Mitsos

1.1 Energieflexible Luftzerlegungsanlagen

Kryogene Luftzerlegungsanlagen (engl. Air Separation Unit, ASU) trennen Luft nach dem Prinzip der Destillation in die Bestandteile Sauerstoff, Stickstoff und Edelgase. Luftzerlegung ist eine Querschnittstechnologie. Die produzierten Gase werden in einer Vielzahl von industriellen Herstellungsprozessen, dem Gesundheitswesen sowie der Forschung benötigt. Je nach Produktspezifikationen und Produktionsmenge kommen verschiedene Ausführungen von ASUs zum Einsatz. *Abbildung 1* zeigt eine realitätsgetreue Darstellung einer kryogenen ASU, die sowohl flüssige als auch gasförmige Produktströme liefert.

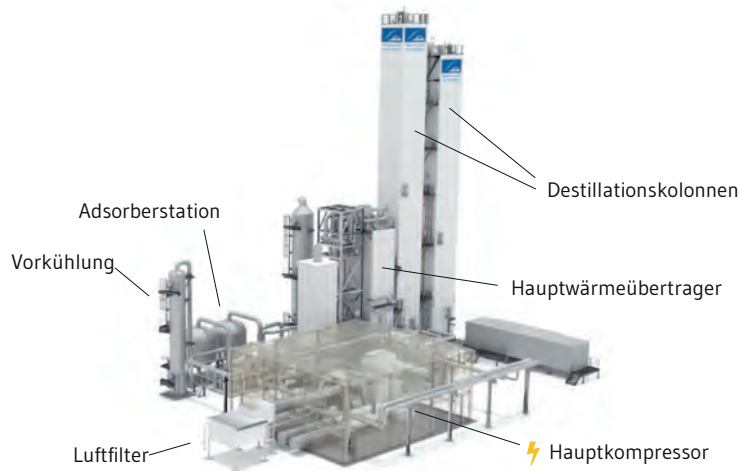


Abb. 1 Realitätsgetreue Darstellung einer kryogenen Luftzerlegungsanlage (Kender, 2021a)

Die durch einen Luftfilter angesaugte Luft wird im Hauptkompressor verdichtet. Nach einer anschließenden Vorkühlung werden in der Adsorberstation unerwünschte Komponenten wie Kohlenstoffdioxid und Wasser abgetrennt. Einige ASUs verfügen zusätzlich über einen nachgeschalteten »Booster-Kompressor«, der einen Teil des Luftstroms auf ein deutlich höheres Druckniveau bringt. In der thermisch isolierten sogenannten »Cold Box« erfolgt die eigentliche Trennung der verdichteten Luft in ihre Bestandteile.

Die eintretende Luft wird im Hauptwärmeübertrager, einem Mehrstromwärmeübertrager, auf ca. -180°C abgekühlt, während die kalten Produktströme zum Teil wieder aufgeheizt werden. Diese Temperaturen genügen, um die Luft teilweise zu verflüssigen, und ermöglichen somit eine Destillation. Darüber hinaus werden Turbinen verwendet, um der vorgekühlten Luft zusätzlich Energie zu entziehen. Die destillative Trennung erfolgt in der Linde-Doppelsäule, die aus zwei thermisch integrierten Destillationskolonnen verschiedener Druckniveaus besteht. Am Kopf der Niederdruckkolonne reichert sich gasförmiger Stickstoff an, während Sauerstoff im unteren Teil entnommen wird. ASUs werden konventionell für einen festen Betriebspunkt ausgelegt und mit konstanter Last betrieben. Abschaltungen erfolgen in der Regel nur zu Wartungszwecken. Insbesondere die Kompressoren weisen für gewöhnlich einen engen Lastbereich auf, in welchem die Luft energieeffizient verdichtet werden kann.

Die Energieflexibilitätsbefähigung von Luftzerlegungsanlagen zu »FlexASUs« umfasst insbesondere die Erweiterung des effizienten Lastbereichs der Kompressoren und die Robustifizierung von Bauteilen hinsichtlich thermischer sowie Druckbelastung durch wiederkehrende Laständerungen oder Abschaltung. Diese Modifikationen erfolgen mittels konstruktiver Änderungen sowie Regelungs- und Betriebsstrategien für die individuellen Anlagenkomponenten. Auf entsprechende Energieflexibilitätsmaßnahmen wird in *Kapitel C.3.2.1* und *C.3.2.2* näher eingegangen. Ferner ermöglicht die Identifikation geeigneter Betriebsstrategien für die Gesamtanlage einen sicheren und wirtschaftlichen Wechsel zwischen verschiedenen Arbeitspunkten einer Anlage. Solche Betriebsstrategien können mithilfe detaillierter Digitaler Zwillinge in dynamischen Computersimulationen identifiziert und untersucht werden. Zuletzt werden unter Verwendung Digitaler Zwillinge modellbasierte Betriebsstrategien wie eine nichtlineare modellprädiktive Regelung entwickelt, die zur schnellen Umsetzung großer Lastwechsel befähigt. Entsprechende Erkenntnisse werden in *Kapitel C.3.2.3* vorgestellt.

1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die genannten technischen Befähigungsstrategien für Luftzerlegungsanlagen (ASUs) können in drei betrieblichen Energieflexibilitätsmaßnahmen umgesetzt werden:

1. **Energieflexibilitätsbefähigung des kontinuierlichen Betriebs:** Hierbei wird der Lastbereich einer konventionellen ASU mit Gasprodukten von ca. 75 bis 100 Prozent auf 50 bis 100 Prozent kontinuierlichem Luftdurchsatz erweitert. Der elektrische Strombedarf der ASU wird entsprechend flexibilisiert, und es werden höhere Produktionsmengen zu Zeiten hoher Energieverfügbarkeit realisiert.
2. **Teilabschaltung einer ASU mit Flüssigprodukten:** Im Teilabschaltungsmodus wird der Verflüssigungskreislauf einer Flüssiganlage abgeschaltet. Die Turbinen sind in diesem Szenario nicht mehr im Betrieb. Das heißt, dass der Kältehaushalt der ASU zeitweise über die Rückführung kryogener Flüssigprodukte in die Anlage gedeckt werden muss. Die Produktion der Anlage wird bei dieser Energieflexibilitätsmaßnahme aufrechterhalten.

3. **Vollabschaltung:** Bei dieser Energieflexibilitätsmaßnahme wird die Produktion der Anlage vollständig eingestellt. Alle Anlagenkomponenten müssen den damit verbundenen, wechselnden mechanischen und thermischen Belastungen standhalten und die Anlage in einen Zustand schneller Wiederanfahrbarkeit versetzt werden.

Die diskutierten Energieflexibilitätsmaßnahmen für Luftzerlegungsanlagen sind gemäß VDI 5207 Blatt 1 wie in *Tabelle 1* dargestellt einzuordnen.

Tab. 1 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der flexiblen Luftzerlegung

Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM)	Umsetzungspartner	Branche
Prozess unterbrechen	Linde	Chemische Industrie
Prozessparameter anpassen	Linde	Chemische Industrie
Energie speichern (inhärent), thermisch	Linde	Chemische Industrie

1.3 Flexible Luftzerlegungsanlagen bei Linde Engineering

Linde ist das weltweit führende Industriegase- und Engineering-Unternehmen mit einem Umsatz von 22 Mrd. Euro im Jahr 2020. Das Unternehmen bedient eine Vielzahl von Endmärkten, darunter die Chemie-, Lebensmittel-, Elektronik- und die Metallindustrie sowie das Gesundheitswesen und den verarbeitenden Sektor. Als einer der größten und erfahrensten Anlagenbauer im Bereich kryogener Luftzerlegung bietet der Geschäftsbereich Linde Engineering mit über 4.000 Referenzen weltweit ein breites Anlagenportfolio von modularisierten und kundenspezifischen ASUs mit unterschiedlichen Reinheiten sowie Produktmengen bis zu 5 kt/d an. Die Entwicklung flexibler ASUs erfährt im Unternehmen eine hohe Priorität, damit die Anlagen auch in Zukunft nachhaltig und ökonomisch betrieben werden können.

1.4 Flexible Kompressoren bei MAN Energy Solutions

MAN Energy Solutions SE bedient mit den Teilbereichen Marine, Energie & Speicher sowie Industrie die wichtigsten Aspekte der Weltwirtschaft. Mit dem Portfolio aus Turbomaschinen, Marine-Antriebssystemen, Energielösungen sowie After-Sales-Service erwirtschaftete das Unternehmen 2020 einen Umsatz von 3,3 Mrd. Euro. Innovative Lösungen in den Bereichen alternative Kraftstoffe, hybride Marine-Antriebssysteme, Energieerzeugung und -speicherung, CO₂-Speicherung und Sektorkopplung weisen den Weg in eine dekarbonisierte Wirtschaft. Auch die Energieflexibilitätsbefähigung des Hauptenergieverbrauchers einer Luftzerlegungsanlage – des Kompressors – ist vor diesem Hintergrund zu sehen. Die im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie entwickelten Technologien zur Energieflexibilitätsbefähigung haben das Potenzial, auch in weiteren Anwendungsbereichen eingesetzt zu werden.

1.5 Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials

Mit einer gesamtdeutschen Anschlussleistung von schätzungsweise 930 MW (entspricht ca. 4 TWh/a) hat die kryogene Luftzerlegung einen merklichen Anteil von ca. 1 Prozent am industriellen Stromverbrauch Deutschlands. Die Energieflexibilität dieser Anschlussleistung als Zielsetzung stellt dementsprechend einen wesentlichen Hebel bei der industriellen Energieflexibilitätsbefähigung im Zuge der Energiewende dar. Bei der Potenzialerhebung für Luftzerlegungsanlagen (ASUs) muss zwischen zwei Anlagentypen unterschieden werden (*Abbildung 2*).

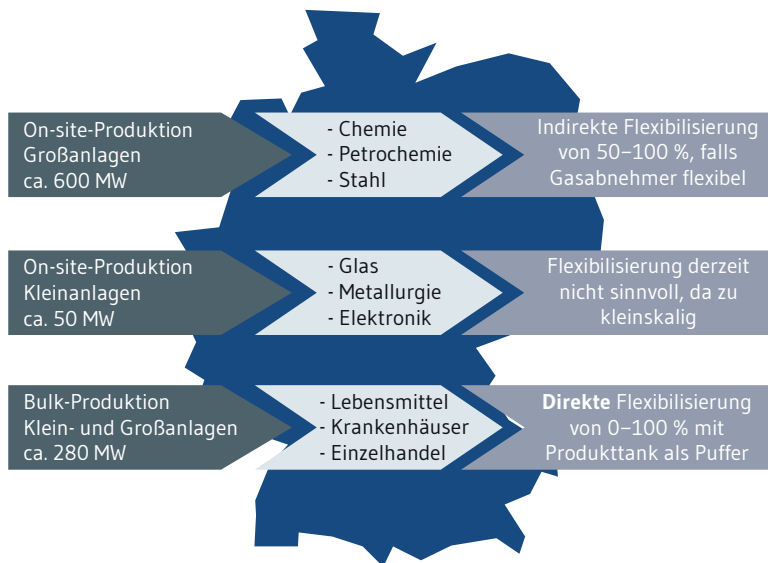


Abb. 2 Energiebedarf deutscher Luftzerlegungsanlagen (interne Abschätzung)

On-site-Produktionsanlagen dienen der kontinuierlichen Versorgung von Großkunden (z. B. der Chemie- und Stahlindustrie) mit gasförmigen Produkten. Energieflexibilität dieser Branchen erfordert deshalb auch flexible ASUs. Umgekehrt ist die effektive Energieflexibilitätsbefähigung der ASUs an die synergetische Kopplung mit den Abnehmern gebunden. On-site-ASUs repräsentieren den Großteil der Produktionsleistung von ASUs in Deutschland und sollen mittels der in diesem Kapitel diskutierten Energieflexibilitätsmaßnahmen für einen kontinuierlichen Lastbereich von 50 bis 100 Prozent befähigt werden.

Die zweite große Klasse von ASUs sind Bulk-Produktionsanlagen, die Flüssigprodukte bereitstellen und stärker entkoppelt betrieben werden können. Durch den Einsatz von Flüssigprodukt tanks dienen die verflüssigten Gasprodukte als Energiespeicher und ermöglichen die Aufrechterhaltung des

Produktionsbetriebs auch im Teil- oder Vollabschaltungsmodus. Durch die Erweiterung des kontinuierlichen Lastbereichs auf 50 bis 100 Prozent sowie die technische Befähigung zur wiederholten, zeitweise vollständigen Unterbrechung der Flüssigproduktion kann bei Bulk-Analgen potenziell ein Lastbereich von 0 bis 100 Prozent erreicht werden.

Bei vollständiger Umsetzung der genannten Energieflexibilitätsmaßnahmen ergibt sich im Sinne der Potenzialabschätzung eine flexibilisierbare Leistung von ca. 580 MW Lastverzicht, d. h. 300 MW (On-site) und 280 MW (Bulk) (Tabelle 2). Ohne die befähigenden Energieflexibilitätsmaßnahmen stehen derzeit unter Annahme eines Lastbereichs von 75 bis 100 Prozent im Bestfall ca. 220 MW flexibilisierbare Leistung zur Verfügung. Bisherige Ergebnisse deuten darauf hin, dass die in Deutschland vorhandene Volatilität an den Energiemärkten bereits heute Anreize für einen energieflexiblen Betrieb bieten könnte.

Den genannten Potenzialen stehen einschränkende Rahmenbedingungen gegenüber. Insbesondere sind regulatorische Hemmnisse aus der Energiepolitik, wirtschaftliche Gründe (z. B. Lieferverträge, hohe Produktionsauslastung), betriebliche Einschränkungen (fehlende Akzeptanz, unflexible On-site-Gasabnahme) sowie technische Unwägbarkeiten (z. B. zu geringe Lastwechselgeschwindigkeiten, fehlender Automatisierungsgrad, geringe Lastwechselrobustheit) zu nennen. Die fortschreitende technische Befähigung der ASUs steht im Fokus dieses Kapitels, während die Ebnung energiepolitischer Hemmnisse im Kapitel A.1 thematisiert wird.

Tab. 2 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Technologie »Kryogene Luftzerlegung«.

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Prozess unterbrechen, Energie speichern (inhärent), thermisch	300 MW Abrufdauer: max. 48 h
Prozessparameter anpassen	280 MW Abrufdauer: max. 24 h

2 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Ecker · Flüggen · Frank · Fritsch · Gentsch · Haider · Heinz · Kender · King · Klein · Mhamdi · Mitsos · Niehuis · Pottmann · Rehfeldt · Schulze · Wacker · Wunderlich

2.1 Robustifizierung des Hauptwärmeübertragers

Der Hauptwärmeübertrager (engl. Main Heat Exchanger, MHE) ist eine der wichtigsten Anlagenkomponenten einer Luftzerlegungsanlage (ASU). Er stellt die Schnittstelle zwischen dem kryogenen und dem warmen Teil der Anlage dar und reduziert die nötige Kälteleistung durch das Abkühlen des angesaugten Luftstroms gegen kalte Produkte signifikant. Aufgrund der Eignung für tiefkalte Bedingungen, der hohen Anforderungen an die Prozessintegration und der großen spezifischen Oberfläche für den Wärmeübergang werden dafür nahezu ausschließlich gelötete Plattenwärmeübertrager (engl. Plate-fin Heat Exchanger, PFHE) aus Aluminium verwendet. In diesem Typ Wärmeübertrager können über zehn Prozessströme durch Passagen strömen, die aus Seitenleisten und Trennblechen, den namensgebenden Platten, geformt werden. In den Passagen sorgen metallische Einbauten, sogenannte »Fins«, für die nötige Oberfläche für den Wärmeübergang. Über 100 dieser Passagen können in genau definierter Reihenfolge in einem anspruchsvollen Fertigungsprozess zunächst zu Modulen verlötet und schließlich zu einem fertigen Wärmeübertragerblock verschweißt werden. *Abbildung 3a* zeigt einen einfachen PFHE-Block nach der Fertigung.

Im stationären Betrieb von Luftzerlegungsanlagen weist der MHE einen Temperaturunterschied vom warmen bis zum kalten Ende von ca. 200 °C auf. Durch den energieflexiblen Betrieb der ASU kommt es zu einer deutlich erhöhten Anzahl an Lastwechseln, Abschalt- und Wiederanfahrvorgängen, welche Temperaturänderungen im MHE zur Folge haben. Dadurch kann es zu zusätzlichen thermischen Belastungen des PFHEs kommen, die sich negativ auf die Lebensdauer auswirken können. Aus diesem Grund werden dringend Modelle benötigt, die die Lebensdauer des MHE bei energieflexiblem Betrieb korrekt vorhersagen und gegebenenfalls dazu verwendet werden können, schonende Betriebskonzepte auszuarbeiten und damit den ordnungsgemäßen Betrieb der ASU sicherzustellen.

Belastbare Modelle müssen zwingend mit experimentellen Daten validiert werden, um die prinzipielle Funktionsweise der Modelle sicherzustellen. Da für eine Abbildung des Verhaltens des MHE in einer flexiblen Luftzerlegungsanlage dreidimensionale, dynamische Modelle benötigt werden, müssen auch experimentelle Temperatur- und Dehnungsdaten aus dem dynamischen Betrieb zur Validierung verwendet werden. Leider können diese Messdaten nicht an kommerziell betriebenen Anlagen gewonnen werden. Einerseits sind diese Anlagen zumeist nicht ausreichend für diese Zwecke instrumentiert, da aus Kostengründen meist nur die zur Prozesssteuerung nötige Messtechnik verbaut ist. Andererseits werden kommerzielle Anlagen derzeit noch nicht ausreichend energieflexibel betrieben, um schädliche Betriebsszenarien für nicht dafür ausgelegte Anlagenbestandteile wie den MHE zu vermeiden. Daher wurde im Rahmen des Projekts ein großer, kryogener Prüfstand entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen (Haider, 2019; Fritsch, 2021a). Im Prüfstand werden zwei gelötete PFHE aus Aluminium abwechselnd mit warmem und tiefkaltem Stickstoff-Gas beaufschlagt,

um absichtlich besonders schädliche Temperaturwechsel hervorzurufen und damit in einem absehbaren Zeitraum einen Schaden an den Wärmeübertragern hervorzurufen. In *Abbildung 3b* findet sich eine Darstellung des CAD-Modells des Prüfstands.

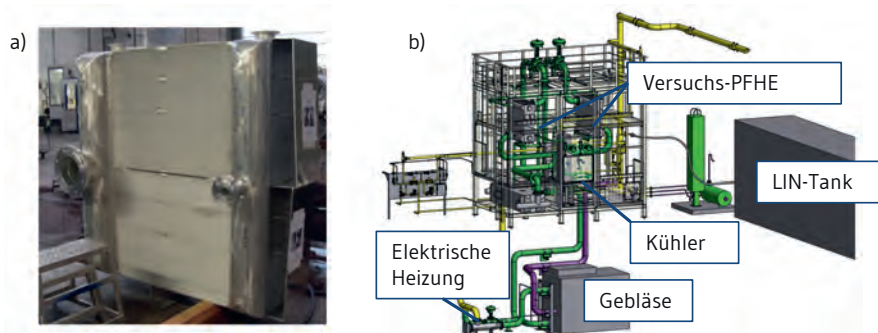


Abb. 3 a) Fertigung eines Versuchs-Wärmeübertragers (Haider 2019); b) CAD-Modell des Prüfstands (Klein 2020)

In *Abbildung 3b* sind die wesentlichen Bestandteile des Prüfstands dargestellt. Die warmen und kalten Stickstoffströme werden mithilfe eines Heizers und eines Kühlers bereitgestellt. Im Kühler werden im Betrieb etwa 400 kg/h flüssiger Stickstoff verdampft, um das kryogene Temperaturniveau einer ASU zu erreichen. Aufgrund der niedrigen Temperaturen ist es erforderlich, den kryogenen Teil des Prüfstands in einer sogenannten Coldbox zu verbauen, die mit isolierendem Perlit gefüllt ist. Durch die Verwendung von zwei PFHE kann der Versuchsaufbau mit einem Gebläse im Kreislauf betrieben werden, wobei im Dauerbetrieb jeweils gleichzeitig ein PFHE erwärmt und der andere abgekühlt wird. Insgesamt werden etwa 10 t/h gasförmiger Stickstoff im Kreislauf gefördert.

Die Wärmeübertrager sind umfangreich mit moderner Messtechnik wie Glasfasern ausgerüstet, um dreidimensionale Temperatur- und Spannungsdaten während des dynamischen Betriebs aufzuzeichnen und den Eintritt unterschiedlicher Schadensbilder umgehend zu detektieren (Fritsch, 2021b). Neben der Gewinnung der für die Validierung benötigten Daten können somit Erkenntnisse über den Schadensmechanismus bei Ermüdung durch thermische Wechselbelastung gewonnen werden.

Die Simulationsmodelle zur Bestimmung des Einflusses einer hochgradig energieflexiblen Betriebsweise auf die Lebensdauer eines PFHE wurden im Rahmen des Forschungsprojekts neu entwickelt. Dabei wird eine strukturmechanische Analyse auf Basis der Finite-Elemente-Methode durchgeführt, in der die Verformung eines Wärmeübertragers unter Berücksichtigung anliegender Lasten berechnet und einen eventuellen Schadenseintritt vorhergesagt werden kann. Hierfür ist die Temperaturverteilung als Eingangsgröße erforderlich, welche mit einem auf numerischer Strömungsmechanik basierenden Modell berechnet werden kann. Um die im energieflexiblen Betrieb häufig dreidimensional

ausgeprägte Temperaturverteilung mit ausreichender Genauigkeit auf Basis der Prozessbedingungen zu bestimmen, wird der Apparat bei der Berechnung der Thermofluidynamik dreidimensional aufgelöst. Dies stellt eine deutliche Steigerung des Detailgrads im Gegensatz zur üblicherweise ein- oder zweidimensionalen Betrachtung der Thermofluidynamik in der stationären Auslegung dar. Die größte Herausforderung bei der Modellierung ist es, einerseits die relevanten Teile der Geometrie ausreichend genau aufzulösen und andererseits den Rechenaufwand so gering zu halten, dass auch transiente Simulationen möglich sind.

Hierfür wird ein Rechengitter generiert, das die Seitenleisten und Trennbleche des PFHEs exakt auflöst und die detaillierte Geometrie der Fins durch ein poröses Medium approximiert. Dieses Vorgehen ist naheliegend, da die räumlichen Abmessungen der für den Wärmeübergang hauptverantwortlichen Fins mehrere Größenordnungen kleiner sind als die des gesamten Apparats. Das für eine vollständige Auflösung erforderliche, sehr feine Rechengitter wäre mit dem Anspruch einer transienten Simulation großer PFHEs nicht vereinbar (Haider, 2020).

Die Strömungsführung im Apparat, beispielsweise in Verteilern und Sammlern, wird mit einem speziell für das dreidimensionale Modell entwickelten Ansatz vom porösen Medium berücksichtigt, wodurch die strömungslenkende Wirkung der Fins realitätsnah wiedergegeben wird. So kann auch der Einfluss von örtlichen Fehlverteilungen und Totzonen auf die Temperaturverteilung im Apparat berücksichtigt werden (Haider, 2021). Der Modellansatz des porösen Mediums ermöglicht die effiziente Einbindung von Korrelationsgleichungen für Wärmeübergang und Druckverlust in Auslegungsqualität, um die Interaktion zwischen Prozessfluid und Fins zu modellieren.

Für das Betriebsszenario des oben beschriebenen Prüfstands stehen erstmals dreidimensionale Messdaten aus dem dynamischen Betrieb eines PFHE zur Verfügung. Diese können zur Validierung der Lebensdauerberechnung und des darin enthaltenen thermofluidynamischen Simulationsmodells herangezogen werden. Hierfür ist in *Abbildung 4b* beispielhaft die mit dem Modell berechnete Temperaturverteilung während des Abkühlvorgangs eines Wärmeübertragers des Prüfstands gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die gewählten Betriebsbedingungen zu einer komplexen Temperaturverteilung in allen Raumrichtungen führen. Neben den Temperaturgradienten in Hauptströmungsrichtung, die auch in eindimensionalen Modellen berücksichtigt werden, kommt es zu signifikanten Temperaturdifferenzen über die Breite und die Stapelhöhe des PFHE. Da der dynamische Abkühlvorgang zu dem gezeigten Zeitpunkt erst wenige Minuten andauert, weist ein Großteil des Apparates noch die warme Ausgangstemperatur auf. Die seitliche Einspeisung des kalten Stickstoffs führt unter den gewählten Betriebsbedingungen zu einer deutlichen Ungleichverteilung der Temperatur im Einlassbereich.

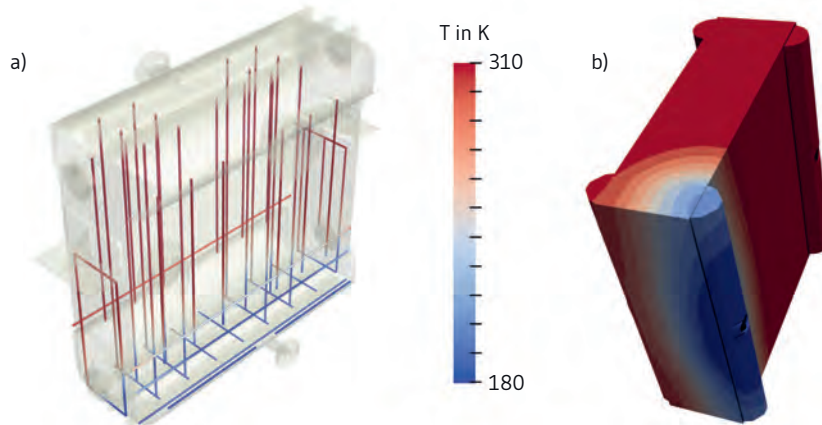


Abb. 4 Vergleich von a) den Ergebnissen der Temperaturmessungen im Prüfstand und b) den Ergebnissen der dreidimensionalen Simulation (Klein 2020)

Im Vergleich zur Simulation sind in *Abbildung 4a* die im Experiment mithilfe von Glasfasern gemessenen Temperaturen zu einem Zeitpunkt am Ende des Abkühlvorgangs dargestellt. Die durch Simulation und Experiment ermittelten Temperaturen stimmen sehr gut überein. Die dreidimensionale Temperaturverteilung über Länge, Breite und Stapelhöhe des PFHE infolge der beschriebenen dynamischen Effekte ist sowohl anhand der experimentellen Daten als auch anhand der Ergebnisse des Modells deutlich zu erkennen. Die Validierung am Demonstrator erlaubt es, die simulative Abschätzung der Lebensdauer belastbar auf reale Anlagen zu übertragen. Hierbei liegt der Fokus darauf, kritische Betriebsszenarien zu erkennen, zu bewerten und Strategien zu ihrer Vermeidung zu entwickeln. Damit können PFHE künftig in deutlich energieflexibleren Anlagen eingesetzt werden.

2.2 Erweiterter Lastbereich der Kompressoren

Der Haupteintrag der elektrischen Leistung in den Luftzerlegungsprozess erfolgt im Haupt- und Booster-Kompressor. Die zu verflüssigende Umgebungsluft wird im Hauptkompressor vorverdichtet und im Booster-Kompressor auf bis zu 70 bar verdichtet. Infolge der angestrebten Energieflexibilitätsbefähigung der ASUs werden hierzu Kompressoren unabdinglich, die abseits des Auslegungspunkts die geforderten Drücke bei wechselnden Massenströmen weiterhin mit einem hohen Wirkungsgrad liefern. Nur dann werden die marktwirtschaftlichen Vorteile des energieflexiblen Gesamtanlagenbetriebs nicht aufgrund von unverhältnismäßig hohen Verlustleistungen in diesen ersten Prozessschritten wieder verspielt.

Für die so nötige Erweiterung des effizienten Betriebsbereichs der Kompressoren ist es essenziell, die Verstellmechanismen der einzelnen Kompressorstufen im Detail zu betrachten. *Abbildung 5* veranschaulicht eine solche Stufe eines in der Luftzerlegung eingesetzten Radialverdichters. Mehrere dieser Kompressorstufen entlang des Strömungspfadcs bilden den Haupt- bzw. Booster-Kompressor.

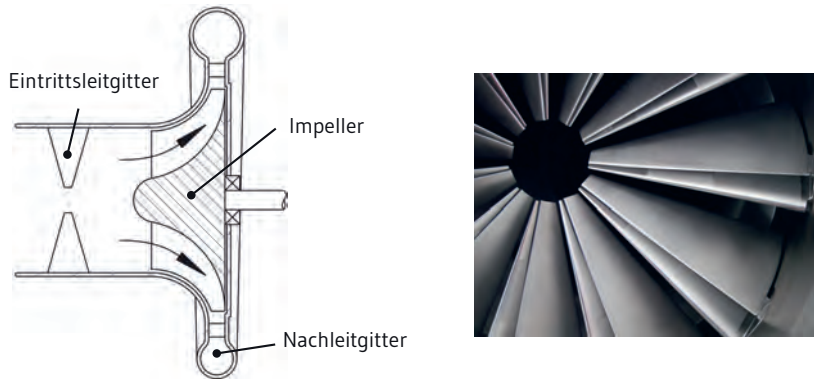


Abb. 5 Schnittbild einer Kompressorstufe (l.) und Bild des Eintrittsleitgitters mit variablen Schaufelkonzept (r.)

Der Impeller stellt das Herzstück einer radialen Kompressorstufe dar. Aufgrund des üblichen Antriebs des Impellers per Synchronmaschine ist die Drehzahl fest an die Netzfrequenz des Stromnetzes gekoppelt. Eine Drehzahlregelung des Kompressors ist nicht möglich. Um die umgesetzte Leistung und den Massenstrom durch die Stufe dennoch anzupassen, sind innovative, regelbare Eintrittsleitgitter direkt vor dem Impeller vorgesehen. Diese erlauben eine verlustarme Modifikation der Zuflussbedingungen in einem weiten Betriebsbereich. Die Integration verstellbarer Nachleitgitter stromab des Impellers komplettiert das innovative Konzept des flexiblen Verdichters. Als Gegenstück zu den Eintrittsleitgittern können diese zusätzlichen Regelorgane zur Reduktion von Verlusten im Abströmfeld eingesetzt werden (Simon, 1987).



Abb. 6 Klassisches symmetrisches (l.) und variables (r.) Schaufelkonzept des Eintrittsleitgitters (Frank, 2021b)

Hinsichtlich der aerodynamischen Optimierung der Schaufelgeometrie des Eintrittsleitgitters bietet sich speziell der Ansatz einer innovativen Eintrittsleitgitterschaukel variabler Geometrie nach Händel (2015) an. Wie in *Abbildung 6* dargestellt, bilden hierbei zwei unabhängige, über ein Gelenk verbundene Schaufelsegmente die Profilgeometrie. So lässt sich die für den Teillastbereich erforderliche Strömungsumlenkung stufenweise und damit sehr viel effizienter gestalten.

Gemäß der wissenschaftlichen Praxis erfolgte die Entwicklungsarbeit der variablen Eintrittsleitgittergeometrie zunächst an sogenannten Linearkaskaden. Die dominierenden, primären Profilverluste können so vollumfänglich abgebildet werden. Zusätzliche Strömungsverluste, die der endlichen Schaufellänge bzw. der Einflüsse des Schaufelfußes und der Blattspitze geschuldet sind, werden hingegen nicht oder nur im Ansatz berücksichtigt. Für eine vollständige Verlustcharakterisierung sind damit Untersuchungen an dem eigentlichen, ringförmigen Eintrittsleitgitter unerlässlich. Entsprechende subsequente Messungen wurden am Drallerzeugerprüfstand der Universität der Bundeswehr München durchgeführt (Frank, 2020; Frank 2021a).

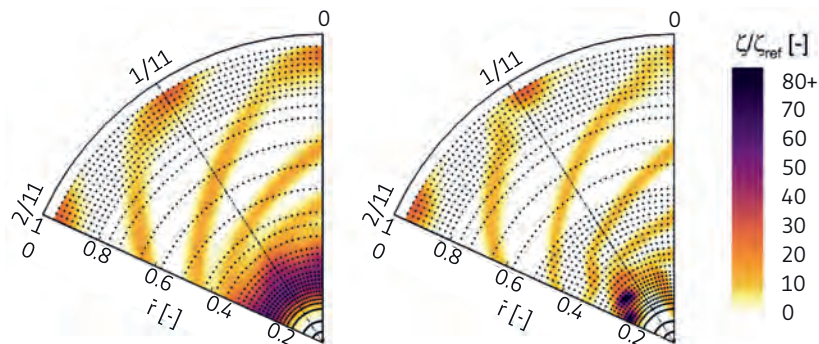


Abb. 7 Lokale Auflösung der durch die klassische (l.) und variable Schaufelgeometrie (r.) generierten Totaldruckverluste ζ / ζ_{ref} bei $\Delta\beta = 30^\circ$ (Frank, 2021b)

Mithilfe pneumatischer Druckmessungen im Nachlauf des Eintrittsleitgitters können so, wie exemplarisch in *Abbildung 7* dargestellt, lokal hochaufgelöst die aerodynamischen Verluste quantifiziert werden (Frank, 2021b). Bei einem Metallwinkel von $\Delta\beta = 30^\circ$ zeigt sich bereits, dass nicht nur die primären Verluste auf mittlerer Schaufelhöhe zwischen $\bar{r} = 0,4$ und $0,9$, sondern auch die Verlusteffekte am Schaufelfuß bei $\bar{r} > 0,9$ und an der Blattspitze bei $\bar{r} \approx 0,2$ für das Vorleitgitter variabler Schaufelgeometrie geringer ausfallen. Dies hat neben den geringeren Gesamtverlusten verbesserte Zuströmbedingungen auf das Laufrad zur Folge.

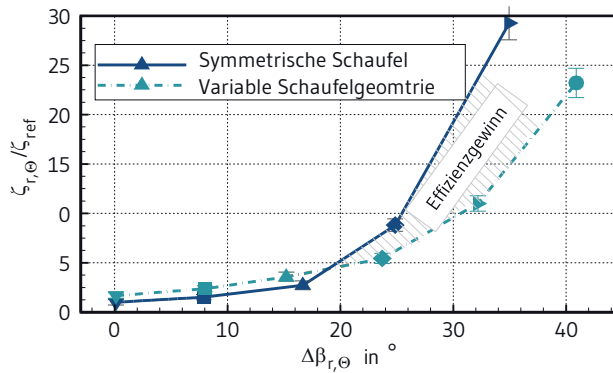


Abb. 8 Verteilung des integralen Totaldruckverlusts $\zeta_{r,\theta} / \zeta_{ref}$ (Frank, 2021b)

Werden die lokalen Verluste über die Fläche integriert und wird die generierte, mittlere Strömungsumlenkung $\Delta\beta_{r,\theta}$ aufgetragen, ergeben sich die in *Abbildung 8* dargestellten Performance-Kurven. Entsprechend dem bereits zuvor gewonnenen Eindruck zeigt sich, dass das Vorleitgitter mit variablen Schaufeln speziell im hochumlenkenden Bereich signifikant geringere Verluste aufweist. Der Bereich akzeptabler Strömungsverluste wird um ca. 10° erweitert. Insofern ist unter Einsatz der optimierten Eintrittsleitgitterkonfiguration variabler Schaufelgeometrie mit einer signifikanten Performance-Steigerung speziell jener Arbeitspunkte abseits des Auslegungspunktes zu rechnen.

Für die Evaluation im Kontext des flexiblen Verdichters muss das neuartige Eintrittsleitgitter im Vorlauf eines entsprechenden Radialverdichters integriert werden. Ein solcher flexibler Verdichter mit eigens entwickeltem Laufrad wird bei MAN Energy Solutions in Berlin betrieben. Der einstufige Kompressor wartet neben dem neuartigen Eintrittsleitgitter mit einem verstellbaren Nachleitgitter im Diffusor auf (*Abbildung 5*). Für das Zusammenspiel von Eintritts- und Nachleitgitter sorgt das an der TU Berlin zunächst *in silico* entwickelte Regelungskonzept. Abhängig vom aktuellen Betriebszustand gewährleistet ein Integralregler den zu liefernden Massenstrom über eine geeignete Stellung von Eintritts- und Nachleitgitter. Parallel dazu gibt ein sogenannter Extremwertregler ein additives Nachleitgitterkommando mit dem Ziel, die aufzubringende Leistung zu minimieren, d. h. die Effizienz bei gleichbleibendem Massenstrom und Enddruck zu maximieren.

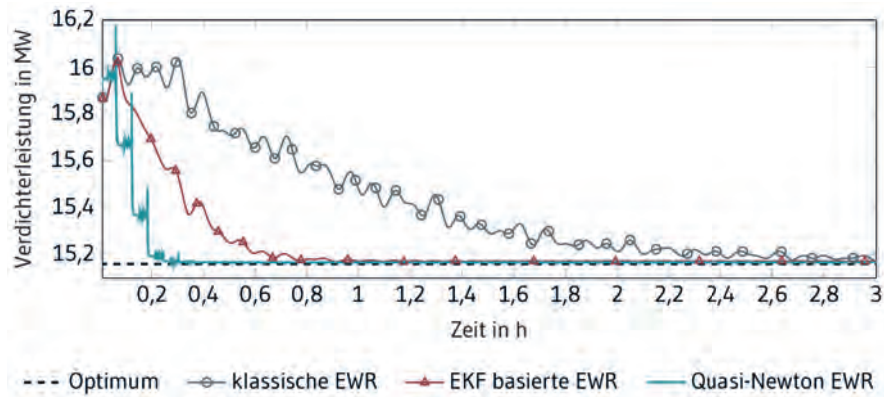


Abb. 9 Vergleich der Ergebnisse für einen simulierten fünfstufigen, flexiblen Verdichter für drei Varianten einer Extremwertregelung (EWR)

Extremwertregelung ist ein altbekanntes Verfahren für die Echtzeitoptimierung von Prozessen (Tan, 2010). Der klassische Extremwertregler kommt ohne ein mathematisches Prozessmodell aus. Für gewöhnlich sind diese Verfahren eher träge, weshalb in der Vergangenheit bereits Modifikationen wie die EKF-basierte Extremwertregelung vorgeschlagen wurden (Gelbert, 2012). Im Hinblick auf die erwarteten schnellen Lastwechsel hochflexibler Anlagen wurde in FlexASU eine sogenannte Quasi-Newton Extremwertregelung entwickelt, die das Potenzial hat, noch dynamischer zu agieren (Lange, 2020). Einen Vergleich der genannten Konzepte für einen hypothetischen fünfstufigen Verdichter mit Zwischenkühlung und stufenweise installierten Eintritts- und Nachleitgittern zeigt *Abbildung 9*.

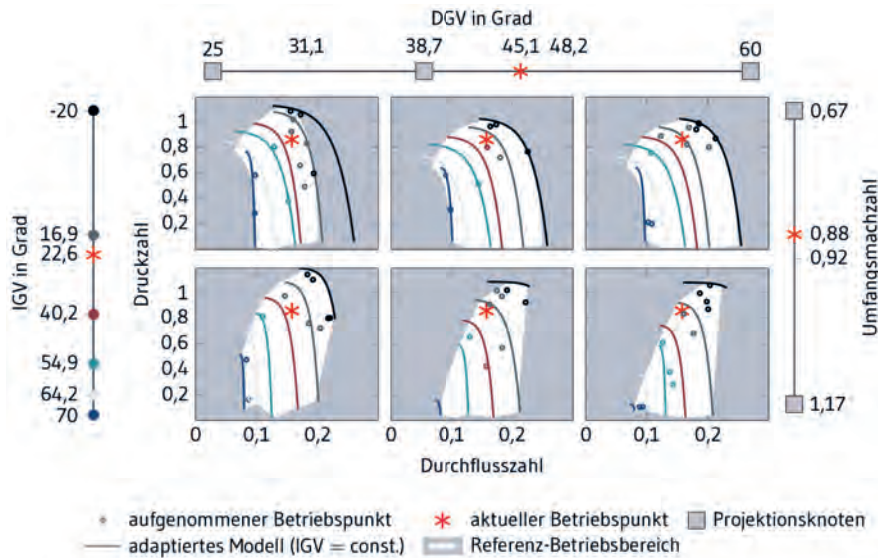


Abb. 10 Beispiel einer Modelladaption im laufenden Betrieb. DGV: Nachleitgitter, IGV: Vorleitgitter, M_{u_2} : Umfangsmachzahl, Ψ_s : Druckzahl, ϕ : Durchflusszahl

Neben der Regelung ist die Überwachung des flexiblen Verdichters der zweite wichtige Baustein für den Betrieb dieses neuartigen Typs. Überwachungsrouitnen können außerdem gewinnbringend eingesetzt werden, wenn sich für eine neue Kompressorkonfiguration im Vorlauf realer Prüfstandversuche das erwartete Verhalten des Verdichters bezüglich der Prozessparameter nur qualitativ vorhersagen lässt. Der Arbeitspunkt des flexiblen Verdichters ergibt sich aus der Kombination von Druckverhältnis, Drehzahl, Prozesstemperatur und der Stellung von Vor- und Nachleitgitter. Die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten, die den Betriebsbereich aufspannen, ist für den flexiblen Verdichter daher wesentlich größer als für konventionelle Typen. Um die Abhängigkeiten der genannten Prozessparameter untereinander zu identifizieren bzw. mathematische Modelle zur Beschreibung zu validieren, müssen entweder deutlich zeitintensivere Prüfstandversuche durchgeführt werden oder Überwachungsrouitnen zum Einsatz kommen, die eine solche Identifikation bzw. Modelladaption während des Betriebs leisten können. Zwar steigt mit letzter Option die Modellsicherheit im Laufe der Betriebszeit, die Identifikation fußt jedoch in jeder neuen Betriebsituation auf sehr wenigen Informationen. Für diese (beim flexiblen Verdichter vorliegende) Problemstellung hat die TU Berlin eine echtzeitfähige Überwachungsrouitne entwickelt. Sie kann qualitatives Vorwissen über bestimmte Modellcharakteristiken sowie Datenpunkte aus bereits vermessenen Bereichen nutzen, um jederzeit eine optimale Identifikation bzw. Modelladaption zu leisten. Eine Vorstellung des Konzepts in einem frühen Entwicklungsstadium für den sehr einfachen, univariaten Fall (nur eine Abhängigkeit unter zwei Prozessparametern) findet sich in Gentsch (2020). *Abbildung 10* zeigt eine Momentaufnahme eines möglichen Überwachungsmonitors, der die von der Routine adaptierten Vorleitgitter-Kennlinien anzeigt.

2.3 Flexible Betriebsstrategien und Digitale Zwillinge

Der erweiterte technisch effiziente Lastbereich energieflexibler Luftzerlegungsanlagen kann mittels modellbasierter Regelungs- und Analysemethoden betrieblich nutzbar gemacht werden. Aufgrund des großen Betriebsbereichs und der starken Nichtlinearität des Prozessverhaltens bei gleichzeitig strikten Qualitäts- und Sicherheitsbeschränkungen sind für die Durchführung schneller, sicherer und wirtschaftlicher Lastwechsel nichtlineare Modellierungs- und Regelungsansätze aus dem Bereich »Advanced Process Control« erforderlich. Die Entwicklung Digitaler Zwillinge von ASUs sowie einer nichtlinearen, modellprädiktiven Regelung sind deshalb wichtige Schritte bei der Entwicklung neuer Betriebsstrategien.

Abbildung 11 stellt die Kernbestandteile und Funktionen Digitaler Zwillinge dar. Die sogenannte »virtuelle ASU« ist das Kernelement des Digitalen Zwillinges. Dabei handelt es sich um druckgetriebene, dynamische Anlagenmodelle, die auf hochdetaillierten Auslegungskorrelationen (Kolonnen, Wärmeübertrager) basieren und den Anlagenbetrieb bestmöglich abbilden. Um einen Datentransfer zwischen dem Digitalen Zwilling und der realen Anlage zu ermöglichen, wird die innovative Simulationsinfrastruktur SMI@LE (Simulation and Modeling Infrastructure @ Linde Engineering) verwendet (Kender, 2019), die es inhärent erlaubt, die virtuelle ASU an den Anlagenbetrieb und/oder eine Betriebsdatenbank zu koppeln. Somit können die Simulationsdaten genutzt werden, um den Betrieb zu verbessern und umgekehrt (Kender, 2021b).

Die Simulationsmodelle sind so konzipiert, dass der komplette Lebenszyklus einer Anlage dargestellt werden kann. Der Fokus des Kopernikus-Projekts SynErgie liegt dabei auf der Entwicklung von hochdetaillierten dynamischen Simulationsmodellen. Hierbei wird ein modularer Top-down-Ansatz verfolgt. Er erlaubt es, die Modellgranularität anzupassen, um gezielt den Ansprüchen der Simulationsaufgabe genügen zu können.

Der Digitale Zwilling kann in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus einer ASU zu unterschiedlichen Zwecken herangezogen werden. Je nach betrachteter Phase stehen jeweils stationäre Simulationen (beim Anlagendesign) oder dynamische Simulationen (im Betrieb) im Vordergrund.

Während des Anlagendesigns werden in der Angebotsphase Prozessanlagen thermodynamisch ausgelegt und das dazu voraussichtlich benötigte Equipment mithilfe von Shortcut-Modellen kosten-technisch abgeschätzt. Im weiteren Projektverlauf werden das Prozess- und Equipment-Design noch weiter optimiert.

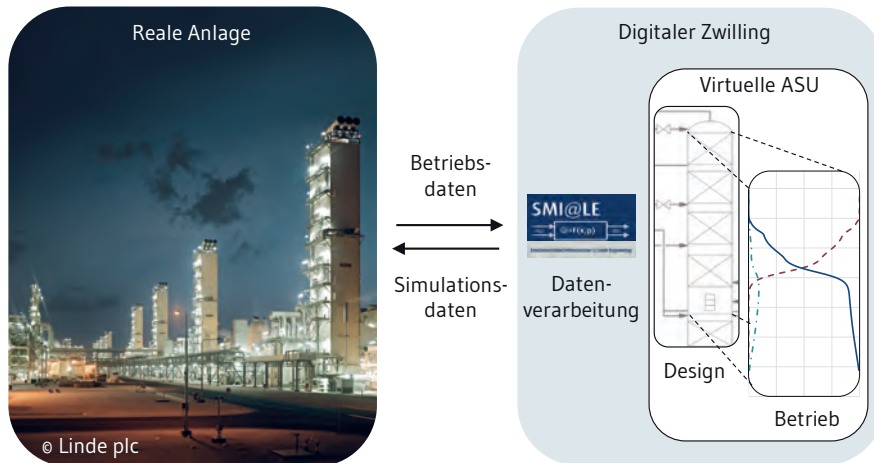


Abb. 11 Konzept des Digitalen Zwillings einer Luftzerlegungsanlage (Kender, 2021b)

Während der Phase des Anlagenbetriebs können die Modelle genutzt werden, um Inbetriebnahme-szenarien zu optimieren oder die Betriebsstrategie zu verbessern. Hier können z. B. durch Simulation des Anfahrvorgangs die Anfahrzeiten einer Anlage verkürzt oder Regelkonzepte *in silico* erprobt werden. Ein wichtiger Vorteil Digitaler Zwillinge ist die Möglichkeit, auch Lastwechsel-Szenarien mit Verletzung von Produktreinheit oder Produktionsmenge untersuchen und analysieren zu können. Diese Möglichkeit erlaubt der echte Anlagenbetrieb nicht, da eine solche Betrachtung mit Produktionseinbußen verbunden wäre (Kender, 2021c).

Abbildung 12 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Fallstudie zur Analyse von Betriebsengpässen. In dieser Simulationsstudie einer ASU mit Argon-Abtrennung wurde gezeigt, dass durch die gezielte Manipulation der Flüssigkeitszufuhr zur Niederdruckkolonne (unterschiedliche Soll-Füllstände der Druckkolonne) die Lastwechselgeschwindigkeit von 0,5 auf 4 Prozent Last pro Minute erhöht werden kann, ohne die Anforderungen an die Produktreinheit zu verletzen (Abbildung 12, links). Die Anpassung des Flüssigkeitsstroms (b) bewirkt hierbei, dass die Reinheitsanforderungen auch bei höherer Lastwechselgeschwindigkeit im Gegensatz zum ursprünglichen Betrieb (a) nicht verletzt wird. Dies ist auch aus den Konzentrationsprofilen der Kolonne ersichtlich (Abbildung 12, rechts). Für den Fall der angepassten Flüssigkeitszufuhr zur Niederdruckkolonne wird das Konzentrationsprofil nach oben verschoben (siehe schwarze Pfeile), wodurch die geforderte Sauerstoffreinheit während des Lastwechsels eingehalten werden kann.

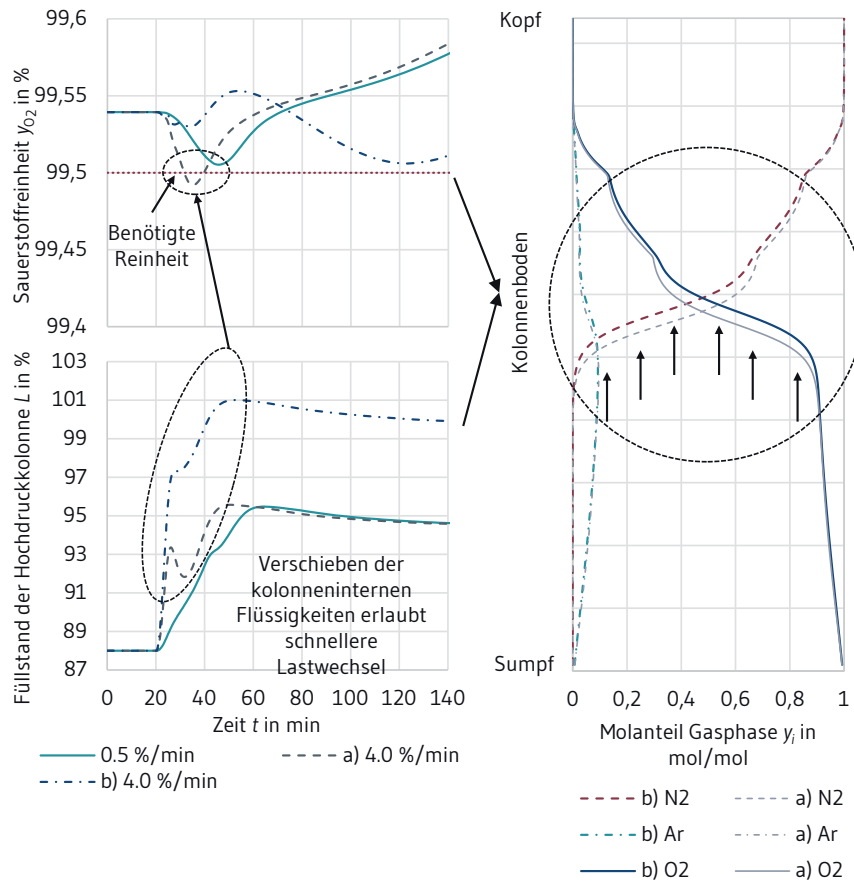


Abb. 12 Einfluss des Flüssigkeitsrücklaufs zur Niederdruckkolonne auf die Produktreinheit (Kender, 2021c): Zeitverlauf von Sauerstoffreinheit und Füllstand im Referenzbetrieb und bei höherer Lastwechselgeschwindigkeit (4 %/min) (a) ohne und (b) mit betrieblichen Anpassungen (l.); Konzentrationsprofile der Niederdruckkolonne für schnelleren Lastwechsel (a) und (b) bei $t \approx 35$ min (r.)

Neben der Analyse kontinuierlicher Lastwechselszenarien können Digitale Zwillinge auch wertvolle Informationen für die Betriebsplanung in Extremsituationen liefern, z. B. bei einem plötzlichen Anlagenstillstand mit darauffolgendem Wiederanfahren. Digitale Zwillinge können hierbei Vorhersagen zu Verlauf und Dauer eines Wiederanfahrvorgangs liefern, wodurch eine zeitlich strikt getaktete Betriebsplanung ermöglicht wird (Kender et al., 2021b).

Die Entwicklung neuer Betriebsstrategien für kontinuierliche Lastwechselszenarien bedarf neben der Analyse mittels offline-Simulation auch der Implementierung einer Prozessregelung, welche schnellere und sichere Lastwechsel ermöglicht. Derzeit angewandte Regelungsstrategien von ASUs basieren vor allem auf linearer modellprädiktiver Regelung (LMPC), einer optimierungsbasierten Methode, die ein lineares, datengetriebenes Prozessmodell mit begrenztem Gültigkeitsbereich für die Berechnung der Regelaktion heranzieht. Bei signifikantem Lastwechsel weisen die Dynamiken von ASUs jedoch erhebliche Nichtlinearitäten auf, sodass die klassischen linearen Modelle ihre Gültigkeit verlieren. Die Energieflexibilitätsbefähigung von ASUs erfordert deshalb einen nichtlinearen modellprädiktiven Regler (NMPC), der ein nichtlineares Prozessmodell für die Prädiktion von Prozessverhalten und kritischen Prozessvariablen verwendet. Die Verwendung eines NMPC ermöglicht den Anlagenbetrieb dicht an betrieblichen Grenzen wie Reinheitsanforderungen und Temperaturdifferenzen, wodurch ein wirtschaftlicher und gleichzeitig sicherer energieflexibler Betrieb gewährleistet wird (Schäfer, 2018; Caspari, 2020b). Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung eines nichtlinearen Regelmodells auch die direkte Berücksichtigung der Produktionsplanung in der Regelungsebene, die sogenannte ökonomische nichtlineare modellprädiktive Regelung (eNMPC). Dieser hochintegrierte Regelungsansatz ermöglicht die Hebung weiterer Energieflexibilitätspotenziale gegenüber mehrschichtigen hierarchischen Automatisierungsarchitekturen (Schäfer, 2019a; Caspari, 2020b). In diversen Fallstudien wurden mittels eNMPC Kosteneinsparungen von teils über acht Prozent demonstriert (Caspari, 2020b).

Der Verwendung detaillierter nichtlinearer physikalischer Modelle in einer modellbasierten Regelung hat neben den Vorteilen der weitreichenden Modellgültigkeit und -genauigkeit den Nachteil des hohen Rechenaufwands in der assoziierten Echtzeitoptimierung. Eine NMPC für eine ASU mit physikalischem Regelmodell ist deshalb im Allgemeinen nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurden Modellreduktionsansätze entwickelt, die rechengünstige und gleichzeitig präzise Vorhersagen zum Prozessverhalten liefern können (Chen, 2010; Cao, 2016; Caspari, 2020a; Schäfer, 2019b). Hier sind insbesondere Ansätze mit physikalischem Hintergrund (Chen, 2010; Caspari, 2020a; Schulze, 2021) und datengetriebene Reduktionsansätze (Schäfer, 2019b; Lüthje, 2021) zu unterscheiden.

Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Umsetzung eines negativen und positiven angekündigten Lastwechsels in der Produktionsrate von gasförmigem Sauerstoff (GOX) mittels NMPC im geschlossenen Regelkreis. Die Abbildung stellt das Sollwert-Folgeverhalten und die Einhaltung der Qualitätsanforderungen von NMPC im geschlossenen Regelkreis dar. Verglichen werden eine NMPC mit reduziertem Modell – unter Verwendung nichtlinearer Wellentheorie und hybrider Kompartiment-Modellierung (Caspari, 2020a; Schäfer, 2019b) zur Reduktion – sowie eine Referenz-MPC mit physikalischer Modellierung.

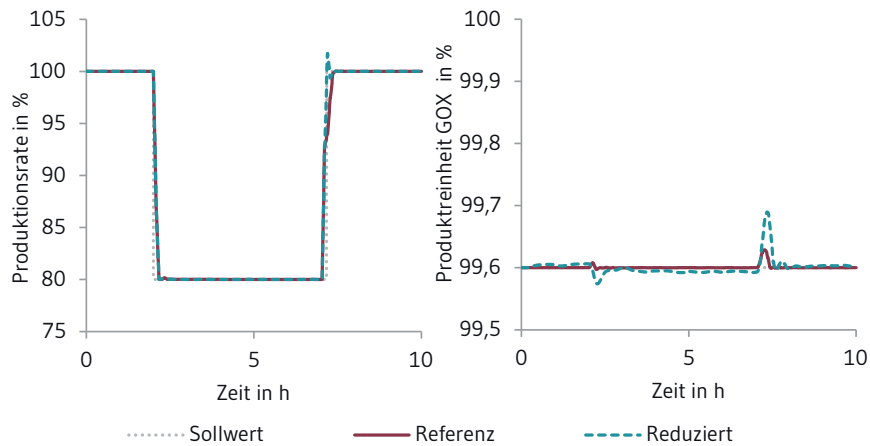


Abb. 13 Betrieb einer ASU ohne Argon-Produktion mittels NMPC im geschlossenen Regelkreis: Prozessantwort der GOX-Produktionsrate (l.); Prozessantwort der GOX-Produktqualität im zulässigen Reinheitsbereich des Produkts (r.)

In beiden Fällen realisiert die NMPC in dieser Fallstudie einen mit 2%/min zügigen Lastwechsel unter ständiger Einhaltung der Reinheitsanforderungen sowie anderer Betriebsbeschränkungen (nicht dargestellt). Im dargestellten Beispiel wäre auch ein an der 99,5%-GOX-Qualitätsgrenze dichter Betriebspunkt sichtbar möglich, ohne dass die Reinheitsbeschränkung aktiv würde. Durch die Verwendung reduzierter Modelle wurde die durchschnittliche Rechendauer der Optimierung bis zur Konvergenz von ca. 100 auf 2,5 Minuten reduziert. Hierdurch kann eine echtzeitfähige Regelung erreicht werden. Eine weitere Reduktion der Rechenzeit kann bei Bedarf durch Kombination von Modellreduktion und approximativen Optimierungsmethoden erreicht werden (Schäfer, 2019a; Vaupel, 2020).

Die Entwicklung einer industriell umsetzbaren NMPC erfordert neben der Echtzeitfähigkeit der Optimierung auch die Entwicklung und Implementierung geeigneter Datentransfer-Schnittstellen und Sicherheitsmechanismen, um den Regler an ein reales Prozessleitsystem anschließen zu können. In der Erprobung einer NMPC unter realistischen Bedingungen ist auch ein hochdetaillierter Digitaler Zwilling (analog zu *Abbildung 11*) hilfreich. Durch eine hochpräzise Anlagensimulation kann die echte Anlage auf der anderen Seite des Prozessleitsystems durch einen Digitalen Zwilling ersetzt und der Regler *in silico* entwickelt und getestet werden, ohne den tatsächlichen Anlagenbetrieb zu beeinflussen.

3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Lochner · Schulze

Um die Flexibilitätsbefähigung der On-site-Produktion (*Abbildung 2*) wirtschaftlich realisieren zu können, ist insbesondere die erfolgreiche Entwicklung von Kompressoren mit einem erweiterten Lastbereich sowie einer geeigneten Automatisierung ausschlaggebend. Die im Kopernikus-Projekt SynErgie entwickelten Regelorgane für die Kompressoren befähigen eine ASU zu ca. 25 Prozent zusätzlicher Energieflexibilität, während die Automatisierung den Anlagenbetrieb über den gesamten Lastbereich ermöglicht. Neben der technischen Befähigung zur Energieflexibilität mittels Robustifizierung, Effizienzverbesserung und Automatisierung erfordert die zeitweise Reduktion der Produktionsmenge gleichzeitig eine höhere Anlagenkapazität (die sogenannte »freie Produktionskapazität«) verglichen mit der Kapazität einer stationär betriebenen Anlage, damit eine temporäre Drosselung der Produktion kompensiert werden kann. Die Wirtschaftlichkeit der Energieflexibilitätsbefähigung der Bulk-Produktion (*Kapitel C.3 und C.3*) ergibt sich entsprechend aus der Summe an zusätzlichen Investitionskosten gegenüber der Volatilität der Strompreise. Für den Fall, dass der Energieflexibilitätsbefähigung keine regulatorischen Hemmnisse entgegenstehen, kann das wirtschaftliche Potenzial variabler Strompreise bei gegebenen Leistungsdaten (in MW) einer ASU mittels folgender Abschätzungen bestimmt werden:

- a) 40.000€ pro MW und Jahr ermittelt für den EEX-Markt 2018
- b) 100.000€ pro MW und Jahr für den wesentlich volatileren ERCOT-Markt in Texas, USA

Dem gegenüber stehen die zusätzlichen Investitionskosten in die Energieflexibilitätsbefähigung. Für viele ASU-Anlagentypen ist die Energieflexibilitätsbefähigung wirtschaftlich darstellbar (*Kapitel C.3*). Zudem liegen die Investitionskosten sehr weit unter den Kosten für Batteriespeicher äquivalenter Kapazität.

4 Literatur

CAO, Y., C.L.E SWARTZ, J. FLORES-CERRILLO, J. MA, 2016. Dynamic modeling and collocation-based model reduction of cryogenic air separation units. *AiCHE Journal*, 62, 5, S. 1602–1615.

CASPARI, A., C. OFFERMANN, A.-M. ECKER, M. POTTMANN, G. ZAPP, A. MHAMDI, A. FRANK, 2020. A wave propagation approach for reduced dynamic modeling of distillation columns: Optimization and control. *Journal of process control*, 91, S. 12–24.

CASPARI, A., C. TSAY, A. MHAMDI, M. BALEDA, A. MITSOS, 2020. The integration of scheduling and control: Top-down vs. bottom-up. *Journal of process control*, 91, S. 50–62.

CHEN, Z., M.A. HENSON, P. BELANGER, L. MEGAN, 2010. Nonlinear model predictive control of high purity distillation columns for cryogenic air separation. *IEEE transactions on control systems technology*, 18, 4, S. 811–821.

FRANK, R.G., C. WACKER und R. NIEHUIS, 2020. A new test facility for advanced testing of variable inlet guide vanes. *XXV Biannual Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery 2*, Nr. MTT2520A18.

FRANK, R.G., C. WACKER und R. NIEHUIS, 2021. Loss characterization of a conventional variable inlet guide vanes. *Int. J. Turbomach. Propuls. Power*, 6(30).

FRANK, R.G., C. WACKER und R. NIEHUIS, 2022. Loss characterization of advanced VIGV configurations with adjustable blade geometry. *J. Turbomach.*, 144(3).

FRITSCH, P., R. HOFFMANN, R. FLÜGGEN, P. HAIDER, S. REHFELDT, H. KLEIN, 2021. A Cryogenic Test Rig for Dynamically Operated Plate-Fin Heat Exchangers. *Chemie Ingenieur Technik*. 93(8), S. 1230–1237.

FRITSCH, P., R. HOFFMANN, R. FLÜGGEN, A. WOITKA, P. HAIDER, S. REHFELDT, H. KLEIN, 2021. Distributed Temperature and Strain Measurements at a Cryogenic Plate-Fin Heat Exchanger Test Rig. *Chemie Ingenieur Technik*. Verfügbar unter: DOI 10.1002/cite.202100070.

GELBERT, G., J.P. MOECK, C.O. PASCHEREIT, R. KING, 2012. Advanced algorithms for gradient estimation in one- and two-parameter extremum seeking controllers. *Journal of Process Control*, 22, 4, S. 700–709

GENTSCH, M. und R. KING, 2020. Real-time estimation of parameter maps. *IFAC-PapersOnLine*, 53, 2, S. 2391–2396.

HÄNDEL, D., R. NIEHUIS, J. KLAUSMANN, 2015. Aerodynamic Investigations of an Advanced VIGV Design of Adjustable Geometry for Very High Flow Turning. *Proceedings of ASME Turbo Expo*, no. GT2015-42166

HAIDER, P., P. FREKO, S. LOCHNER, T. REITER, S. REHFELDT, H. KLEIN, 2019. Design of a test rig for the simulation of startup procedures in main heat exchangers of air separation plants. *Chemical Engineering Research and Design* 147, S. 90–97.

HAIDER, P., P. FREKO, T. ACHER, S. REHFELDT, H. KLEIN, 2020. A transient three-dimensional model for thermo-fluid simulation of cryogenic plate-fin heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 180, S. 115791.

HAIDER, P., P. FREKO, T. ACHER, S. REHFELDT, H. KLEIN, 2021. Influence of inlet configuration and distributor geometry on the performance of cryogenic plate-fin heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 195, S. 117197.

KENDER, R., B. WUNDERLICH, I. THOMAS, A. PESCHEL, S. REHFELDT, H. KLEIN, 2019. Pressure-driven dynamic simulation of start up and shutdown procedures of distillation columns in air separation units. *Chemical Engineering Research and Design*, 147, S. 98–112.

KENDER, R., B. WUNDERLICH, F. RÖSSLER, F. SCHLIEBITZ, D. GOLUBEV, M. POTTMANN, I. THOMAS, A.-M. ECKER, S. REHFELDT, H. KLEIN, 2021. Posterbeitrag: Towards Flexible Operation of Air Separation Units – How can Digital Twins Contribute? *Siemens CKI Conference at TU Munich – Simulation and Digital Twins*, 2021.

KENDER, R., F. RÖSSLER, B. WUNDERLICH, I. THOMAS, M. POTTMANN, A.-M. ECKER et al., 2021. Entwicklung eines druckgetriebenen digitalen Zwillings einer Luftzerlegungsanlage mit Argonproduktion. *Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Fluidverfahrenstechnik und Wärme- und Stoffübertragung*.

KENDER, R.; F. KAUFMANN, F. RÖSSLER, B. WUNDERLICH, D. GOLUBEV, I. THOMAS et al., 2021: Development of a digital twin for a flexible air separation unit using a pressure-driven simulation approach. *Computers & Chemical Engineering*, 151, S. 107349.

KLEIN, H., P. FRITSCH, P. HAIDER, R. KENDER, F. RÖSSLER, S. REHFELDT et al., 2020. Flexibler Betrieb von Luftzerlegungsanlagen. *Chemie Ingenieur Technik*.

LANGE, A. UND R. KING, 2020. Discrete-Step, Quasi-Newton Extremum Seeking Control for Multivariable Real-Time Optimization. *IFAC-PapersOnLine* 53, 2, S. 1608–1613

LÜTHJE, J.T., J. SCHULZE, A. CASPARI, A. MHAMDI, A. MITSOS, P. SCHÄFER, 2021. Adaptive Learning of Hybrid Models for Nonlinear Model Predictive Control of Distillation Columns. *IFAC-PapersOnLine* 54 (3), S. 37–42.

SCHÄFER, P., L. BERING, A. CASPARI, A. MHAMDI, A. MITSOS, 2018. Nonlinear dynamic optimization for improved load-shifting agility of cryogenic air separation plants. *Computer Aided Chemical Engineering*, 44, S. 547–552.

SCHÄFER, P., A. CASPARI, K. KLEINHANS, A. MHAMDI, A. MITSOS, 2019. Reduced dynamic modeling approach for rectification columns based on compartmentalization and artificial neural networks. *AIChE Journal*, 65 (5).

SCHÄFER, P., A. CASPARI, A. MHAMDI, A. MITSOS, 2019. Economic nonlinear model predictive control using hybrid mechanistic data-driven models for optimal operation in real-time electricity markets: In-silico application to air separation processes. *Journal of process control*, 84, S. 171–181.

SCHULZE, J., A. CASPARI, C. OFFERMANN, A. MHAMDI, A. MITSOS, 2021. Nonlinear model predictive control of ultra-high-purity air separation units using transient wave propagation model. *Computers & Chemical Engineering*, 145, S. 107163.

SIMON, H., T. WALLMANN and T. MÖNK, 1987. Improvements in performance characteristics of single-stage and multistage centrifugal compressors by simultaneous adjustments of inlet guide vanes and diffuser vanes. *J. Turbomach.*, 109(41).

TAN, Y., W.H. MOASE, C. MANZIE, D. NEŠIĆ, I.M. MAREELS, 2010. Extremum seeking from 1922 to 2010. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*.

VAUPEL, Y., N. HAMACHER, A. CASPARI, A. MHAMDI, I.G. KEVREKIDIS, A. MITSOS, 2020. Accelerating nonlinear model predictive control through machine learning. *Journal of process control*, 92, S. 261–270.





C.4

Papierherstellung

Management Summary

Die Umsetzung von Energieflexibilität in der Papierindustrie wird stellvertretend an den drei Standorten Dörpen, Plattling und Schongau des finnischen Konzerns UPM-Kymmene Oyj betrachtet. Am Standort Dörpen (Nordland Papier GmbH) liegt der Fokus auf dem Streichprozess, der als nachgelagerter Prozess nach der Papiermaschine für eine Oberflächenveredelung des Papiers sorgt. Die Trocknungsanlage des Streichprozesses kann bivalent zwischen Strom und Gas betrieben werden. Durch eine ebenfalls bivalente Dampferzeugung kann dadurch am Standort Dörpen eine flexible Leistung von 35 MW bereitgestellt werden. Am Standort Plattling (Rhein Papier GmbH) weisen die drei Halbstofffertigungslinien zurzeit durch die Stilllegung einer Papiermaschine eine Überkapazität auf, die für die Bereitstellung von Energieflexibilität genutzt werden kann. Am Standort Schongau stellt die Abschaltung der Thermo-Mechanical-Pulp-Anlage (TMP-Anlage) aufgrund der hohen Leistung von 35 MW und der guten Übertragbarkeit eine Energieflexibilitätsmaßnahme mit vielversprechendem Potenzial dar. Für den Standort kann diese Energieflexibilität zu einer Kostensenkung von über 14 Prozent führen. Eine Hochrechnung auf die gesamte deutsche Papierindustrie hat ergeben, dass TMP-Anlagen zwischen 19.000 und 70.000 MWh/a potenzielle Energieflexibilität in Deutschland bereitstellen können, wenn die in Schongau entwickelte Energieflexibilitätsmaßnahme (die 2021 auf 7.455 MWh/a kam und in den Vorjahren ein theoretisches Potenzial von bis zu 28.368 MWh/a aufwies) auf alle TMP-Anlagen in Deutschland angewandt würden. Für die Umsetzung einiger dieser Energieflexibilitätsmaßnahmen sind technische Entwicklungen notwendig, beispielsweise eine geeignete IT-Infrastruktur, die ebenfalls in diesem Kapitel beschrieben wird.

Autoren

Bank, Lukas
lukas.bank@igcv.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Buhl, Hans Ulrich
hans-ulrich.buhl@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Carda, Stephan
stephan.carda@upm.com
UPM GmbH
Friedrich-Haindl-Straße 10, 86956 Schongau

Donnelly, Julia
julia.donnelly@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Friedl, Thomas
thomas.friedl@upm.com
UPM GmbH
Georg-Haindl-Straße 4, 86153 Augsburg

Halbrügge, Stephanie
stephanie.halbruegge@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Hofmann, Falk
falk.hofmann@upm.com
Nordland Papier GmbH
Nordlandallee 1, 26888 Dörpen

Kerpedzhiev, Georgi
georgi.kerpedzhiev@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Langer, Kilian
kilian.langer@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

Schöpf, Michael
michael.schoepf@uni.lu
SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
Trust, University of Luxembourg
Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxemburg

Schott, Paul
paul.schott@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Wittelsbacherring 10, 95444 Bayreuth

Wollensak, Michael
michael.wollensak@upm.com
Rhein Papier GmbH
Nicolausstraße 7, 94447 Plattling

1 Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Papierherstellung

Autoren: Bank · Buhl · Carda · Donnelly · Friedl · Halbrügge · Hofmann · Schöpf · Schott · Wollensak

1.1 Energieflexible Papierherstellung

Die Papierindustrie bietet sich durch ihren hohen Energieeintrag für die Bereitstellung von Energieflexibilitäten an. Für die Herstellung von Papier und Zellstoffen wurden 2020 allein in Deutschland 16,79 TWh Strom verbraucht. Dies entspricht einem Anteil von ca. 3 Prozent am Bruttostromverbrauch (Verband Deutscher Papierfabriken, 2021). Der Papierherstellungsprozess ist schematisch in *Abbildung 1* dargestellt und gliedert sich im Wesentlichen in die Halbstoffproduktion, die eigentliche Papiererzeugung mithilfe einer Papiermaschine und die Nachbehandlung der Oberfläche (Bachmann et al., 2021; Blechschmidt, 2013). Im Folgenden wird der Herstellungsprozess erläutert; darüber hinaus werden die aus Energieflexibilitätssicht relevantesten Produktionsprozesse kurz zusammengefasst.

Um Primärfaserstoffe aus Holz herzustellen, wird das entrindete Holz auf einem elektrisch angetriebenen Schleiferstein (Holzschliff-Verfahren) und unter Zugabe von Spritzwasser mechanisch zerkleinert. Beim Holzschliff wird zwischen Stein-Holzschliff (SGW, engl. Stone Groundwood) und Druckschliff (PGW, engl. Pressurized Groundwood) unterschieden. Im Unterschied zum SGW-Verfahren findet das PGW-Verfahren unter Überdruckbedingungen statt. Der spezifische Energiebedarf der Holzschliffverfahren liegt zwischen 1,2 und 2,2 MWh/t. Neben mechanischer Energie für die Schleifersteine wird thermische Energie benötigt, um das Spritzwasser auf eine Temperatur von etwa 70 °C beim SGW und über 100 °C beim PGW zu erwärmen (Blechschmidt, 2013). Alternativ kann das Holz in Hackschnitzel zerkleinert und wie Sägewerksabfälle in einem Refiner, z.B. in einer Thermo-Mechanical-Pulp-Anlage (TMP-Anlage) zwischen zwei gegenläufigen Mahlplatten zerkleinert werden (Wieking, 2016). Das TMP-Verfahren weist einen spezifischen Energiebedarf zwischen 2,2 und 2,6 MWh/t auf. Die Verfahren der Primär- und Sekundärfasererzeugung haben gemein, dass bei der Herstellung von Faserstoffen Dampf entsteht, der an der Papiermaschine für die Trocknung des Papiers genutzt werden kann (Blechschmidt, 2013).

Eine weitere Variante zur Herstellung von Primärfaserstoffen ist die Sulfat-Zellstofferzeugung. Dabei werden Hackschnitzel in Druckkesseln bei erhöhtem Druck (7 bis 10 bar) mit Chemikalien wie Natronlauge und Natriumsulfat bei 160 bis 180 °C gequollen und gekocht, um die faserigen von den nicht-faserigen Bestandteilen zu trennen. Um Sekundärfaserstoffe aus Altpapier herzustellen, findet eine chemische Zerkleinerung statt. Nach der Zerkleinerung erfolgt ein Auswaschen von in dem Altpapier gebundenen Stoffen (z. B. Druckfarbe) und ein Aufhellen der Fasern mithilfe von Wasserstoffperoxid (Halbrügge et al., 2019).

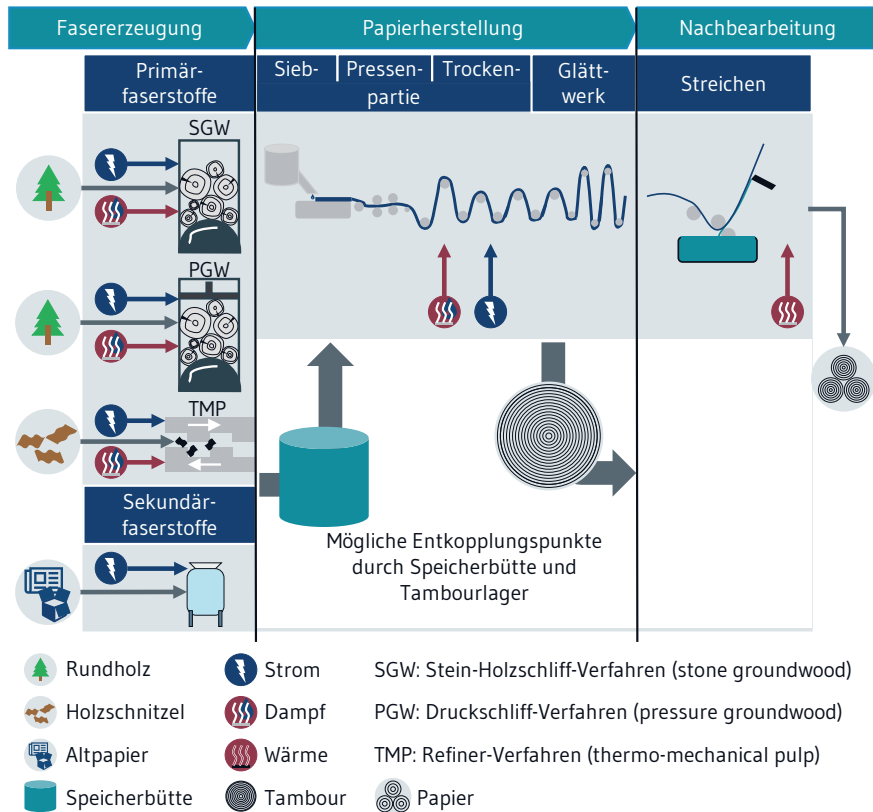


Abb. 1 Schematische Darstellung des Papierherstellungsprozesses

Es besteht die Möglichkeit, den Faserstoff in sogenannten Speicherbütten zu lagern, bevor im Anschluss die Zuführung der Stoffmischung zu den Papiermaschinen erfolgt. Düsen bringen die Faser-Wasser-Mischung zwischen zwei umlaufenden Sieben auf, sodass sich ein Papiervlies bildet. Die Pressenpartien der Papiermaschine sorgen für eine mechanische Entwässerung des Vlieses, bevor in der Trockenpartie mithilfe von mit Dampf beheizten Trockenzylindern der Endtrockengehalt des Papiers erreicht wird (Halbrügge et al., 2019).

Im Anschluss erfolgt eine Nachbearbeitung der Oberfläche und die Konfektion der Papierbahnen. Ein als Papierstrich bezeichnetes Verfahren sorgt beispielsweise für eine Reduktion der Oberflächenrauheit des Papiers (Blechschmidt, 2013).

Aufgrund der Komplexität und des damit verbundenen Aufwands beim Anfahren einer Papiermaschine werden diese möglichst kontinuierlich im Steady State betrieben. Papiermaschinen ermöglichen zumeist keine Teillastzustände und können zudem lediglich in besonderen Ausnahmefällen

abgeschaltet werden. Für die Betrachtung von Energieflexibilität eignen sich daher in einer Papierfabrik grundsätzlich die Prozesse vor und nach der eigentlichen Papierherstellung, wenn durch Entkopplungspunkte ein von der Papiermaschine teilweiser unabhängiger Betrieb möglich ist und entsprechende Überkapazitäten bestehen. Des Weiteren sind Prozesse für die Bereitstellung der nötigen Energie in Form von Dampf, Wärme und Strom für Energieflexibilitätsmaßnahmen geeignet.

1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieflexiblen Papierherstellung

Für die bei der Papierherstellung stattfindenden technischen Prozesse wird überwiegend Energie in Form von Strom und Dampf benötigt. Aufgrund des hohen Bedarfs an Energie werden Strom und Dampf zumindest teilweise innerhalb der Fabriken erzeugt (Verband Deutscher Papierfabriken, 2021). Durch die Vielzahl von Energieverbrauchern und Energiewandlern, die in Papierfabriken zum Einsatz kommen, besteht auch eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Energiefluss zu steuern. Folglich lassen sich mehrere Energieflexibilitätsmaßnahmen für die Papierindustrie nennen. Dabei ist die anwendungsspezifische Auswahl geeigneter Energieflexibilitätsmaßnahmen jeweils von den individuellen Gegebenheiten des Standorts abhängig.

- Eine Gruppe von Energieflexibilitätsmaßnahmen bezieht sich auf Veränderungen im Produktionsprogramm, die der **Unternehmensleitebene** zuzuordnen sind (VDI 5207). Darunter fällt die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen, z. B. das Abschalten und Durchblasen der TMP-Anlage, die durch eine Verschiebung des Produktionsstarts entsprechend eingeordnet werden kann. Diese Energieflexibilitätsmaßnahme muss einmal pro Woche durchgeführt werden. Sie ist aber zeitlich flexibel einsetzbar, wenn der Bedarf einer Lastreduktion besteht. Die Energieflexibilitätsmaßnahme wird dadurch befähigt, dass die nachfolgenden Prozesse durch einen Materialspeicher entkoppelt sind, wodurch die Abschaltung der TMP-Anlage bei entsprechender Planung nicht zu einem Materialmangel in der Papiermaschine führt.
- Auf der **Fertigungsleitebene** kann das Produktionsprogramm durch das zeitliche Verschieben von Aufträgen (Auftragsstart verschieben) inkl. des zeitlichen Vertauschens von Aufträgen (Auftragsreihenfolge ändern) oder der Zuordnung der Aufträge zu den Fertigungsressourcen (Ressourcenbelegung anpassen) energetisch beeinflusst werden (VDI 5207). Voraussetzung für diese Energieflexibilitätsmaßnahmen sind unterschiedliche Verbrauchseigenschaften der Ressourcen beziehungsweise Aufträge.
- Als kurzfristige Energieflexibilitätsmaßnahmen können auf der **Fertigungsebene** ein energiebivalenter Betrieb und das Anpassen von Prozessparametern genannt werden, die sich in erster Linie auf die Energiewandlungsanlagen im Werk beziehen (VDI 5207).

Eine Auswahl dieser Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Papierindustrie ist in *Tabelle 1* in deren konkreten Ausprägungen aufgelistet. Die Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen erfolgte derzeit an den drei deutschen UPM-Standorten Dörpen, Plattling und Schongau.

Tab. 1 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Papierherstellung

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Energiewandlung durch Kraftwerkeinsatzplanung ändern (Dörpen: KWK, E-Boiler; Plattling: KWK, Dampfkessel; Schongau: HKW, Dampfkessel) (Energiebezug anpassen)	Dörpen, Plattling, Schongau	Papierherstellung
Papiermaschinengeschwindigkeit anpassen (Prozessparameter anpassen)	Dörpen, Plattling, Schongau	Papierherstellung
Papiersorteneinplanung (Auftragsreihenfolge ändern)	Dörpen, Plattling, Schongau	Papierherstellung
Halbstoffspeicherung in Büetten (Materialspeicher)*	Plattling, Schongau	Papierherstellung
Energiebivalenter Betrieb der Streichmaschinen (Strom/Gas)	Dörpen	Papierherstellung
Papiermaschinenprogramme tauschen (Auftragsreihenfolge ändern)	Dörpen	Papierherstellung
Tambour-Speicherung Halbfertigware (Materialspeicher variabel gestalten)*	Dörpen	Papierherstellung
Schleiferbelegungsanpassung (Ressourcenbelegung anpassen)	Plattling	Papierherstellung
TMP-Anlage durchblasen/abschalten (Produktionsstart verschieben)	Schongau	Papierherstellung
Begrenzte Substitution Altpapier und Frischfaser (Ressourcenbelegung anpassen)	Schongau	Papierherstellung

* Diese Energieflexibilitätsmaßnahme ist nicht in der VDI-Richtlinie 5207 beschrieben.

1.3 Energieflexible Papierherstellung bei UPM

UPM ist ein weltweit agierender Papierhersteller, der mit seinen über 7.000 Mitarbeitenden jährlich 6,4 Mio. Tonnen grafische Papiere herstellt. Innerhalb dieses Kapitels werden die UPM-Standorte in Dörpen, Plattling und Schongau betrachtet, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

1.3.1 Standort Dörpen

Im UPM-Werk in Dörpen werden Fein- und Spezialpapiere mit einer jährlichen Ausbringung von 1,2 Millionen Tonnen auf vier Papiermaschinen gefertigt. Die dafür benötigten Zellstoffe werden von anderen UPM-Standorten angeliefert oder auf dem weltweiten Zellstoffmarkt gekauft. Die Veredelung des Papiers erfolgt am Standort auf zwei Streichmaschinen und fünf Superkalandern. Die Dampfversorgung des Standorts erfolgt über gasbetriebene Großraumwasserkessel. Alternativ steht auch ein Elektrodendampfkessel mit einer elektrischen Leistung von 30 MW zur Verfügung. Zudem wird

derzeit ein Gas- und Dampf-Kraftwerk mit 80 MW zur Dampf- und Stromerzeugung für den Standort errichtet. Energieflexibilität erzielt der Standort Dörpen vor allem durch die Bivalenznutzung des Elektrodendampfkessels, der in einem kontinuierlichen Lastbetrieb zwischen 0 und 30 MW genutzt werden kann. Zudem ist der bivalente Betrieb der Trocknungsanlagen (Gas und Strom) innerhalb der Streichmaschinen mit einer kumulierten Leistung von 5 MW eine der Energieflexibilitätsmaßnahmen, die am Standort im Fokus stehen.

1.3.2 Standort Plattling

Im UPM-Werk in Plattling werden Magazinpapiere auf zwei Papiermaschinen gefertigt. Um den für eine Gesamtpapiermenge von 625.000 Tonnen pro Jahr erforderlichen Holzschliff herstellen zu können, sind am Werk zudem sechs SGW-Anlagen (Stein-Holzschliff-Verfahren) und acht PGW-Anlagen (Druckschliff-Verfahren) im Betrieb. Für die Energieversorgung befindet sich ein Gas- und Dampf-Kraftwerk am Standort, welches den Dampfbedarf vollständig und den Strombedarf zu 80 Prozent deckt. Durch die Stilllegung einer Papiermaschine verfügt der Standort in Plattling über eine erhebliche Überkapazität bei der Halbstofffertigung und damit über ein hohes Energieflexibilitätspotenzial.

1.3.3 Standort Schongau

Das UPM-Werk in Schongau fertigt Zeitungsdruckpapiere, ungestrichene Magazinpapiere und maschinengeglättete Spezialpapiere. Der Standort verfügt über eine TMP-Anlage und eine Altpapieraufbereitung, um vor Ort neben Primär- auch Sekundärfasern herstellen zu können. Auf insgesamt drei Papiermaschinen kann eine jährliche Ausbringung von 740.000 Tonnen erreicht werden. Für die Versorgung des Papierherstellungsprozesses mit Strom und Dampf stehen im Werk Eigenerzeugungsanlagen zur Verfügung (drei Dampfkessel, zwei Heizkraftwerke und ein Blockheizkraftwerk). Das Werk beschäftigt sich bereits seit mehreren Jahren mit der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen. Eine beispielhafte Energieflexibilität bietet die TMP-Anlage mit einer Anschlussleistung von 35 MW.

1.4 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

Bei der Betrachtung von Energieflexibilität gilt es, das gesamte Potenzial für die jeweilige Branche zu betrachten. Die Betrachtung der unterschiedlichen Standorte innerhalb der UPM-Gruppe zeigt allerdings die Individualität von Papierwerken und wie herausfordernd solche Potenzialabschätzungen sein können. Die Individualität der Papierwerke liegt zum einen an der hohen Produktvarianz, die von Pappe für Verpackungen bis zu Spezialpapieren reicht. Zum anderen liegt es an den verfügbaren Produktionsressourcen und Erzeugungsanlagen, deren Zusammenspiel das Energieflexibilitätspotenzial der Standorte ganz wesentlich beeinflusst. Aus diesen Gründen wird im Folgenden nur eine beispielhafte Energieflexibilitätsmaßnahme am Standort Schongau betrachtet, bei dem am umfassendsten auf den Forschungsergebnissen aufgebaut werden kann.

Für die Betrachtung bietet sich die Abschaltung und das Durchblasen der TMP-Anlage an, da diese Energieflexibilitätsmaßnahme ein hohes Potenzial zur Lastreduktion bietet. Die Energieflexibilitätsmaßnahme bereits intensiv beforscht, und es besteht eine gute Datenverfügbarkeit für die Verwendung von TMP-Halbstoff in Deutschland. Im Folgenden wird daher eine Hochrechnung der TMP-bezogenen Energieflexibilität auf Basis der betrachteten Energieflexibilitätsmaßnahme in Schongau beschrieben mit dem Ziel, das Potenzial zur Bereitstellung von Energieflexibilität in der deutschen Papierindustrie zu ermitteln. Dafür wird die Annahme getroffen, dass die Bereitstellung der ermittelten Energieflexibilitätsmaßnahmen in Schongau auf alle anderen TMP-Anlagen übertragbar ist. Bei den betrachteten Energieflexibilitätsmaßnahmen handelt es sich um das Durchblasen und das Abschalten der TMP-Anlage.

1.4.1 Energieflexibilitätsmaßnahmen: Durchblasen und Abschalten der TMP-Anlage

Die TMP-Anlage produziert Papierhalbstoffe, die in einem Büttensilo gespeichert werden. Durch das Büttensilo ist der Betrieb der TMP-Anlage von dem Betrieb der Papiermaschine logistisch entkoppelt, sodass ein Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen bei einem konstanten Betrieb der Papiermaschinen möglich wird. Die TMP-Anlage wird wöchentlich ein- bis zweimal abgeschaltet und durchgeblasen. Das Durchblasen, ein Prozess von etwa 15 Minuten, hat eine Lastreduktion zur Folge. Des Weiteren wird die TMP-Anlage etwa 20-mal im Jahr für acht bis zehn Stunden abgeschaltet, um Arbeiten an der Anlage durchzuführen. Diese Abschaltungen können in gewissen Grenzen zeitlich frei verschoben werden (Lastverschiebung). Das Abschalten sowie das Durchblasen lassen sich im Vorhinein gut einplanen. Andererseits kann die Energieflexibilitätsmaßnahme auch kurzfristig eingesetzt werden, wenn dies nötig ist und ein entsprechender Füllstand des Büttensilos erreicht ist. Neben dem Büttensilo muss zudem der Prozessdampf, der als Nebenprodukt im TMP-Prozess entsteht, bei der Abschaltung der TMP-Anlagen durch andere Versorger kompensiert werden. Nur dann wird der Dampfbedarf, der beispielsweise an der Papiermaschine besteht, weiterhin gedeckt.

1.4.2 Vorgehen zur Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials der TMP-Anlage

Das reine Abschalten der TMP-Anlage ist abhängig von der Auslastung der Anlage und zum Zeitpunkt der Energieflexibilitätsnutzung vom Füllstand der Bütte. Es kann unter diesen Rahmenbedingungen im Prinzip beliebig häufig und für eine beliebige Dauer durchgeführt werden. Anhand von Marktanalysen sowie der zugrunde liegenden Produktionskapazität wird für das Abschalten eine Häufigkeit von 20 Einsätzen pro Jahr mit einer kumulierten Dauer von zehn Stunden für die Energieflexibilitätsbemessung zugrunde gelegt. Bei einer Leistung von 35 MW entspricht dies einer flexibilisierbaren Energie von 7.000 MWh/a für das Abschalten der TMP-Anlage und weiteren 455 MWh/a für das Durchblasen. Nachfolgend sollen diese Zahlen für die gesamte deutsche Papierindustrie ermittelt werden. Dies wird in *Tabelle 2* dargestellt. Es handelt sich um eine Abschätzung, die nur im engen Rahmen der gesetzten Annahmen gilt. Für genauere Hochrechnungen müssten weitere Unternehmen der Papierindustrie analysiert werden, um die Generalisierbarkeit der Annahmen zu untermauern.

Für die Hochrechnung der ermittelten Energieflexibilität in Schongau auf die gesamte Papierindustrie in Deutschland wird der Anteil der TMP-Anlage in Schongau am gesamten Strombedarf aller in Deutschland befindlichen TMP-Anlagen (unabhängig von der Betreiberfirma) ermittelt. Im Jahr 2007 wurde in Deutschland eine Gesamtmenge von 410.000 Tonnen TMP-Halbstoff produziert. Bei einem spezifischen Stromverbrauch von ca. 2.000 kWh/t kommt man auf einen durchschnittlichen Strombedarf von 820.000 MWh. Dies ist eine vereinfachende Annahme, da der spezifische Stromverbrauch in der Realität von Standort zu Standort unterschiedlich sein kann. Betrachtet man die Entwicklungen des Markts über die Jahre zwischen 2007 und 2020, kann man von einer Marktschrumpfung von jährlich etwa 5 Prozent ausgehen. Dadurch reduziert sich der Energiebedarf auf etwa 443.000 MWh für das Jahr 2020. Bei UPM in Schongau lag der Energiebedarf für die TMP-Anlage bei 174.000 MWh im Jahr 2020. Damit hatte die dortige Anlage einen Anteil von 39,3 Prozent am Gesamtenergiebedarf der derzeit in Deutschland installierten TMP-Anlagen.

Tab. 2 Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials in der deutschen Papierindustrie bei der Nutzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen »TMP-Anlage durchblasen« und »TMP-Anlage abschalten«

Berechnung		Flexibilitätpotenzial Schongau – TMP
Energiebedarf (2020)		174.000 MWh
Anteil am Energiebedarf		39,25 %
Abschalten der TMP-Anlage	Lastverzicht	35 MW
	Abrufdauer	10 h (14,5 h)
	Abrufhäufigkeit	20 p.a. (55 p.a.)
	Flexibilisierbare Energie	$35 \text{ MW} \cdot 10 \text{ h} \cdot 20 = 7.000 \text{ MWh/a}$ $(35 \text{ MW} \cdot 14,5 \text{ h} \cdot 55 = 28.000 \text{ MWh/a})$
Durchblasen der TMP-Anlage	Lastverschiebung	35 MW
	Abrufdauer	0,25 h
	Abrufhäufigkeit	52
	Flexibilisierbare Energie	$35 \text{ MW} \cdot 0,25 \text{ h} \cdot 52 = 455 \text{ MWh/a}$
Summe der flexibilisierbaren Energien		7.455 MWh/a (28.400 MWh/a)

Über den Anteil des Energiebedarfs der TMP-Anlage in Schongau am Gesamtenergiebedarf der TMP-Anlagen in Deutschland lassen sich die Energieflexibilitäten abschätzen. Die entsprechenden Berechnungen befinden sich in *Tabelle 2*. Die der Tabelle zu entnehmenden Zahlen zur flexibilisierbaren Energie stellen dabei das technische Potenzial am Standort Schongau dar. Es handelt sich um eine Momentaufnahme auf Basis der Rahmenbedingungen im Jahre 2021 (z. B. Auslastung, Strompreise oder Rohstoffpreise). Darüber hinaus wurden in vergangenen Hochrechnungen bereits Berechnungen auf Basis des theoretischen Potenzials und mit historischen Rahmenbedingungen aus den Jahren 2016 bis 2019 vorgenommen. Das damals ermittelte und auch in Zukunft wieder

denkbare theoretische Potenzial kann dabei aus den in *Tabelle 2* in Klammern gesetzten Werten bei der Berechnung zum Abschalten der TMP-Anlage entnommen werden. Die Werte des theoretischen Potenzials sind hier deutlich höher als das technische Potenzial, da einerseits früher andere Parameterkonstellationen gegeben waren und andererseits auch ungeplante Stillstände der TMP-Anlage als theoretisches Energieflexibilitätspotenzial im Sinne der Energieflexibilitätsmaßnahme »Abschalten der TMP-Anlage« gesehen werden können. Im Falle des Durchblasens der TMP-Anlage sind technisches und theoretisches Potenzial hingegen deckungsgleich, da die Energieflexibilitätsmaßnahme sehr gut planbar ist.

Aufgrund der dargestellten Berechnungen ergibt sich in der deutschen Papierindustrie ein technisches Potenzial für den Lastverzicht von 89,2 MW, das 20-mal im Jahr für jeweils zehn Stunden bereitgestellt werden kann. Dies entspricht einer Energie von 17.840 MWh/a. Für die Lastverschiebung ergibt sich ein technisches Potenzial von 89,2 MW bei einer Abrufhäufigkeit von 52-mal pro Jahr, einer Abrufdauer von 15 Minuten und einer resultierenden Energie von 1.160 MWh/a.

Um die Energieflexibilität der TMP-Anlage weiter zu erhöhen, wurde ein Konzept zur Kapazitätserweiterung in der Halbstoffherstellung entwickelt. Um die Speicherbütte nicht kostenintensiv erweitern zu müssen, ist geplant, eine vertikale Schneckenpresse zu nutzen, die den Halbstoff komprimiert. Dies führt dazu, dass bei gleichem Volumen der Speicherbütte eine höhere Masse eingelagert werden kann. Aufgrund der Möglichkeit, den Energiebedarf über die Einstellung des Kompressionsgrads zu beeinflussen, bietet auch die Schneckenpresse Potenzial für weitere Energieflexibilitätsmaßnahmen.

Sollte die entsprechende Energieflexibilitätsmaßnahme in der gesamten Branche umgesetzt werden, würde sich das Energieflexibilitätspotenzial der deutschen Papierindustrie weiter steigern lassen. Voraussetzung ist, dass die entsprechende Produktionskapazität in der Faserstoffherzeugung eine entsprechende Entkopplung ermöglicht. Setzt man die Flexibilisierungsmaßnahmen vom Standort Schongau an, die im folgenden Kapitel noch detaillierter beschrieben werden, könnte die Papierindustrie in Deutschland analog zur obigen Rechnung durch ein Abschalten und Durchblasen der TMP-Anlagen bis zu 24.000 MWh/a an flexibilisierbarer Energie bereitstellen.

2 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Buhl · Carda · Donnelly · Friedl · Hofmann · Kerpedzhiev · Schott · Wollensak

Wie im *Kapitel C4.1.3* beschrieben, ergeben sich für die jeweiligen UPM-Standorte unterschiedliche Rahmenbedingungen bei der Papierherstellung, die auch in unterschiedlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen resultieren. Nachfolgend wird daher zunächst für die Standorte Plattling und Schongau die technische Umsetzung der geplanten technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen mit dem größten Energieflexibilitätspotenzial betrachtet. Für den Standort Plattling wird die Ausarbeitung eines neuen, energieflexiblen Anlagenkonzepts unter Desinvestition thematisiert (»DesFlex«). Für den Standort Schongau wird der zukünftig flexible TMP-Anlagenbetrieb betrachtet (»FlexPulp«). Am Standort Dörpen erfolgt dagegen eine IT-bezogene Betrachtung, die zugleich alle drei Standorte

betrifft. Es wird die Energieflexibilitätsbefähigung der IT beleuchtet, die für alle drei Standorte (Dörpen, Plattling und Schongau) eine essenzielle Grundlage für die Steuerung bzw. Ermöglichung der Energieflexibilitätsmaßnahmen repräsentiert. Damit kommt der Entwicklung geeigneter IT-Lösungen ein besonders hoher Stellenwert zu.

2.1 Standort Plattling: Energieflexibilität unter Desinvestitionsbedingungen »DesFlex«

Die Halbstofffertigung bietet aus technischer Sicht bei der Papierproduktion das größte Energieflexibilitätspotenzial. Dies liegt darin begründet, dass die Papiermaschinen keine Teillastzustände ermöglichen und zudem lediglich in besonderen Ausnahmefällen abgeschaltet werden (*Kapitel C.4.1.1*). Am Standort Plattling wird in der Halbstofffertigung das Schleifverfahren eingesetzt (*Kapitel C.4.1.3*).

Aktuell verfügt der Standort über drei Halbstofffertigungslinien, die mit dem Schleifverfahren arbeiten. Angesichts der erfolgten Stilllegung von einer der drei Papiermaschinen weisen die Fertigungslinien allerdings Überkapazitäten in der Halbstoffherstellung auf. Es sollen in diesem Bereich weitere Stilllegungen, d. h. Desinvestitionen stattfinden. Das zukünftige Anlagenkonzept der Halbstofffertigung zielt dadurch auf ein unter diesen Bedingungen optimal nutzbares Energieflexibilitätsniveau ab (»DesFlex«). Derzeit können die vorhandenen Überkapazitäten aus Energieflexibilitätssicht aufgrund von zu geringen Speichermöglichkeiten (Büttensilos) und einer limitierten Verbindung der Halbstofffertigungslinien nicht vollständig genutzt werden. Im Fokus stehen am Standort Plattling somit die zukünftige Auslegung eines aus Energieflexibilitätssicht optimalen Anlagenkonzepts und die Halbstoffspeicherung in Bütten.

Eine zweite, zentrale Energieflexibilitätsmaßnahme des Standortes Plattling ist die Schleiferbelegungsplanung in der Halbstofffertigung (*Tabelle 1*). Für Auslegung und technische Umsetzung des zukünftigen Anlagenkonzepts erfolgt eine Bewertung der Neuverknüpfungsmöglichkeiten der Schleifer für einen energieflexiblen Anlagenbetrieb. Der Standort Plattling verfügt historisch bedingt über drei Stromnetzanschlüsse, von denen aktuell nur zwei vorrangig genutzt werden. Eine potenzielle Anbindung von Schleifern an den nicht genutzten Stromnetzanschluss kann im Rahmen der bestehenden Regulatorik zu einer weiteren Steigerung des (praktischen) Energieflexibilitätspotenzials führen und wird deshalb bei der Ausarbeitung des zukünftigen Anlagenkonzepts betrachtet. Insbesondere ist zu berücksichtigen, welche Anlagen an welchen Netzanschluss angebunden werden sollen, um sowohl im Volllastbetrieb als auch in der atypischen Netznutzung die Gesamtkosten insbesondere unter Berücksichtigung der Netzentgelte zu minimieren. Weiterhin ist eine Umrüstung der PGW-Schleifer auf die sogenannte Galileo-Technologie vorgesehen, die eine Erhöhung der Effizienz ermöglicht. In Verbindung mit den oben skizzierten Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Aufteilung der Netzanschlüsse und dem neuen Anlagenkonzept des Standorts können sich durch die Investition in eine neue Schleifertechnologie gleichzeitig Energieeffizienz und Energieflexibilität verbessern. Dadurch lassen sich die CO₂-Emissionen erheblich mindern. Energieeffizienz und Energieflexibilität müssen sich also nicht zwangsweise ausschließen, sondern weisen in diesem Fall eine synergetische Beziehung auf. Eine kombinierte Betrachtung der beiden Konzepte kann für die Wirtschaftlichkeit von energieintensiven Industrieprozessen künftig entscheidend werden (Ecofys, 2016).

2.2 Standort Schongau: Energieflexibilität in der Halbstofffertigung »FlexPulp«

Auch am Standort Schongau steht bei den identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen die Halbstofffertigung im Fokus. Dabei wird die stromintensive TMP-Anlage betrachtet, die für ca. 30 Prozent des am Standort benötigten Strombedarfs verantwortlich ist. Der Halbstoffproduktionsprozess ist an dieser Stelle verhältnismäßig gut steuerbar, da im Gegensatz zu den Papiermaschinen kein kontinuierlicher Betrieb gewährleistet werden muss. Der in der TMP-Anlage produzierte Halbstoff wird in Büttensilos als Zwischenprodukt gespeichert und speist den nachgelagerten Schritt der Papierherstellung, womit sich an dieser Stelle Pufferkapazitäten ergeben. Deshalb bieten die Büttensilos neben einer energieflexiblen Fahrweise der TMP-Anlage ein weiteres Energieflexibilitätspotenzial (Tabelle 1).

Im aktuellen Betrieb bietet die TMP-Anlage also zwei Energieflexibilitätsmaßnahmen, die eng miteinander zusammenhängen. Perspektivisch soll die Anlage auf eine weitaus flexiblere Fahrweise ausgerichtet werden (Kapitel C4.1.4). Neben den existierenden Energieflexibilitäten, die durch regelmäßige Pausen wie dem zuvor erläuterten Durchblasen bereits vorhanden sind, soll im Produktionsprozess weitere Energieflexibilität geschaffen werden. Hierzu erfolgt derzeit eine Neugestaltung der TMP-Anlage unter Berücksichtigung von möglichen Bottlenecks, die durch einen energieflexiblen Betrieb der Halbstoffproduktion entstehen können. Ziel ist es dabei, die Energieflexibilität des TMP-Betriebs bei gleichbleibender Qualität des Halbstoffs zu erhöhen. In ihrer jetzigen Auslegung besitzt die TMP-Anlage im Bereich des optimalen Betriebspunkts ein limitiertes Betriebsband. Es bedarf daher einer Befähigung der TMP-Anlage zu einem energieflexiblen Anlagenbetrieb, der stabile Teillastzustände ermöglicht. Erst dann lässt sich die Halbstoffproduktion zukünftig bedarfs- und strompreisgetrieben ansteuern. Dazu ist der Umbau einer Reihe von Komponenten innerhalb der TMP-Anlage erforderlich. Darüber hinaus sind auch Anschlüsse an die Produktionsinfrastruktur (z. B. Dampf oder Druckluft) für den flexiblen Betrieb auszulegen.

Ergänzend zur Flexibilisierung des Betriebs der TMP-Anlage kann auch die Halbstoffspeicherung weiterentwickelt werden. Dies ermöglicht längere Stoffspeicherzeiten und steigert somit das Energieflexibilitätspotenzial. Hierfür war am Standort Schongau zunächst der Bau eines weiteren Büttensilos zur Erhöhung der Speicherkapazitäten vorgesehen. Die Planung und die Untersuchungen wurden jedoch in Richtung einer innovativen Halbstoffspeicherlösung fortgeführt, welche die Installation einer kostenkompetitiven und zugleich innovativen Verdichtungsanlage (vertikale Schneckenpresse) umfasst. Hierbei wird eine Verdichtung des Halbstoffs erreicht, wodurch sich die mögliche Speicherzeit entsprechend verlängert. Die vertikale Schneckenpresse bewirkt eine erhöhte Stoffdichte in den Büttensilos, wodurch sich die eingetragene mechanische Energie nahezu verdoppelt. Im Rahmen einer Detailanalyse wurde herausgefunden, dass die Speicherkapazität der bestehenden Büttensilos von einer aktuell genutzten maximalen TMP-Speichermenge von einer auf mindestens 281 Tonnen erhöht werden kann. Dadurch wird der Bau eines weiteren Büttensilos obsolet. Unter der Annahme eines elektrischen Stromverbrauchs von 1,92 MWh pro Tonne Halbstoff erhöht sich die Speicherkapazität des Büttensilos damit von 288 MWh auf 540 MWh. Mittels der vertikalen Schneckenpresse kann somit die Speicherkapazität des bestehenden Büttensilos signifikant erhöht werden, und dies zu wesentlich geringeren spezifischen Investitionen, als sie bei einem weiteren Büttensilo notwendig wären. Dieses signifikante Energieflexibilitätspotenzial kann genutzt und vermarktet werden, um

auf die Situation am Strommarkt zu reagieren und einen Beitrag zur Stromnetzstabilisierung zu leisten. In Kombination mit der Optimierung des Betriebs der stromintensiven TMP-Anlage hinsichtlich Preissignalen der Flexibilitätsmärkte kann UPM die Stromkosten dank der Nutzung der neu gewonnenen Energieflexibilitätspotenziale deutlich senken. Der Lösungsansatz einer vertikalen Schneckenpresse ist zudem gut transferierbar und kann auf weitere Papierproduktionsstandorte übertragen werden.

2.3 Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Skalierbare energieflexibilitätsfördernde IT-Architektur »EnFlex«

Wie in *Kapitel C4.1.3* beschrieben, weisen die drei UPM-Standorte Dörpen, Plattling und Schongau hinsichtlich der Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieflexibilitätspotenziale unterschiedliche Rahmenbedingungen auf. Darüber hinaus hat jeder Standort unterschiedliche Rahmenbedingungen hinsichtlich der Stromversorgung (z. B. liegt Dörpen in einem großen Windparkgebiet) sowie der Dampferzeugung (Elektrodenkessel, Kraftwerk und Dampfkessel). Um die identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen bestmöglich zu nutzen (*Tabelle 1*), bedarf es des Aufbaus einer energieflexibilitätsunterstützenden und -fördernden IT-Architektur, die die strompreisgetriebene Steuerung von Halbstoffherstellung und Dampferzeugung ermöglicht.

Ziel ist die Implementierung einer modularen und wandlungsfähigen IT-Architektur, deren Kernelement eine zentrale Unternehmensplattform ist, welche die Erfassung und Verarbeitung aller energieflexibilitätsrelevanten Daten eines Papierwerkes ermöglicht. Diese Unternehmensplattform soll die Grundlage für eine werksübergreifende intelligente Steuerung der unternehmensinternen Anlagen bilden und zudem die Vermarktung von Energieflexibilität über Vermarktungsservices ermöglichen (*Kapitel B.3*).

Zur Konzeptionierung dieser auf weitere Unternehmen in der Papierindustrie übertragbaren IT-Architektur wurde zunächst der Standort Schongau betrachtet. Der Standort dient aufgrund seiner modernen IT-Landschaft als sehr gute Referenz für andere Standorte. Zunächst wurde eine Aufnahme des Ist-Prozesses durchgeführt, die eine Detailaufnahme der existierenden IT-Architektur und die Darstellung von Datenschnittstellen beinhaltete. In einem zweiten Schritt wurde die Konkretisierung der generischen Unternehmensplattform hinsichtlich des Bedarfs am vorgenommen. Dies umfasste die Festlegung des Datenmanagementkonzeptes in Form einer IT-Zielarchitektur sowie die Erhebung der Anforderungen an die Datenschnittstellen (hinsichtlich der Datenformate sowie Dateninhalte). Drei zentrale, interne Komponenten zur Anbindung an die Unternehmensplattform konnten identifiziert werden: die Produktionssteuerung, das Energiemanagementsystem und der Optimierungsservice. Die entstandene energieflexibilitätsfördernde Zielarchitektur (»EnFlex«-Zielarchitektur) ist in vereinfachter Form in *Abbildung 2* dargestellt. Vorgesehen ist, dass auf Produktionssteuerungsebene alle Informationen zunächst in einem Leitsystem gebündelt werden und über eine standardisierte WEB API eine Anbindung an die Unternehmensplattform erfolgt. Mittels einer REST API ist zudem

die Anbindung des Energiemanagementsystems an die Unternehmensplattform vorgesehen. Der Optimierungsservice zur intelligenten Steuerung der Anlagen soll ebenfalls über eine REST API angebunden werden.

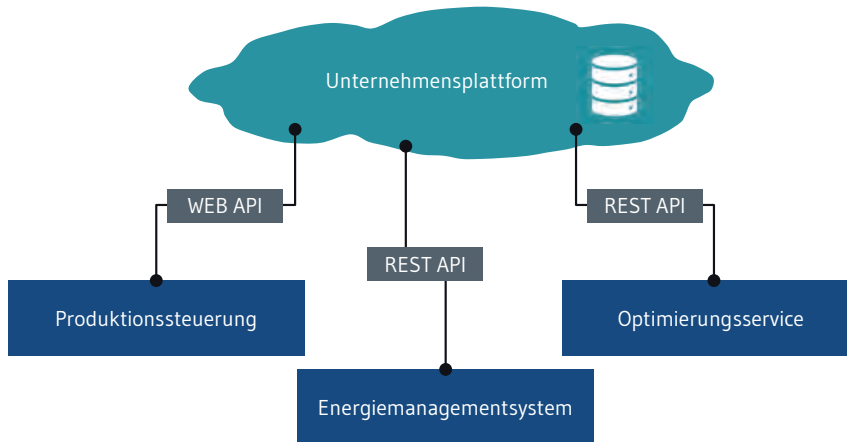


Abb. 2 Die »EnFlex«-Zielarchitektur

3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Buhl · Carda · Donnelly · Friedl · Hofmann · Langer · Kerpedzhiev · Schott · Wollensak

Die Erhöhung der Energieflexibilität an den drei UPM-Standorten ist ein wichtiger Baustein, der als Absicherung gegen zukünftige Strompreisschwankungen dienen und die langfristige Wirtschaftlichkeit der Standorte sicherstellen kann. Dies wird mittels technischer und IT-zentrierter Energieflexibilitätsmaßnahmen erreicht, die in *Kapitel C4.2* für die drei UPM-Standorte Dörpen, Plattling und Schongau vorgestellt wurden. Im Folgenden werden die wirtschaftlichen Perspektiven der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen des »DesFlex«-Vorhabens am Standort Plattling und der »FlexPulp«-Energieflexibilitätsmaßnahmen am Standort Schongau im Detail beleuchtet. Daraufhin wird auf die wirtschaftlichen Perspektiven der IT-seitigen Energieflexibilitätsmaßnahmen der Einführung der »EnFlex«-Zielarchitektur an den drei Standorten eingegangen.

3.1 Standort Plattling: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen

Am UPM-Standort Plattling wird die Halbstoffherstellung zur Bereitstellung von Energieflexibilität genutzt. Es wird ein wirtschaftlich optimales Anlagenkonzept unter Desinvestitionsbedingungen untersucht, da die aktuell vorhandene Überkapazität bei der Halbstoffherstellung zu hohen Fixkosten führt, die aktuell nicht durch entsprechende Einsparungen durch Energieflexibilität am Strommarkt gedeckt werden können. Somit wird durch das Desinvestitionskonzept die mittel- und langfristige Reduktion der Fixkosten im Werk angestrebt.

Im Rahmen des Desinvestitionskonzept soll insbesondere die Möglichkeit der gleichzeitigen Steigerung von Energieeffizienz und Energieflexibilität in Betracht gezogen werden. Dies ist vor dem Hintergrund interessant, dass Energieeffizienz und Energieflexibilität in der Regel konkurrierende Zielgrößen darstellen. Die Steigerung der Energieeffizienz kann durch die bereits beschriebene Aufrüstung der bestehenden PGW-Schleifer auf die Galileo-Technologie erreicht werden, sodass der spezifische Energiebedarf der Halbstoffherstellung gesenkt werden kann. Hinsichtlich der Energieflexibilität ist eine Neuverknüpfung von Schleiferanlagen an die existierenden Netzanschlüsse zu konzipieren, die verhindert, dass durch die Erhöhung der nutzbaren Energieflexibilität die Netzentgelte stark ansteigen würden und somit die Energieflexibilitätsmaßnahme unwirtschaftlich wäre. Somit können an zwei der drei Netzanschlüsse die Benutzungsstundenzahl von mindestens 7.000 Stunden durch den konstanten Betrieb von Schleifern individuelle Netzentgelte und zugleich ein Grundniveau der Halbstoffproduktion erreicht werden. Gleichzeitig können die restlichen Schleifer an den anderen Netzanschluss angebunden und flexibel als Reaktion auf volatile Strompreise gefahren werden, ohne bei den beiden anderen Anschlüssen höhere Netzentgelte zu riskieren. Da der Standort mit diesem thematischen Schwerpunkt erst im Projektverlauf eingegliedert wurde, liegen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch keine validierten Ergebnisse vor. Deshalb können an dieser Stelle noch keine Größenordnungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit genannt werden. Im Rahmen eines entwickelten Demonstrators konnte jedoch bereits gezeigt werden, dass durch die Neuverknüpfung der Schleiferanlagen rund 1,5 Mio. Euro und 15.500 Tonnen CO₂ jährlich eingespart werden könnten (SynErgie, 2021).

3.2 Standort Schongau: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen

Wie bereits dargelegt, umfassen die am Standort Schongau geplanten technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Erhöhung der Energieflexibilität die Befähigung der TMP-Anlage und die Erweiterung der effektiven Speicherkapazität durch eine vertikale Schneckenpresse (*Kapitel C.4.2*). Diese Energieflexibilitätsmaßnahmen, die substanzielle Investitionen erfordern, ermöglichen eine energieflexible, an Flexibilitätsmärkten orientierte Fahrweise der Halbstofffertigungsanlagen. Die Halbstoffproduktion mittels einer leistungsfähigeren TPM-Anlage und erweiterter Speichermöglichkeiten kann dann erhöht werden, wenn z. B. der Strompreis vergleichsweise niedrig ist. In Zeiten, in

denen der Strompreis hingegen hoch ist, kann die Halbstoffherstellung eingestellt und der gespeicherte Halbstoff zur Papierproduktion genutzt werden. Dadurch können der Strombezug zu Strompreispitzen vermieden und die Strombeschaffungskosten gesenkt werden.

Um weitere Kostensenkungspotenziale zu erschließen, soll die in *Kapitel C4.1.4* beschriebene Erhöhung der Energieflexibilität des TMP-Prozesses zukünftig dazu genutzt werden, die Strombezugskosten auf dem Day-Ahead-Markt weiter zu senken und perspektivisch auch eine Anpassung im Intraday-Handel zu ermöglichen. Denn die Wirtschaftlichkeit der beschriebenen strompreisorientierten Fahrweise der TMP-Anlage ist von der Strompreisverteilung abhängig: Je größer dessen Volatilität ist, desto größer ist das wirtschaftliche Potenzial des Ausbaus von Nachfrageflexibilität. Demnach können Investitionen in Energieflexibilität als eine vielversprechende Versicherung gegen künftige Strompreisschwankungen angesehen werden. Gegenwärtige Stromkosteneinsparungen durch Energieflexibilität konnten für die Papierindustrie bereits mittels simulativer Untersuchungen unter anderem von Abele et al. (2020) und Helin et al. (2017) gezeigt werden.

Der sogenannte »Versicherungseffekt« für die Zukunft kann am Beispiel des UPM-Standorts Schongau verdeutlicht werden und wird anhand von *Abbildung 3* ersichtlich. Der Auswertung in *Abbildung 3* liegen die historischen Day-Ahead-Strompreise für das Jahr 2019 sowie eine beispielhafte Verteilung der Day-Ahead-Strompreise für das Jahr 2030 basierend auf der Annahme des Klimaschutzszenarios des Öko-Instituts zugrunde. Das Jahr 2019 dient hierbei als Referenz, da die Strompreisentwicklungen in den Jahren 2020 und 2021 aufgrund der COVID-19 Pandemie nicht repräsentativ sind. In den beiden Jahren waren entweder sehr hohe bzw. sehr niedrige Durchschnittspreise zu verzeichnen. Insbesondere das zweite Halbjahr 2021 war geprägt von rasant steigenden Strompreisen sowie neuen Spitzenpreiswerten. Für das Jahr 2030 weisen die Day-Ahead-Strompreise, getrieben durch den kontinuierlichen Ausbau erneuerbarer Energien und steigenden CO₂- und Erdgaspreisen, sowohl einen höheren Durchschnittspreis als auch eine größere Volatilität als im Jahr 2019 auf. Um die Wirtschaftlichkeit der beschriebenen technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen am Standort Schongau zu untersuchen, wurden der Betrieb der TMP- und Altpapieraufbereitungs-Anlagen sowie des Büttensilos untersucht. Durch die Optimierung der Halbstoffproduktionsmenge sowie des Altpapieranteils werden bei hohen Strompreisen hohe Verbräuche vermieden und damit Einsparungen erzielt. Dabei wurden für das Jahr 2019 die aktuell bestehende und für das Jahr 2030 die künftig auszubauenden Energieflexibilitäten der TMP-Anlage und des Büttensilos berücksichtigt. So zeigt sich, dass UPM angesichts der Strompreisverteilung im Referenzjahr 2019 durch Nutzung der bestehenden Energieflexibilität eine effektive Senkung der durchschnittlichen Strombezugskosten um etwa zwei Prozent gegenüber einer inflexiblen Fahrweise hätte erzielen können. Basierend auf der Day-Ahead-Strompreisverteilung für das Jahr 2030 und unter der Annahme des erweiterten Energieflexibilitätspotenzials (d.h. Befähigung der TMP-Anlage und Einbindung einer vertikalen Schneckenpresse) am Standort Schongau ergibt sich für 2030 mit der flexiblen Fahrweise potenzielle Einsparung von mehr als 14 Prozent gegenüber einer inflexiblen Fahrweise.

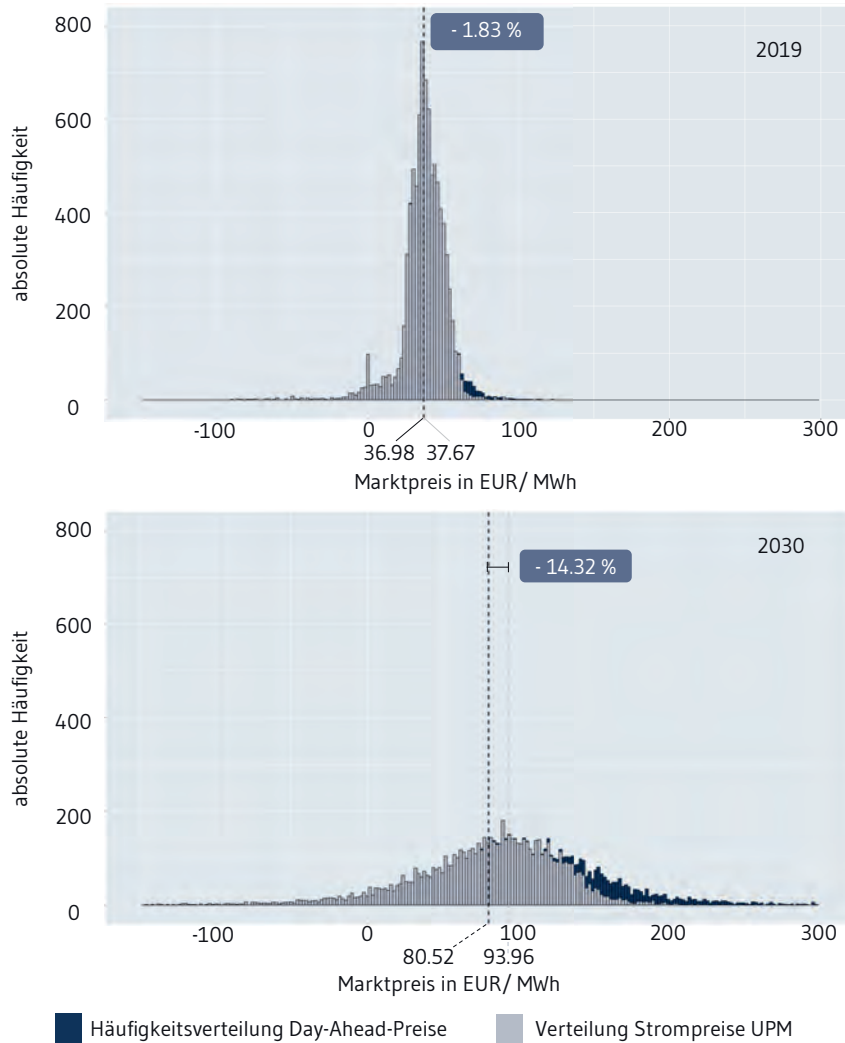


Abb. 3 Versicherungseffekt durch Energieflexibilität in den Jahren 2019 und 2030

Die Wirtschaftlichkeit der für den Ausbau der Energieflexibilitätspotenziale notwendigen Investition am Standort Schongau hängt somit von den erwarteten Einsparungen durch eine strompreisgeführte Betriebsweise ab. Neben der Reaktion auf volatile Strompreise kann die Steigerung der Energieflexibilität zusätzlich genutzt werden, um Energieflexibilitäten als Systemdienstleistungen (d.h. Primärleistung, Sekundärleistung, Minutenreserve und abschaltbare Lasten) anzubieten und somit zur Netzstabilisierung beizutragen, ohne dass die Papierproduktion beeinträchtigt wird. So wird am

Standort Schongau die bereits verfügbare Energieflexibilität des energieintensiven TMP-Prozesses (Kapitel C4.1.4) seit mehreren Jahren in Form von Sekundärleistung und Minutenreserve an den Regenergiemärkten angeboten. Allerdings weist im Fall von UPM die Nutzung variabler Strompreise bis zum Jahr 2020 höhere Einsparpotenziale auf als die Vermarktung der Energieflexibilitäten über die Regenergiemärkte.

3.3 Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Wirtschaftlichkeit der IT-seitigen Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die Steuerung der Energieflexibilität an den Standorten Dörpen, Plattling und Schongau wird erst durch die Etablierung einer entsprechenden energieflexibilitätsfördernden IT-Infrastruktur ermöglicht. Diese umfasst insbesondere die Einführung von Optimierungsservices zur intelligenten, strompreisorientierten Steuerung der Produktionsanlagen. Dabei muss zum einen die bestehende IT-Landschaft an den Standorten hinsichtlich der Sicherstellung von Basisanforderungen (z. B. Performanz) evaluiert werden. Zum anderen gilt es, angesichts der spezifischen Rahmenbedingungen an den Standorten passende Anbieter von Optimierungslösungen auszuwählen, die mit der langfristigen Unternehmens- und IT-Strategie sowohl am jeweiligen Standort als auch werksübergreifend kompatibel sind. Die mit den entsprechenden Projekten einhergehenden Investitionen sind (neben jenen für die technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen) bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse mit zu berücksichtigen. Grund dafür ist, dass durch die IT-technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen keine direkten Einsparungen resultieren, sie allerdings eine notwendige Grundlage sind, um eine strompreisorientierte Betriebsweise der Produktionsanlagen zu ermöglichen. In Zukunft werden die bisher erzielten Erkenntnisse zu den IT-Energieflexibilitätsmaßnahmen am Standort Schongau anhand der Betrachtung der Standorte Plattling und Dörpen erweitert und validiert, sodass eine breitere Evaluierung der entsprechenden Wirtschaftlichkeitsperspektiven möglich wird.

4 Literatur

ABELE A., UNTERBERGER E., FRIEDL T., CARDA, S., ROTH S., HOHMANN A. und REINHART G., 2020. *Simulation-based evaluation of an energy oriented production planning system*, Procedia CIRP, 88.

BLECHSCHMIDT, J., 2013. *Taschenbuch der Papiertechnik*. 2. aktualisierte Auflage. München: Hanser.

BREITKOPF, A., 2021. *Statistiken zur Papier- und Zellstoffindustrie* [online] [Zugriff am: 06.09.2021]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/themen/2995/statistiken-zur-papier-und-zellstoffindustrie/>

ECOFYS 2016. *Flex-Efficiency. Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern. Studie im Auftrag von Agora Energiewende*. [online] [Zugriff am: 01.03.2022]. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/Flex-Efficiency/Agora_Flex-Efficiency_WEB.pdf

HALBRÜGGE, S., SCHÖPF, M., SCHOTT, P. und CARDA, S., 2019. *Papierindustrie*. In: Sauer, Alexander, Abele, Eberhard, Buhl, Hans Ulrich. (Eds.), 2019. *Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

HELIN, K., KÄKSI, A., ZAKERI, B., LAHDELMA, R. und SYRI, S., 2017. *Economic potential of industrial demand side management in pulp and paper industry*. *Energy*, 141, 1681–1694.

PROJEKT SYNERGIE, 2021. *Netzentgelte-Demonstrator* [online] [Zugriff am: 13.12.2021]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/netzentgelte-demonstrator>

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

VDI, Hg., 2021. *Energieflexibel in die Zukunft – Wie Fabriken zum Gelingen der Energiewende beitragen können*. Unter Mitarbeit von A. Bachmann, L. Bank, C. Bark, D. Bauer, B. Blöchl et al. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. Verfügbar unter: doi:10.24406/FIT-N-638765

VERBAND DEUTSCHER PAPIERFABRIKEN, 2021. *Verband Deutscher Papierfabriken: VDP-Leistungsbericht PAPIER 2021* [online] [Zugriff am: 06.09.2021]. Verfügbar unter: <https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik>.

WIEKING A., 2016. *Flexibel dank gefüllter Silos. Demand Side Management in der Praxis* [online]. [Zugriff am: 06.09.2021]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Magazin-Ausgaben/9065_DENA_dena_magazin_Nummer_7_5-16.pdf.





C.5

Aluminiumelektrolyse

Management Summary

Energieflexibilität trägt bei volatiler Energieerzeugung zu einer Stabilisierung des Stromnetzes bei. Bei der Aluminiumelektrolyse führt Energieflexibilität zu einer erheblichen Minderung der Prozesseffizienz. Die Elektrolysezellen können bis zu einem gewissen Grad flexibel belastet werden, müssen jedoch für einen sicheren Betrieb immer in einem beherrschbaren Zustand bleiben. Zur Beibehaltung der Betriebssicherheit wird bei der Trimet Aluminium SE in Essen ein Digitaler Zwilling entwickelt, der innerhalb des flexiblen Betriebs verschiedene Vorhersagen in die Prozesssteuerung integriert.

Der Digitale Zwilling ist eine digitale Repräsentanz einer realen Elektrolysezelle. Bei Trimet ist der Digitale Zwilling so aufgebaut, dass die Steuerungskonzepte die aktuellen internen Prozessinformationen effizienter nutzen können. Damit werden Fehlentscheidungen vermieden und Öfen außerhalb des Sollzustands rechtzeitig erkannt. In *Kapitel C7* werden die einzelnen Elemente des Digitalen Zwillings erläutert.

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
f_L	Lorentzkraft	N
J	Stromdichte	$\frac{A}{m^2}$
B	Magnetfeld	T
A	Querschnittsfläche des Anodenbaums	mm^2
ρ_0	Spezifischer elektrischer Widerstand des Anodenbaums bei 20 °C	$\frac{\Omega \rho_0}{m}$
K	Temperaturkoeffizient des spezifischen elektrischen Widerstands 1. Ordnung des Anodenbaums	$\frac{1}{K}$
T_0	Raumtemperatur	$^{\circ}C$
l	Abstand der Bolzen auf dem Anodenbaum	mm
t	Zeit	s

Autoren

Gesell, Hendrik
gesell@uni-wuppertal.de
Lehrstuhl Strömungsmechanik (LSM), Bergische
Universität Wuppertal
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Hauck, Heribert
heribert.hauck@trimet.de
TRIMET Aluminium SE
Aluminiumallee 1, 45356 Essen

Kremser, Ron
rkremser@uni-wuppertal.de
Lehrstuhl für Automatisierungstechnik / Informatik (LfA),
Bergische Universität Wuppertal
Rainer-Gruenter-Straße 21, 42119 Wuppertal

Mulder, Albert
albert.mulder@trimet.de
TRIMET Aluminium SE
Aluminiumallee 1, 45356 Essen

Olbricht, Valentin
olbricht@uni-wuppertal.de
Lehrstuhl Strömungsmechanik (LSM), Bergische
Universität Wuppertal
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

1 Grundlagen und Potenziale der flexiblen Aluminiumelektrolyse

Autor: Gesell

Zur Herstellung von Aluminium aus Aluminiumoxid (Al_2O_3 , Tonerde) wird das 1886 entwickelte Hall-Héroult Verfahren der Schmelzflusselektrolyse industriell betrieben. Dieser Prozess ist äußerst energieintensiv. In Europa wurden im Jahr 2020 109 TWh elektrischer Energie für die Produktion von Primäraluminium aufgewendet. Dabei wurden pro Tonne produziertem Aluminium 15,5 MWh Strom benötigt (1). Im Hall-Héroult Verfahren kommt als Elektrolyt eine Kryolithschmelze zum Einsatz, deren Schmelzpunkt von ca. 954 °C die Betriebstemperatur bestimmt, die im Regelfall 5 bis 10 °C darüber liegt. Aufgrund der hochaggressiven Eigenschaften des Elektrolyten müssen die inneren Wände der Zellen permanent durch eine Kruste aus gefrorenem Elektrolyt geschützt werden. Das erfordert die durchgängige Erhaltung eines sensiblen thermischen Gleichgewichts. Das produzierte Aluminium fällt in flüssiger Form an und sammelt sich am Boden der Elektrolysezellen.

Bei der Herstellung von Aluminium im industriellen Maßstab sind Stromstärken zwischen 100 und 600 kA gebräuchlich. Um wirtschaftlich rentable Produktionsmengen zu erreichen, werden in der Regel 100 bis 400 Zellen pro System elektrisch in Reihe geschaltet. Infolge der hohen Stromstärken treten bei der Elektrolyse starke Magnetfelder auf, die sich durch die folgenden beiden magneto-hydrodynamischen (MHD) Effekte auf den Prozess auswirken:

- Die Oberfläche des flüssigen Aluminiums in den Elektrolysezellen wölbt sich infolge auftretender Lorentzkräfte auf. Dadurch wird die Interpolarabstand zwischen Anode und Kathode innerhalb einer Zelle lokal beeinflusst. Die Aufwölbung kann sich zeitlich und räumlich verändern, was wiederum Einfluss auf das Betriebsverhalten der Zellen hat.
- Bedingt durch die innerhalb der flüssigen Medien (Elektrolyt und Aluminium) auftretenden Kräfte werden in den Zellen Geschwindigkeitsfelder induziert. Diese sind in gewissem Maße von Vorteil für die Verteilung des in regelmäßigen Abständen hinzugefügten Aluminiumoxids. Treten jedoch zu hohe Geschwindigkeiten auf, kann dies unter anderem zu erhöhtem Verschleiß der Zellen führen.

Diese Effekte müssen neben der Regulierung des thermischen Gleichgewichts bei der flexiblen Ausrichtung des Prozesses berücksichtigt werden, was im Folgenden näher beschrieben wird.

1.1 Energieflexible Aluminiumelektrolyse

Die Aluminiumelektrolyse verfügt über eine hohe Anschlussleistung im elektrischen Netz. Als Energieflexibilitätpotenzial, das am Standort Essen bei der Trimet Aluminium SE zunächst in einer Halle umgesetzt wird, sind ± 25 Prozent der Nominalleistung vorgesehen. Um dieses zu ermöglichen, ist eine technologische Aufrüstung der Elektrolysezellen zur Kompensation der vorangehend beschriebenen, verstärkt auftretenden MHD-Effekte sowie zur thermischen Kompensation notwendig. Die Umsetzung der Magnetfeldkompensation wird von Sauer et al. (2019) beschrieben. Zusätzlich wurde eine thermische Kompensation implementiert. In den folgend beschriebenen Arbeiten steht

nun die Prozesssteuerung im Fokus. Da es keine vergleichbaren Vorhaben gibt, wird innerhalb des Projekts eine Steuerung entwickelt, die zur Vorhersage von Prozesszuständen einen Digitalen Zwilling der Elektrolysezellen beinhaltet. Dieser wird im *Kapitel 2* näher beschrieben. Die umsetzbare Energieflexibilitätsmaßnahme besteht darin, die Prozessstromstärke zu modulieren.

1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Aluminiumelektrolyse

Gemäß der Einordnung von Energieflexibilitätsmaßnahmen aus der VDI-Richtlinie 5207 (2) wird in diesem Kapitel die Aluminiumelektrolyse entsprechenden Energieflexibilitätsmaßnahmen zugeordnet. Die Elektrolysezellen sind in Reihe geschaltet und werden mit dem gleichen Strom (Hallenstromstärke) betrieben. Die dem Netz entnommene elektrische Leistung ist annähernd proportional zur Hallenstromstärke, da die Spannung der Zellen auch bei Änderungen der Stromstärke in etwa gleichbleibend ist. Das vorliegende Energieflexibilitätspotenzial besteht darin, die Hallenstromstärke im Bereich von ± 25 Prozent zu variieren. Die Energieflexibilitätsmaßnahme ist der Fertigungsebene zugeordnet und fällt unter den Oberbegriff »Prozessparameter anpassen«. Bei einer Variation des Hallenstroms liegt darüber hinaus ein »inhärenter thermischer Energiespeicher« vor, da die Elektrolysezellen auf Betriebstemperatur gehalten werden müssen. Die gespeicherte thermische Energie kann als solche nicht abgerufen werden, ist jedoch notwendig, um die Funktionstüchtigkeit der Zellen aufrechtzuerhalten. Wird das zulässige Temperaturfenster der Elektrolysezellen verlassen, kommt es entweder zu einem Einfrieren oder zu einem Auslaufen der Zellen infolge einer geschmolzenen Randkruste. Beides bedeutet, dass die Zellen nicht mehr funktionstüchtig sind.

Die Energieflexibilitätsmaßnahmen sind in *Tabelle 1* dargestellt.

Tab. 1 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Aluminiumelektrolyse

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Prozessparameter anpassen bei Elektrolyse	Trimet	Aluminiumproduktion
Inhärent Energie speichern (thermisch) bei Elektrolyse	Trimet	Aluminiumproduktion

1.3 Energieflexible Aluminiumelektrolyse bei der TRIMET Aluminium SE

Die Trimet Aluminium SE ist ein mittelständisches Familienunternehmen, dessen Kerngeschäft die Entwicklung, die Produktion und das Recycling von Aluminiumprodukten ist. Das Unternehmen ist an acht Produktionsstandorten aktiv und beschäftigt rund 2.400 Mitarbeiter. Ein großes Geschäftsfeld ist die Produktion von Primäraluminium mithilfe der sehr energieintensiven Aluminiumelektrolyse. Um den Prozess an die wachsenden Anforderungen bezüglich Flexibilität und Effizienz anzupassen, wird er im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte kontinuierlich weiterentwickelt.

1.4 Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials

Mit zunehmendem genutzten Energieflexibilitätpotenzial steigt das Risiko, den Prozess zu destabilisieren und Schaden an den Zellen anzurichten. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, wird bei Trimet daher zunächst ein Flexibilitätpotenzial von $\pm 22,5$ MW pro Produktionslinie am Standort umgesetzt. Durch eine simulationsbasierte Optimierung der existierenden Regelmodelle mithilfe des Digitalen Zwillings bzw. das Kontrollsystem „9-Box“ (Kontrollsystem, das die thermische Bilanz und die chemischen Zugabestoffe eines Ofens regelt) könnten zukünftig die Grenzen erweitert werden. Bei der Angabe der Flexibilitätperspektive in *Tabelle 2* ist zu berücksichtigen, dass die Angabe von 253 MW sich auf einen kurzen Zeitraum von wenigen Stunden bezieht. Je länger der Zeitraum einer abgerufenen Energieflexibilität wird, desto niedriger muss die Abweichung von der Nominalleistung sein, um dauerhaft Prozessstabilität gewährleisten zu können.

Tab. 2 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Aluminiumelektrolyse

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätperspektive Deutschland inkl. Abruflaufzeit und Abruflhäufigkeit
Prozessparameter anpassen bei Elektrolyse	253 MW
Inhärent Energie speichern (thermisch) bei Elektrolyse	

2 Technische Umsetzung des Digitalen Zwillings

Autoren: Olbricht · Kremser · Mulder · Gesell

Um die Öfen unter flexiblem Energieeintrag beherrschen zu können, müssen im Wesentlichen zwei Aspekte berücksichtigt werden. Zuerst muss der Einfluss des Magnetfelds auf den Prozess ermittelt werden. Insbesondere die anodenseitige Stromverteilung nach Lastwechseln muss bekannt sein. Andererseits ist es wichtig, die Effekte der Flexibilisierung auf die Temperatur des Ofens zu kennen. Beide Aspekte werden mithilfe physikalischer Modelle untersucht, die als Grundlage zur Entwicklung des Digitalen Zwillings dienen. Zur Vorhersage der Badtemperatur werden Verfahren der Künstlichen Intelligenz genutzt.

2.1 Prozessvorhersagemodell

Im Folgenden wird die Vorhersage der Badtemperatur von Aluminium-Elektrolysezellen in Abhängigkeit von zukünftigen Strommodulationen beschrieben. Die Temperatur ist eine Schlüsselvariable für einen stabilen Betrieb der Zelle. Die Umsetzung der Vorhersage erfolgt in MATLAB/Simulink. Um präzise Vorhersagen erzeugen zu können, wird das Modell mittels eines Optimierungsalgorithmus individuell an die spezifischen temporären Eigenschaften der einzelnen Zelle angepasst. Eine Vor-

hersage der Badtemperatur der Zelle wird mit einer Abweichung von $< 3,2^{\circ}\text{C}$ (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers) erreicht. Durch das Modell werden die Prozessstabilität und die maximal mögliche Strommodulation ermittelt.

2.1.1 Zellspezifisches Vorhersagemodell

Das vorliegende Simulink-Modell kann den Hall-Héroult-Prozess allgemein darstellen und ist für die Zellen der Trimet Essen (EPT-14) spezifiziert. Das Modell arbeitet mit Mess-, Schätz- und Erfahrungswerten (3).

Die Vorhersagen werden in Gegenwarts- und Zukunftsvorhersage unterteilt. Eine Gegenwartsvorhersage gibt den Gesamtzustand der Zelle zum Zeitpunkt t_0 an. Sie enthält Informationen über Variablen, die selten oder gar nicht gemessen werden, beispielsweise die Badtemperatur. Für die Berechnungen wird der reale Stromverlauf genutzt. Die Zeiträume der Gegenwarts- und Zukunftsvorhersagen sind in *Abbildung 1* dargestellt. Für Zukunftsvorhersagen zum Zeitpunkt t_2 kann das Signal des Stroms beliebig modelliert werden.

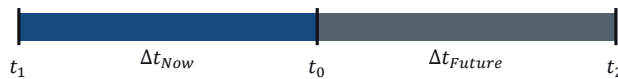


Abb. 1 Zeitleiste der Perioden für Gegenwarts- und Zukunftsvorhersagen

Zur Durchführung einer Vorhersagesimulation werden alle Ein- und Ausgangssignale sowie Startwerte definiert. Anschließend müssen diejenigen Werte angepasst werden, die spezifisch für die untersuchte Zelle sind (Geometrie, Betriebsbedingungen). Im dritten Schritt erfolgt die Anpassung der Schätz- und Erfahrungswerte. Aufgrund der hohen Anzahl von Parametern werden sechs Optimierungsparameter eingeführt, die jeweils einen Teil der eigentlichen Parameter zusammenfassen, um die Simulationsdauer zu minimieren. Zwei davon passen die Wärmebilanz, vier weitere die Materialumwandlungsprozesse an. Sie sind als Multiplikatoren mit Startwert 1 so implementiert, dass sie die Manipulation der Schätz- und Erfahrungswerte ersetzen.

Die Vereinfachung der zu optimierenden Parameter wird durch die Vorhersage einer zufällig gewählten Zelle in einem zufällig gewählten Zeitraum validiert. Um den jeweiligen Zellzustand abzubilden, werden zum einen alle Simulationsparameter und zum anderen nur die sechs Optimierungsparameter angepasst. Die Abweichungen der Verläufe der vereinfachten Variante sind geringfügig und akzeptabel, während die Optimierungszeit dadurch von 516 auf 20 Minuten sinkt.

Nachdem das Modell an die aktuelle Zelle angepasst ist, wird die Simulation durchgeführt. Das Zeitverhalten der Ausgänge enthält alle notwendigen Informationen über den Zustand der Zelle. Es ist möglich, verschiedene Simulationen der Zelle mit unterschiedlichen Stromprofilen durchzuführen. So kann ermittelt werden, wie stark die Strommodulation sein kann, ohne den stabilen Prozess zu gefährden.

Die Anpassung an das reale individuelle Verhalten erfolgt durch den Algorithmus »lsqnonlin« in Matlab. Die Zielfunktion ist die Minimierung der Summe der quadratischen Fehler zwischen den realen Verläufen und den drei Ausgangssignalen des Modells. Die Optimierung wird für jedes Ausgangssignal einzeln durchgeführt. Nach Unterschreitung einer definierten Fehlergröße oder maximal zehn Iterationen pro Signal wird angenommen, dass das Modell dem Verhalten der realen Zelle im untersuchten Zeitraum entspricht. Anschließende Simulationen mit erweiterter Simulationszeit (z. B. zwei Tage) ergeben das zukünftige individuelle Verhalten der Zelle.

Zur Bewertung der erreichten Ergebnisse wird die Abweichung der Badtemperatur zwischen Simulation und Experiment mit vorhandenen Messdaten untersucht. Die Qualität der aktuellen und der zukünftigen Vorhersage können separat bewertet werden. Die Bewertung erfolgt mit einer aktuellen und einer zukünftigen Vorhersage von 18 verschiedenen Zellen in einem Zeitraum, in dem lediglich AlF_3 und Al_2O_3 hinzugefügt werden und keine weiteren Phänomene oder manuellen Eingriffe auftreten. Der Zeitraum vor sowie nach t_0 wird jeweils auf einen Tag festgelegt.

Abbildung 2 zeigt die Simulationsergebnisse im Vergleich zum realen Verhalten beispielhaft für eine von 20 Zellen.

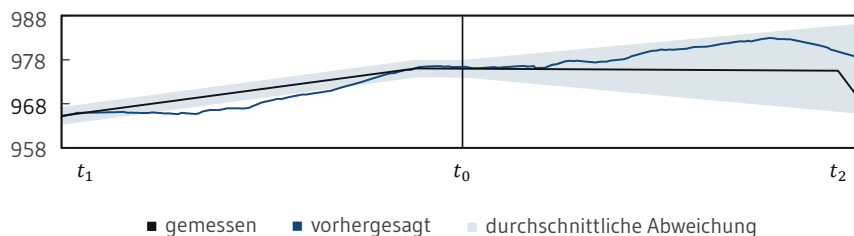


Abb. 2 Vergleich der gemessenen und vorhergesagten Badtemperatur (in °C)

Die Abweichungen der Zellzustände in der Periode Δt_{Future} sind erwartungsgemäß größer als in Δt_{Now} , da die Simulation des zukünftigen Zellverhaltens ausschließlich durch das Modell bestimmt wird. Die Diskrepanz der Vorhersage nimmt mit zunehmender Simulationszeit zu. Um dies zu verdeutlichen, zeigt die Fläche um die gemessene Badtemperatur in *Abbildung 2* die durchschnittliche Abweichung.

Die Abweichungen im Zeitraum Δt_{Now} sind akzeptabel. Die Vorhersagegenauigkeit des Modells in der Periode Δt_{Future} ist ebenfalls als gut zu bewerten. Simulationen zeigen, dass qualitativ erkannt werden kann, ob die Zelle zu einem hohen, einem niedrigen oder einem konstanten Temperaturniveau neigt. Es wird angenommen, dass die Abweichung klein genug ist, um die anderen Zellzustände nicht wesentlich zu beeinflussen (4). Außerdem ist zu beachten, dass die experimentellen Daten nur eine Temperaturmessung pro Tag zeigen. Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages, wie sie in der Simulation zu sehen sind, werden nicht aufgelöst.

Die Integration des Vorhersagemodells in den industriellen Prozess bringt eine Reihe von Vorteilen. Zeitaufwendige Messungen von Zustandsgrößen können eingespart werden. Die Durchführung einer Sofortvorhersage kann alle Zellzustände simulieren, die für die Prozesssteuerung wichtig sind. Außerdem können Aussagen über mögliche Probleme durch Schwankungen in der Stromversorgung getroffen werden bzw. darüber, ob ein stabiler Betrieb bei einer definierten Schwankung gewährleistet werden kann. Da das Modell noch nicht in Echtzeit genutzt werden kann, ist eine weitere Automatisierung des Modells und eine Verkürzung der Simulationszeit notwendig. Vorhersagen können auch jetzt schon erzeugt und eingesetzt werden.

2.1.2 Datengetriebenes Vorhersagemodell unter Nutzung Künstlicher Intelligenz

Das zellspezifische Vorhersagemodell basiert auf physikalischen Gleichungen; es wurde ein zweiter Ansatz verfolgt, in dem mittels Methoden der Künstlichen Intelligenz ein datengetriebenes Modell für die Badtemperaturvorhersage entwickelt wurde. Hierbei werden Deep-Learning- und Machine-Learning-Regressionsmodelle aus dem überwachten Lernen genutzt. Die Vorgehensweise ist in *Abbildung 3* dargestellt. Es wird jeweils zum Zeitpunkt einer Badtemperaturmessung eine Vorhersage erzeugt, wobei die Informationen aus der Vergangenheit bis zum Messzeitpunkt genutzt werden. Dies ermöglicht unmittelbar nach einer Badtemperaturmessung eine Plausibilitätsprüfung und eine genauere Untersuchung im Rahmen der Diagnostik, sofern sich der Ofen in einem Stöorzustand befindet. Da eine Badtemperaturmessung ungefähr alle 24 Stunden erfolgt, ergibt sich für das Modell dieselbe Vorhersagefrequenz.

Aus früheren Arbeiten (Grabowski et al., 2018) existiert bereits ein Machine-Learning-Modell (Random Forest) für eine Gegenwartsvorhersage; sie hat einen Vorhersagefehler von 9,9 °C (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers). Die Methodik der Zeitreihenaggregation dieses Modells wird aufgegriffen, und es werden noch weitere Prozessvariablen berücksichtigt. Diese sind in *Tabelle 5* aufgelistet und bestehen maßgeblich aus Tageswerten und aggregierten Werten aus den 5-min-Daten.

Bei der Aggregation der Werte liegt der Fokus auf den Lage- und Streumaßen des eingehenden Wärmestroms. Dieser berechnet sich unter anderem aus dem Hallenstrom und der individuellen Ofenspannung. Ferner werden statistische Momente der Unruhe, der von der Regelung berechneten Set Points und der Tonerdefütterung einbezogen. Die Anzahl von Events wird ebenso berücksichtigt wie die Metall- und Badhöhe.

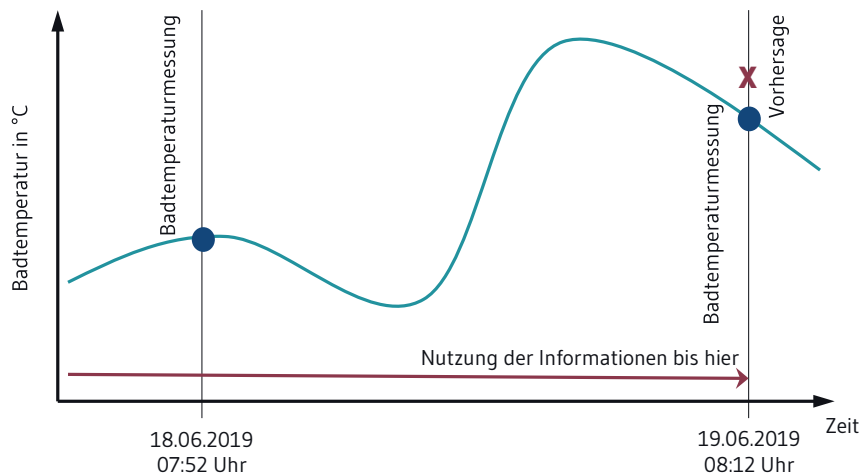


Abb. 3 Gegenwartsvorhersage der Badtemperatur

Tab. 5 Berücksichtigte Prozessvariablen

#	Feature	#	Feature
1	Ofennummer	14	Mittelwert Operating Set Point
2	Ofenalter	15	Mittelwert Process Set Point
3	vorherige Badtemperatur	16	Mittelwert Tonerdefütterung
4	Mittelwert eingehender Wärmestrom	17	Standardabweichung Tonerdefütterung
5	Standardabweichung eingehender Wärmestrom	18	Anzahl Anodeneffekte
6	Median eingehender Wärmestrom	19	Anzahl Anodenwechsel
7	Schiefe eingehender Wärmestrom	20	Anzahl Metallsaugen
8	Wölbung eingehender Wärmestrom	21	Metallhöhe
9	Minimum eingehender Wärmestrom	22	Badhöhe
10	Maximum eingehender Wärmestrom	23	hinzugefügte Masse Soda
11	Mittelwert Unruhe	24	Energieeintrag Anodeneffekt
12	Median Unruhe	25	gefütterte Masse Tonerde
13	Standardabweichung Unruhe		

Als Datensatz wurden Öfen mit Tonerde verwendet, die mit Fluor angereichert wurde. Sie stellen bei der Trimet in Essen die größte Gruppe dar. Dies sind die Öfen in den Hallen 1 und 2. Die Öfen in Halle 3 wurden ausgeschlossen, da dort zum Teil Frischtonerdeöfen in Betrieb sind und die Badtemperatur in der Regel nur jeden zweiten Tag gemessen wird; das Modell benötigt als Feature aber die vorherige, also gestrige Badtemperatur. Als Trainingszeitraum dienen die Monate 01/2017 bis 10/2017 und als Testzeitraum 04/2019 bis 10/2019. Als Modelltypen werden aus dem Bereich des Deep Learnings ein tiefes neuronales Netz und aus dem Bereich des Machine Learnings ein Random-Forest- und ein Gradient-Boosting-Modell gewählt.

Die umgesetzte Lösung zeigt eine deutliche Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von 53 Prozent im Vergleich zu früheren Arbeiten (Grabowski et al., 2018), wobei hier zu erwähnen gilt, dass es sich um unterschiedliche Testdatensätze handelt. *Tabelle 6* zeigt den Vergleich des Vorhersagefehlers für verschiedene Modelle bei Anwendung auf den Testdatensatz. Das Vorwärtsfüllen der Badtemperatur dient als Vergleichsmaßstab, den es zu verbessern gilt. Es zeigt sich, dass das Gradient-Boosting-Modell die beste Performance hinsichtlich des geringsten Vorhersagefehlers bietet.

Tab. 6 Vorhersagefehler des Testdatensatzes

Modell	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
Vorwärtsfüllen der zuletzt gemessenen Badtemperatur	6,6 °C
Tiefes Neuronales Netz	6,4 °C
Random Forest	6,0 °C
Gradient Boosting	5,7 °C

Bei Einsatz des Gradient-Boosting-Modells im Produktivbetrieb ergibt sich für den Zeitraum vom 22.06.2021 bis 04.09.2021 für alle Öfen aus den Hallen 1 und 2 ein Fehler von 6,3 °C. Dieser größere Fehler ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass ein Ofen einen unüblichen Temperaturanstieg über mehrere Tage auf bis zu 1.079 °C aufwies und die Vorhersage mit einem Maximalwert von 1.000 °C die Badtemperatur deutlich unterschätzt hat. Ferner sind in den Messungen unplausible Werte vorhanden, die zu einer Erhöhung des Fehlers geführt haben. *Abbildung 4* zeigt beispielhaft die Badtemperaturmessung und die Vorhersage von Ofen 1056 im zeitlichen Verlauf. Der Fehler dieses Ofens lag für diesen Zeitraum bei ebenfalls 6,3 °C. Zu erkennen ist, dass sich der Vorhersagefehler ab dem 14.07.2021 (1) für mehrere Tage erhöht, dann im Folgenden aber wieder verringert. In *Abbildung 5* ist die Vorhersage für Ofen 1080 dargestellt. Am 15.07.2021 (1) ist ein Ausreißer mit deutlich über 1.000 °C in der Messung zu beobachten, der bei Betrachtung der nachfolgenden Messwerte als nicht plausibel zu werten ist. Die Vorhersage hingegen weist für diesen Zeitstempel einen plausiblen Wert auf. Insgesamt liegt der Vorhersagefehler dieses Ofens bei 8,4 °C.

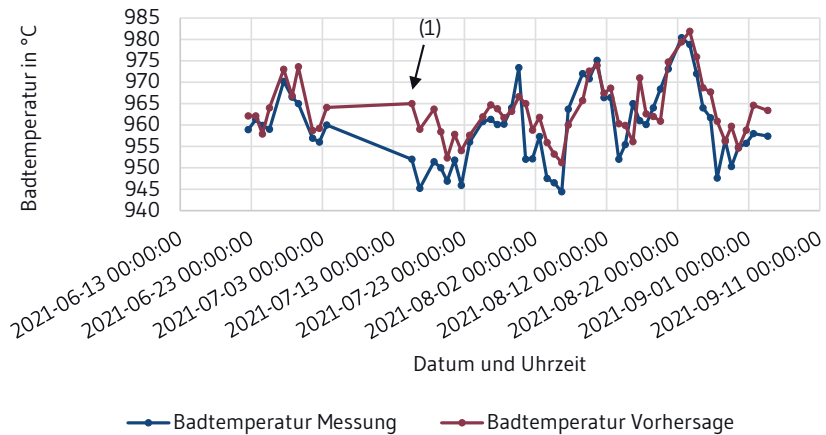


Abb. 4 Gegenwartsvorhersage der Badtemperatur von Ofen 1056 mit Gradient Boosting

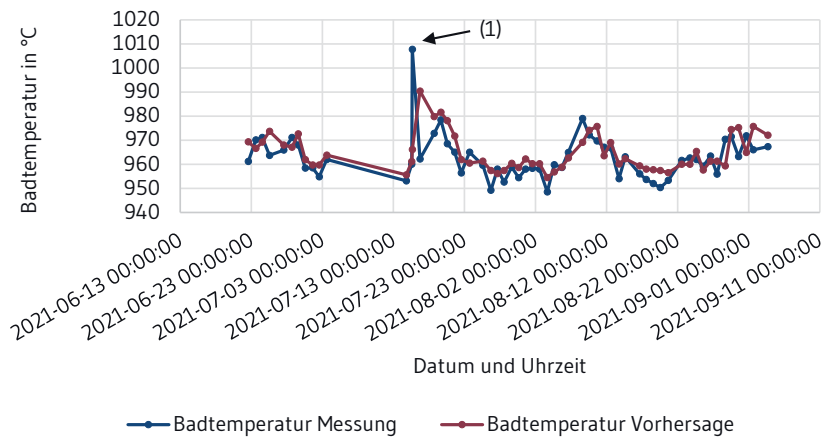


Abb. 5 Gegenwartsvorhersage der Badtemperatur von Ofen 1080 mit Gradient Boosting

Der Einsatz des Modells im Produktivbetrieb hat gezeigt, dass eine Gegenwartsvorhersage möglich ist. Zukünftig soll durch eine Erweiterung der Kommunikationsinfrastruktur der Messgeräte die Abweichung zwischen realer Messung und Vorhersage dargestellt werden. Bei einer hohen Abweichung können direkt vor Ort am Ofen Messungen wiederholt oder möglicherweise diagnostische Fragestellungen beantwortet werden.

2.2 Magnetohydrodynamik-Modell

Wie in *Kapitel 1* beschrieben, treten durch hohe Ströme während des Elektrolysebetriebs Magnetfelder auf, die wiederum mit dem Strom interagieren. In den flüssigen Medien in der Zelle treten dadurch sogenannte Lorentzkräfte (f_L) auf. Diese folgen der Berechnungsvorschrift

$$f_L = J \times B. \quad (1)$$

Sie werden durch die Stromdichte (J) und das Magnetfeld (B) hervorgerufen und treten senkrecht zum Magnetfeld und zur Richtung des Stroms auf. Sie sind die Ursache für die innerhalb der flüssigen Medien auftretenden Geschwindigkeitsfelder und die Aufwölbung der Trennfläche zwischen Elektrolyt und Aluminium. Zur Simulation dieser MHD-Effekte wurde innerhalb der CFD-Software OpenFOAM ein Modell entwickelt und implementiert (5). (CFD steht für Computational Fluid Dynamics, MHD für Magnetohydrodynamik.) Dieses Modell wurde um Magnetisierungseffekte des Zellgehäuses erweitert, um mithilfe des vollständig erfassten Magnetfelds die Auswirkungen auf den Elektrolysebetrieb exakter bestimmen zu können.

Eine Magnetisierung von ferromagnetischen Werkstoffen tritt auf, wenn entsprechende Bauteile einem Magnetfeld ausgesetzt sind. Diese führt dazu, dass die Bauteile selbst magnetische Eigenschaften annehmen. Im Fall der Aluminiumelektrolyse wird das Zellgehäuse (auch Wanne genannt) während des Prozesses magnetisiert, und die dabei erzeugten magnetischen Eigenschaften beeinflussen die Magnetfelder und damit wiederum den Prozess (Dupuis et al., 2005). Um diese Effekte zu erfassen, wird das bestehende Simulationsmodell für MHD-Strömungen entsprechend erweitert und das magnetische Vektorpotenzial mithilfe eines geeigneten Volumenintegrals bestimmt. Das Modell wird nach einer erfolgreichen Validierung auf die in der industriellen Praxis eingesetzten Elektrolysezellen angewendet. Der Aufbau der Zellen besteht aus verschiedenen Komponenten, die im Modell berücksichtigt werden.

Abbildung 6 zeigt das volumetrisch aufgelöste Modell einer Zelle. Darin enthalten sind 15 verschiedene Regionen, die unterschiedliche Komponenten der Zelle darstellen.

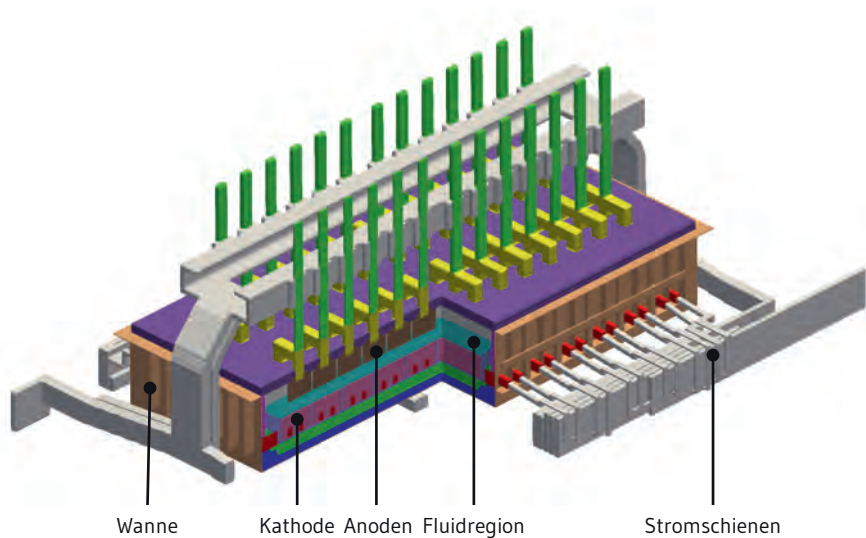


Abb. 6 Dreidimensionale Geometrie des CFD-Modells einer Elektrolysezelle mit Benennung ausgewählter Komponenten.

Entscheidend für den Betrieb der Elektrolysezellen ist das Verhalten innerhalb der Fluidregion, in der vorwiegend die flüssigen Medien Aluminium und Elektrolyt vorliegen. Hier tritt die Aufwölbung der Trennfläche auf, die von der Betriebsstromstärke abhängig ist. Je höher die Stromstärke ist, desto stärker wölbt sich die Trennfläche auf. Exemplarisch ist in *Abbildung 7* die Aufwölbung der Trennfläche bei der nominalen Stromstärke von 165 kA dargestellt. Zu erkennen ist, dass diese sich in der Mitte nach oben wölbt. An den kurzen Enden der Zelle ist die Trennfläche nach unten geneigt. Entsprechend dieser Aufwölbung der Trennfläche stellt sich parallel nach oben versetzt an der Unterseite der Anoden die gleiche Kontur ein. Dies geschieht, da der Kohlenstoff der Anoden prozessbedingt kontinuierlich verbraucht wird. Der Abstand zwischen der Unterseite der Anode und der Trennfläche wird Anode Cathode Distance (ACD) genannt und liegt in der Regel bei ca. 4,5 Zentimetern.

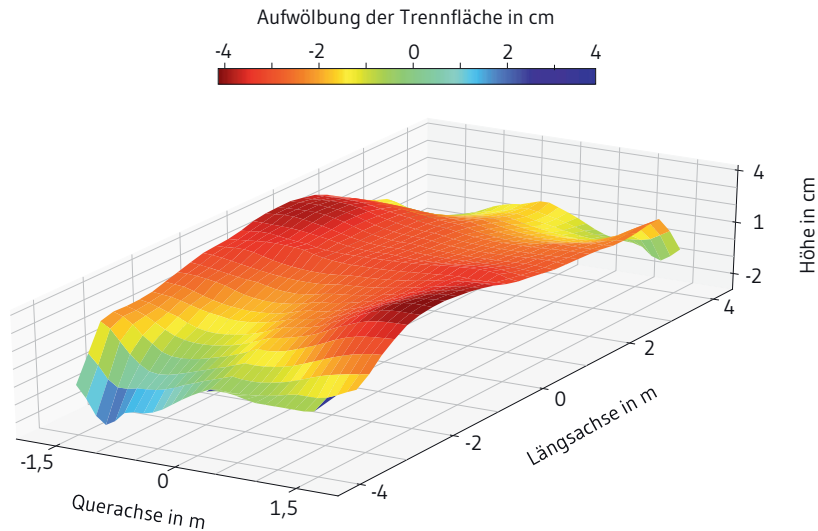


Abb. 7 Aufwölbung der Trennfläche zwischen Aluminium und Kryolith bei einer Stromstärke von 165 kA

Für jede Betriebsstromstärke ergibt sich eine andere Aufwölbung, und die Unterseiten der Anoden passen sich nach einer gewissen Zeit immer an diese Aufwölbung an. Durch Änderungen der Stromstärke formiert sich sofort eine neue Trennfläche. Die Unterseite der Anoden passt sich jedoch erst nach einiger Zeit an die neue Trennfläche an. Direkt nach dem Umstellen der Stromstärke ergibt sich folglich ein lokal ungleichmäßiger ACD. Um diesen Effekt zu visualisieren, sind in *Abbildung 8* die Profile der Trennfläche und der Anodenunterseite für eine hohe und eine niedrige Stromstärke dargestellt. An der Darstellung lässt sich ablesen, dass beim Umschalten von einer niedrigen zu einer hohen Stromstärke lokal ein höherer ACD (ACD_{max}) auftritt und umgekehrt beim Umschalten von einer hohen zu einer niedrigen Stromstärke lokal ein niedriger ACD (ACD_{min}) auftreten wird. In beiden Fällen wird eine ungleiche Verteilung der Stromdichte innerhalb der Zelle die Folge sein. Durch das hier entwickelte Modell kann diese ermittelt und quantifiziert werden. So werden für verschiedene Umschaltsituationen Szenarien simuliert, damit die sich ergebenden Stromverteilungen, die für jede Anode individuell ausgewertet werden, den Prozessbetreibern zur Verfügung gestellt werden können. Damit kann vor Ort nach einer Änderung der Stromstärke bewertet werden, ob ein Anodenstrom durch das Umschalten bedingt ist oder eine Abnormalität im Prozess vorliegt.

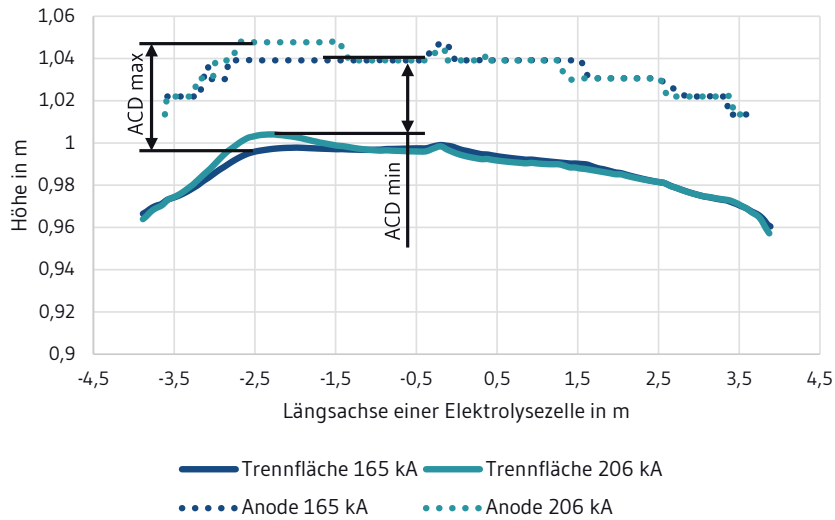


Abb. 8 Profil der Trennfläche und Anodenunterseite bei ausgewählten Stromstärken

2.3 Prozessüberwachung: Anodenstrommessung

Die individuelle Anodenstrommessung gewann in den vergangenen Jahren im Forschungsfeld der Aluminiumelektrolyse immer mehr an Bedeutung (6). Die Herausforderungen liegen insbesondere in zeitlich veränderlichen hohen magnetischen Feldern, hohen Umgebungstemperaturen, Prozessingriffen, Staub und der Gewährleistung der Sicherheit bezüglich elektrischer Isolation. Das Ziel war es, ein System zu entwickeln, das diesen schwierigen Umgebungsbedingungen standhält. Gleichzeitig soll es auf Basis der berechneten Anodenströme ermöglichen, verschiedene Arten von Anodenanomalien zu detektieren bzw. vorherzusagen. Zu den Anodenanomalien zählen beispielsweise Ansätze unterhalb der Anode, sogenannte Spikes, Anodeneffekte und Anodenfehlstellungen (Yang, et al., 2015; Cheung, et al., 2013; Wang, et al., 2016; Martel, 2018). Wenn es möglich ist, diese zu detektieren bzw. vorherzusagen, dann lassen sich potenzielle Schäden am Prozess und seiner Komponenten vermeiden sowie der Energieverbrauch und die Emission von klimarelevanten perfluorierten Kohlenwasserstoffen reduzieren. Ferner ist es möglich, Zellparameter wie die Aluminiumoxidkonzentration zu schätzen (7). Diese Instrumente unterstützen eine energieflexible Fahrweise der Öfen.

Der Stromverlauf des Elektrolyseofens ist in *Abbildung 9* dargestellt. Der Strom fließt über die Stromschienen und dann entlang der Steigleitungen zum Anodenbaum (auch Traverse oder Anodenträger genannt), wo die Anodenstangen aufgehängt sind. An den markierten Punkten (1) und (2) teilt sich der Strom dann auf die beiden Seiten des Anodenbaums auf. Bei einem Hallenstrom von 175 kA

fließen aufgrund der Geometrie bei Punkt (1) ungefähr zwei Drittel des Gesamtstroms, d. h. 117 kA, und bei Punkt (2) ein Drittel des Gesamtstroms hinein, also 58 kA. Wie viel Strom (in grün) über die Anodenstange in die Anode abfließt, hängt von vielen Einflussgrößen des Prozesses ab. Im Mittel sind es 5 bis 8 kA. Nachdem der Strom seinen Weg durch den Elektrolyten und das flüssige Aluminium genommen hat, fließt er über die Kathode und die angeschlossenen Kathodenschienen weiter zum nächsten Ofen.

Im Allgemeinen gibt es vier grundlegende physikalische Prinzipien, nach denen die Anodenstrommessung durchgeführt werden kann: Das Ohm'sche Gesetz, das Faraday'sche Induktionsgesetz, die Magnetfeldmessung und der Faraday-Effekt.

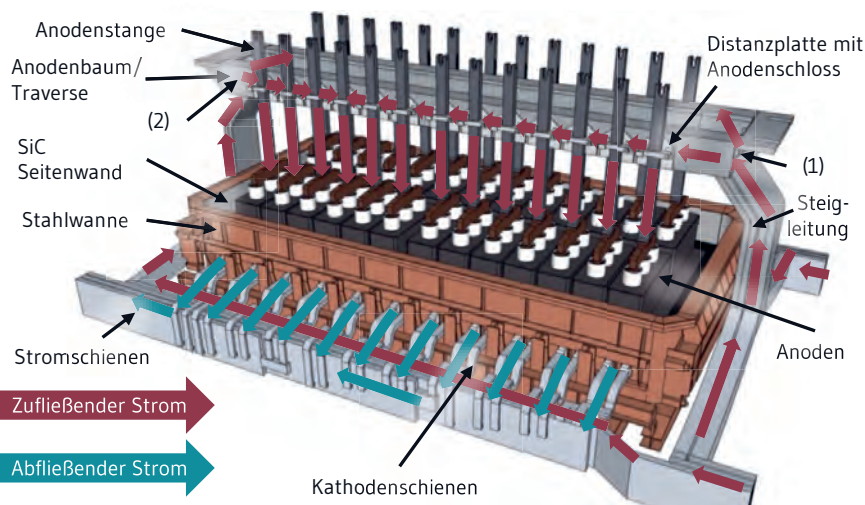


Abb. 9 Stromverlauf beim Elektrolyseofen

Aufgrund der guten Erfahrungen mit einem am Ofen bereits bestehenden Messkonzept auf Basis des Ohm'schen Gesetzes wurde bei der Implementierung der Anodenstrommessung an vier weiteren Öfen auch im Kopernikus-Projekt SynErgie 2 der grundsätzliche Messaufbau auf dem Anodenbaum beibehalten. Dieser besteht aus Bolzen für die Spannungsmessung und aus Thermoelementen für die Temperaturmessung (Abbildung 10). Die Bolzenpositionen der Spannungsmessung an den Steigleitungen sowie die Temperaturmessung wurden modifiziert. Unter der Annahme einer homogenen Stromverteilung über die Querschnittsfläche des Anodenbaums ergibt sich der individuelle Anodenstrom über die Differenz der Ströme auf dem Anodenbaum an den Messstellen n und $n+1$ gemäß Gleichung 2:

$$I = I_n - I_{n+1} = \frac{U_n}{R_n} - \frac{U_{n+1}}{R_{n+1}} = \frac{U_n \cdot A}{\rho_0 \cdot (1 + K \cdot (T_n - T_0)) \cdot l_n} - \frac{U_{n+1} \cdot A}{\rho_0 \cdot (1 + K \cdot (T_{n+1} - T_0)) \cdot l_{n+1}} \quad (2)$$

Die Ströme der Eckanoden werden analog mit der obigen Gleichung berechnet, wobei entsprechende Bolzen und Thermoelemente an den Steigleitungen genutzt werden, um die Eingangsströme zu bestimmen. Ein solcher Messaufbau hat den Vorteil, dass keine Messleitungen an der Anodenstange befestigt werden müssen, was zu eventuellen Schwierigkeiten bei regelmäßigen Prozesseingriffen wie z. B. dem Anodenwechsel oder dem Traversenheben führen könnte, wenn der elektrische Kontakt nach diesen Eingriffen nicht mehr ausreichend vorhanden ist.

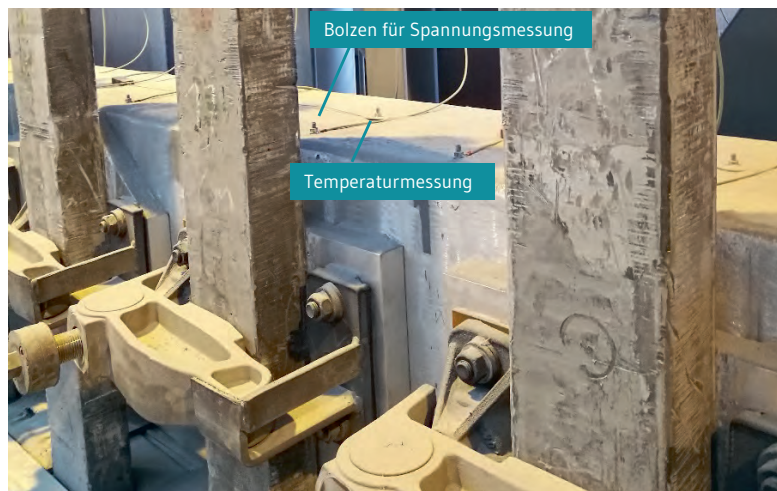


Abb. 10 Bolzen für Spannungsmessung und Temperaturmessung auf dem Anodenbaum

Als Nachteil muss eine geringere Messgenauigkeit akzeptiert werden, da sich der Strom aufgrund der komplexen Geometrie des Anodenbaums und der Distanzplatte mit dem Anodenschloss nicht so homogen über den Querschnitt verteilt, wie es bei der Anodenstange der Fall ist. Zur Verbesserung der Messgenauigkeit wurden über die Dauer eines Anodenlebenszyklus täglich Messungen mit einem Handmessgerät (Stichel) durchgeführt und zur Ermittlung einer Korrekturfunktion genutzt. Somit ergibt sich im Vergleich mit weiteren Stichmessungen beispielsweise für einen der vier neu ausgestatteten Öfen (Nr. 1049) über alle Anoden gemittelt ein Fehler von 0,66 kA (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers). Ferner konnte durch eine Modifikation der Berechnung für den Ofen mit dem bereits bestehenden Messkonzept (Nr. 1112) der Fehler um 47 Prozent auf 0,89 kA gesenkt werden.

Abbildung 11 zeigt für diesen Ofen die stündlich gemittelten Ströme ausgewählter Anoden im zeitlichen Verlauf. Zum Zeitpunkt (1) wurde die Anode 7 gewechselt, und zum Zeitpunkt (2) wurde als Anodenanomalie dort ein Spike gefunden und durch Einsetzen einer neuen Anode beseitigt. Spikes können Kurzschlüsse im Ofen ausbilden und zeichnen sich demnach durch einen erhöhten Strom-

wert aus, was in der Abbildung beim Vergleich von Anode 7 mit den Anoden 5 und 13 zu erkennen ist. Wichtig ist es, Spikes möglichst frühzeitig zu detektieren, um negative Auswirkungen auf den Prozess zu minimieren.

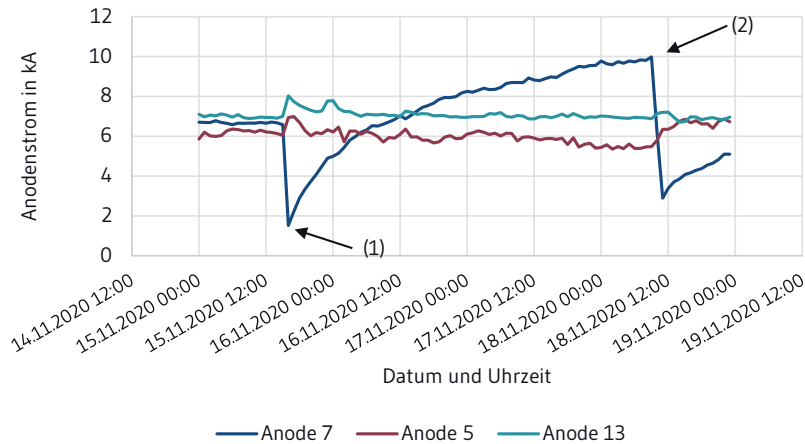


Abb. 11 Stromverlauf ausgewählter Anoden mit Spike an Anode 7 von Ofen 1112

Abbildung 12 zeigt die von Ofen 1112 minütlich gemittelten Ströme aller Anoden im zeitlichen Verlauf. Ab dem Zeitpunkt (1) ist eine starke Verringerung des Stromwerts von Anode 5 zu beobachten. Ein solches Verhalten ist charakteristisch für den zum Zeitpunkt (2) anhand der Ofenspannung detektierten Anodeneffekt. Anschließend ist eine deutliche Umverteilung der Anodenströme zu beobachten. Wenn es gelingt, einen Anodeneffekt frühzeitig vorherzusagen, lassen sich möglicherweise präventive Energieflexibilitätsmaßnahmen einleiten, um diesen Anodeneffekt und die damit einhergehenden negativen Einwirkungen auf den Prozess zu verhindern.

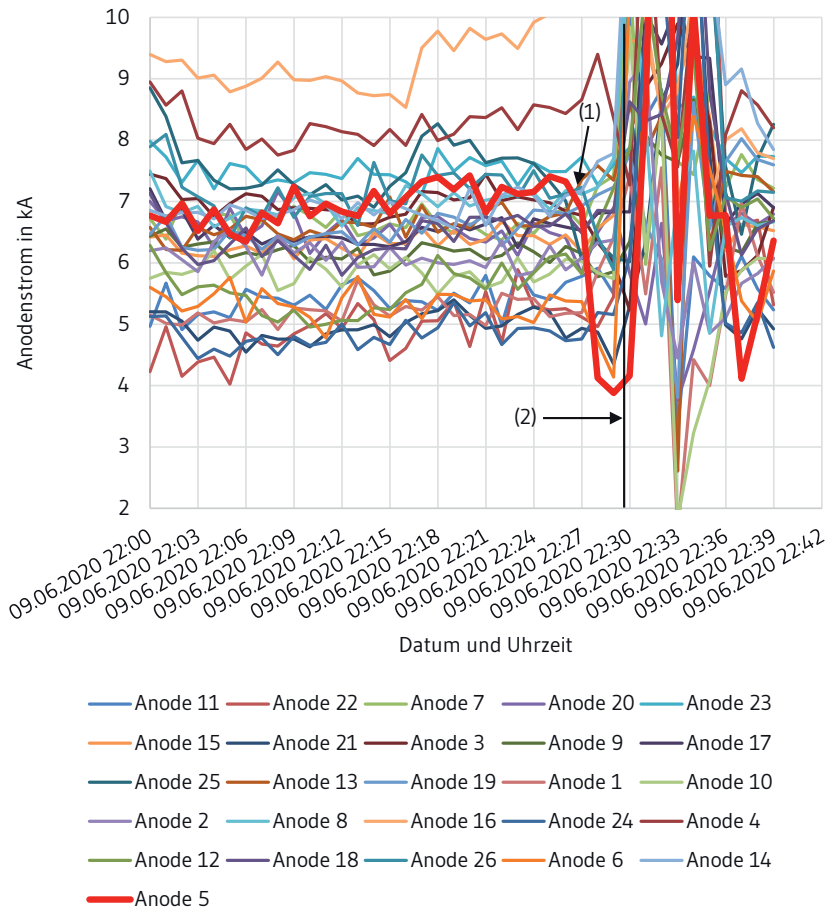


Abb. 12 Stromverlauf vor einem Anodeneffekt von Ofen 1112

2.4 Digitaler Zwilling zur Steuerung energieflexibler Aluminiumelektrolysezellen

Der Digitale Zwilling ist so aufgebaut, dass die Steuerungskonzepte die aktuellen Informationen effizienter nutzen. Ergänzend zu den eingangs beschriebenen Modellen muss eine gute Verbindung zu den bestehenden Kontrollmodellen etabliert werden, damit keine Fehlentscheidungen getroffen und auffällige Öfen rechtzeitig erkannt werden. Um Regelparameter zu steuern, nutzen die Entscheidungsmodelle sowohl die theoretischen Modelle als auch die Modelle, die auf Künstlicher Intelligenz basieren.

Der Digitale Zwilling wird als ein Framework entwickelt, das mehrere Modelle als Datenquellen nutzt. Mithilfe einer Zustandsmaschine, die für jeden Ofen und jede Halle gebildet wird, wird die Steuerung in Echtzeit angepasst. Die Zustandsmaschine bestimmt die Zustände anhand von Echtzeitdaten. Als Echtzeitdaten werden in diesem Zusammenhang Messdaten aus dem Prozess verwendet sowie Zustandsdaten, die mithilfe der vorangehend beschriebenen Modelle generiert wurden. In *Abbildung 13* werden das Framework des Digitalen Zwillings und die entsprechenden Datenflüsse dargestellt.

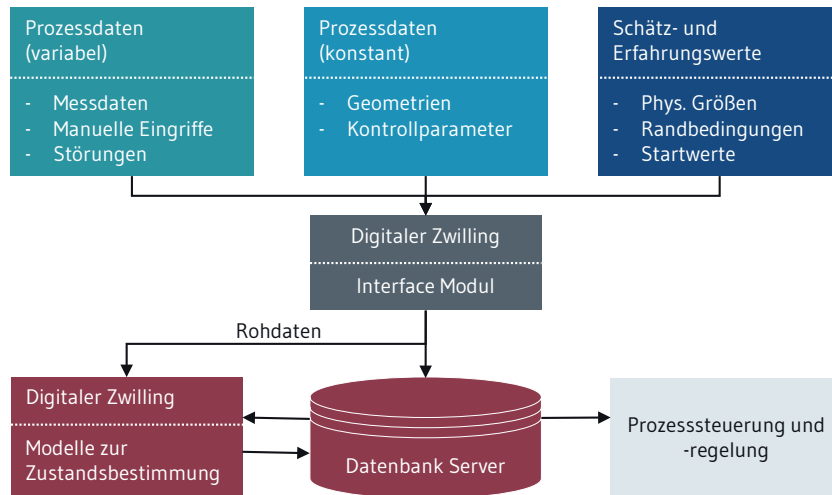


Abb. 13 Datenfluss beim Digitalen Zwilling

Auf diese Weise generiert der Digitale Zwilling den Zustand eines Ofens in Echtzeit. Innerhalb verschiedener Zustände werden mithilfe von Regeln und Algorithmen die Regelparameter für die existierenden Programme geändert. Für jedes physikalische Objekt (z. B. Ofen oder Halle) wird eine Zustandsmaschine erzeugt. Diese ermittelt aus den bereitgestellten Daten den Zustand einer Zelle und gibt diesen als Output an den Digitalen Zwilling weiter, sodass dieser über die einzuleitenden Regelungsschritte entscheiden kann. Die Zustandsmaschine ist in *Abbildung 14* dargestellt.

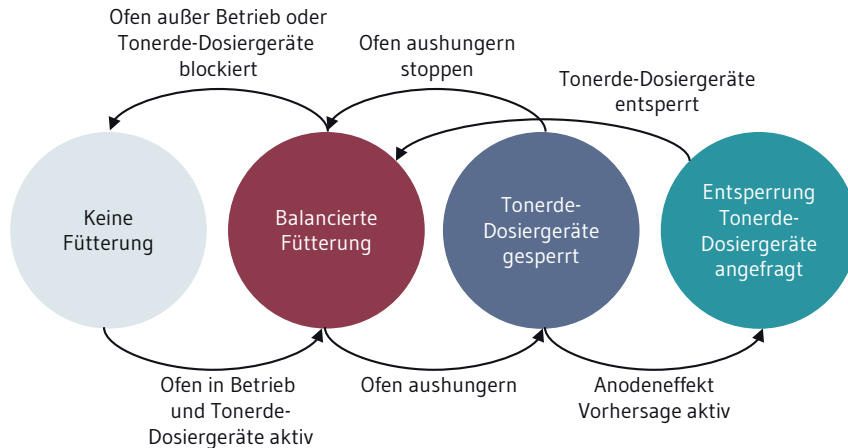


Abb. 14 Beispiel einer Zustandsmaschine für die Fütterung

3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen

Autor: Hauck

Mithilfe der durch die Flexibilisierung geschaffenen Möglichkeiten, verschiedene Regelleistungsbeiträge anzubieten (PRL, SRL, AbLaV) und/oder auf Marktpreis-Spreads der Strombörse reagieren zu können (vorübergehende Lasteinsenkung in Hochpreisphasen und Lasterhöhung in Niedrigpreisphasen), lassen sich in einer »Quadrupel-Win-Situation« gleichzeitig vier verschiedene wertvolle Beiträge leisten:

- Integration volatiler erneuerbarer Energien in das Netz (Bilanzausgleich zwischen Hellbrisen und Dunkelflauten)
- Reduzierung erzeugungsseitiger CO₂-Emissionen durch Einsparung notwendiger Residualleistungsbeiträge fossiler Kraftwerke
- Systemdienstleistungs-Beiträge zur Sicherung eines stabilen Netzbetriebs
- Zusatzeinnahmen zur Senkung der effektiv zu zahlenden Strompreise

Der jeweils aktuelle Bedarf an den verschiedenen Energieflexibilitätsbeiträgen und auch die damit erzielbare Vergütung sind nicht konstant, sondern ändern sich in Abhängigkeit von regulatorischen Rahmenbedingungen, Jahreszeiten, Netzsituationen, verfügbaren Kraftwerksflotten, deren jeweils technischen Eigenschaften und deren insbesondere auch von regulatorischen Rahmenbedingungen abhängigen Stromerzeugungskosten. Vor diesem Hintergrund sollte die betriebswirtschaftlich

begründete Entscheidung darüber, welchen der möglichen Vermarktungskanäle der Anbieter von Energieflexibilität für welche Anteile des zur Verfügung stehenden Energieflexibilisierungspotenzials nutzt, stets beobachtet und gegebenenfalls angepasst werden.

Darüber hinaus wird eine Vermarktung lastseitiger Flexibilität von diesbezüglich widrigen hoheitlichen Regularien behindert, insbesondere von der Ausgestaltung des § 19.2.2 StromNEV (individuelles Netzentgelt für Grundlastabnehmer), die eine dem erwünschten Grundlastprofil überlagerte Bereitstellung systemdienlicher Energieflexibilitätsbeiträge mit hohen Netzzusatzkosten belastet und damit betriebswirtschaftlich massiv behindert. Hier bedarf es zur Vermarktung der bereits verfügbaren und zur Mobilisierung von weiteren lastseitigen Energieflexibilitäten dringend einer Anpassung, die im einfachsten Fall aus dieser ergänzenden Formulierung im § 19.2.2 StromNEV besteht: »Systemdienliche Energieflexibilitätsbeiträge des Netzananschlussnehmers haben keinen Einfluss auf Art und Höhe des zu entrichtenden Netzentgeltes.«

4 Literatur

CHEUNG, CHEUK-YI, et al., 2013. Characterization of Individual Anode Current Signals in Aluminum Reduction Cells. I & EC Research.

CHEUNG, CHEUK-YI, et al. Characterization of Individual Anode Current Signals in Aluminum Reduction Cells. I & EC Research. 2013.

DUPUIS, M. und BOJAREVICS, V., 2005. Weakly coupled thermo-electric and MHD mathematical models of an aluminium electrolysis cell.

DUPUIS, MARC und BOJAREVICS, VALDIS. Weakly coupled thermo-electric and MHD mathematical models of an aluminium electrolysis cell. 2005.

DÜSSEL, R., 2018. Entwicklung eines Regelungskonzepts für Aluminium-Elektrolysezellen unter Berücksichtigung einer variablen Stromstärke und eines regelbaren Wärmeverlusts.

DÜSSEL, ROMAN. Entwicklung eines Regelungskonzepts für Aluminium-Elektrolysezellen unter Berücksichtigung einer variablen Stromstärke und eines regelbaren Wärmeverlusts. 2018.

GRABOWSKI, N., et al. Using Random Forest Regression for Predicting and Analysing Reduction Cell Behaviour. Proceedings of the 12th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference. 9 2018.

International Aluminium Institute. International Aluminium. [Online] 2022. [Zitat vom: 07. 03 2022.] <https://international-aluminium.org/>.

JANSSEN, N., GESELL, H. und JANOSKE, U. Adaption of the aluminium electrolysis to volatile power supply: Development of a predictive model to investigate the thermal behavior of a cell. NAFEMS WORLD CONGRESS 2021. 2021.

MARTEL, ARTHUR. Spike Detection Using Advanced Analytics and Data Analysis. Light Metals 2018. 2018, S. 485–490.

POTOCNIK, VINKO und REVERDY, MICHEL. History of Computer Control of Aluminum Reduction Cells. The Minerals, Metals & Materials Series. 2021, S. 591–599.

SAUER, A., E. ABELE und H. U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

WANG, Y., et al. Testing and Characterization of Anode Current in Aluminum Reduction Cells. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2016. 2016.

YANG, SHUAI, et al. Online Anode Current Signal in Aluminum Reduction Cells: Measurements and Prospects. JOM. 12 2015, Bd. 68, S. 623–634.

ZHANG, S., et al. Alumina Concentration Detection Based on the Kernel Extreme Learning Machine. Sensors. 9 2017, Bd. 17, S. 2002.





C.6

Klimatisierungs- und Raumluftechnik

Management Summary

In raumluftechnischen Anlagen und Geräten (RLT-Anlagen) trägt neben dem thermischen Energiebedarf für Heizung und Kühlung in den Wärmetauschern der elektrische Energiebedarf (beispielsweise zur Luftförderung) maßgeblich zum Gesamtenergiebedarf der Anlagen bei. Im Zeitraum zwischen 2010 und 2014 entfielen ca. 11 bis 20 Prozent des Endenergieverbrauchs der deutschen Industrie auf RLT-Anlagen (Vogt und Herrmann, 2021; Kemmler et al., 2016). Daher besitzen RLT-Anlagen ein sehr großes Potenzial zur Energieflexibilitätsbefähigung.

In diesem Kapitel werden umsetzbare Energieflexibilitätsmaßnahmen im Bereich der Klimatisierungs- und Raumluftechnik anhand je eines Anwendungsfalls aus der Galvanotechnik (B+T Oberflächen-technik GmbH), Lebensmittelindustrie (Dr. Oetker) sowie eines Demonstrators im universitären Umfeld (Klimaraum der ETA-Fabrik der TU Darmstadt) aufgezeigt. Bei den Anwendungsfällen kommen die Energieflexibilitätsmaßnahmen »Auftrag unterbrechen«, »Prozess unterbrechen« und »Energie speichern« in Betracht (VDI 5207-1:2020). Ausgehend von den Anwendungsfällen werden die erhobenen Energieflexibilitätspotenziale auf den jeweiligen Wirtschaftszweig in Deutschland hochgerechnet und CO₂-Vermeidungspotenziale ausgewiesen. Anhand des Klimaraums der ETA-Fabrik und des industriellen Anwendungsfalls bei B+T wird die technische Umsetzung detailliert dargelegt und eine wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen vorgenommen.

Autoren

da Silva, Carina
dasilva@ismd.tu-darmstadt.de
Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), Technische
Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt

Herrmann, Christoph
c.herrmann@tu-braunschweig.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
(IWF), Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19b, 38126 Braunschweig

Schneider, Henry
h.schneider@ismd.tu-darmstadt.de
Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), Technische
Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt

Schneider, Jens
schneider@ismd.tu-darmstadt.de
Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), Technische
Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt

Vogt, Marcus
marcus.vogt@tu-braunschweig.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
(IWF), Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19b, 38126 Braunschweig

von Hayn, Adrian
a.hayn@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Eugen-Kogon-Straße 4, 64287 Darmstadt

Weigold, Matthias
weigold@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Eugen-Kogon-Straße 4, 64287 Darmstadt

Wendt, Jonas
j.wendt@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Eugen-Kogon-Straße 4, 64287 Darmstadt

1 Grundlagen und Potenziale der branchenübergreifenden Klimatisierungs- und Raumluftechnik

Autoren: Vogt · von Hayn · Schneider · da Silva · Wendt · Herrmann · Weigold · Schneider

1.1 Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik

Eine primäre Aufgabe der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) besteht darin, die erforderlichen Produktionsbedingungen in Bezug auf Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftreinheit zu gewährleisten (Hesselbach et al., 2008). Diese Aufgabe wird durch RLT-Anlagen erfüllt. In bestimmten Fällen können RLT-Anlagen große Teile der TGA ausmachen bzw. weitere Teile der TGA erfordern, z. B. Kältemaschinen, Fernwärme- und Gasanschlüsse. Wenn ein angemessener Kompromiss zwischen den gewünschten Produktionsbedingungen und den Betriebskosten erreicht wird, kann eine RLT-Anlage als erfolgreich angesehen werden (Hesselbach et al., 2008). In Bezug auf die Produktionsbedingungen sind insbesondere der thermische Komfort und die Luftqualität maßgeblich. Bei raumluftechnischen Anlagen wird zwischen Anlagen mit oder ohne Lüftungsfunktion unterschieden. Anlagen ohne Lüftungsfunktion werden als Umluftanlagen bezeichnet. Bei Anlagen mit Lüftungsfunktion wird weiter zwischen reinen Lüftungs-, Teil- oder Vollklimaanlagen unterschieden (Recknagel et al., 2007). Ferner können raumluftechnische Anlagen zentral und dezentral betrieben werden.

Für Lüftungsanlagen gibt es vier mögliche thermodynamische Behandlungsfunktionen: Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten. Ist nur eine der genannten Möglichkeiten verbaut, wird das Gerät als reine Lüftungsanlage bezeichnet. Bei zwei oder mehr installierten Behandlungsfunktionen gilt sie als Teilklimaanlage. Sind alle vier Konditionierungsmöglichkeiten vorhanden, entspricht das einer Vollklimaanlage (Recknagel et al., 2007). RLT-Anlagen in der Industrie bergen jedoch ein oft unterschätztes energetisches Einsparungs- und Energieflexibilitätpotenzial (Ahmed et al., 2020). In der deutschen Industrie entfielen im Zeitraum zwischen 2010 und 2014 ca. 11 bis 20 Prozent des Endenergieverbrauchs auf RLT-Anlagen (Vogt und Herrmann, 2021; Kemmler et al., August 2016). Nach Gruber (2017) können bis 2030 bis zu 37 Prozent der Energie durch eine effizientere Umsetzung von Lüftungsanlagen eingespart werden. Durch die Auslegung auf statische Extremwerte (für beispielsweise Luftwechselraten und Solltemperaturen) sind RLT-Anlagen meist überdimensioniert. Deshalb besteht beim Betrieb von RLT-Anlagen ein großes energetisches Flexibilitätpotenzial. Basierend auf einer Simulationsstudie von Hao et al. (2013) können bei konservativer Abschätzung (bei maximaler Wärmelast) bis zu 15 Prozent der Ventilatorleistung als Regelleistung im Zeitbereich von acht Sekunden bis zu drei Minuten zur Verfügung gestellt werden, ohne dass die Raumlufparameter merklich beeinflusst werden. Das maximale Flexibilisierungspotenzial ist abhängig vom Wetter, den inneren Lasten und der Raumtemperatur des betrachteten Gebäudes. Aufgrund der thermischen Trägheit des Gebäudes haben hohe, kurzfristige Änderungsraten des Luftstromes einen geringen Einfluss auf die Innenraumtemperatur des Gebäudes.

Der Endenergiebedarf zur Luftförderung (Raumlüftung) betrug in Deutschland im Zeitraum 2005 bis 2014 relativ konstant jährlich ca. 12 TWh (Kemmler et al., 2016). Der Endenergiebedarf von Ventilatoren in diesem Zeitraum war etwas höher und betrug relativ konstant 13,5 TWh (Kemmler

et al., 2016). Unter Annahme einer verfügbaren Regelleistung von 15 Prozent ergibt sich für Deutschland damit ein jährliches Energieflexibilisierungspotenzial von bis zu 1,8 TWh bei der Raumlüftung und 2 TWh bei Ventilatoren.

In *Abbildung 1* sind abschaltbare Leistungen von RLT-Anlagen in Abhängigkeit der Abrufdauer dargestellt. Wie links im Diagramm zu erkennen ist, haben RLT-Anlagen eine mittlere Last von 2900 MW. Die weiteren Säulen zeigen, dass im Falle der Lüftung eine abschaltbare Leistung von bis zu 1.000 MW bei einer Abrufdauer von bis zu 30 Minuten möglich ist (Gruber et al., 2017). Damit besitzen RLT-Anlagen ein sehr großes Potenzial zur Flexibilisierung des Betriebs.

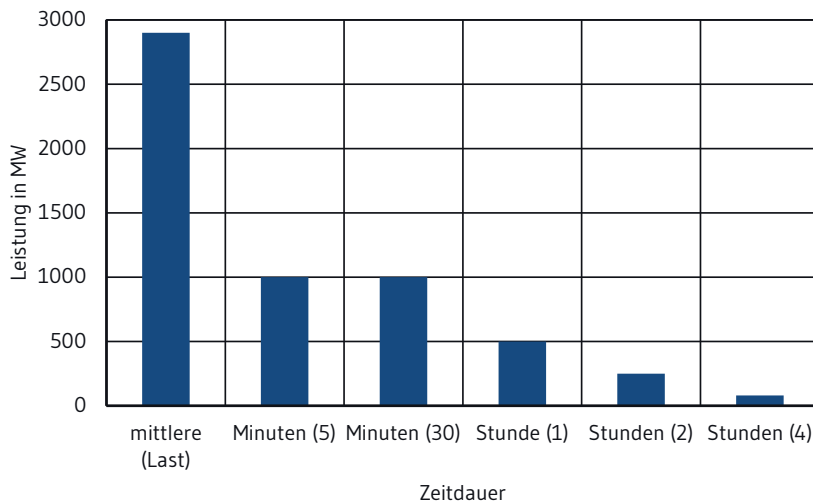


Abb. 1 Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von RLT-Anlagen in Deutschland (Normalbetrieb) in Abhängigkeit von der Abrufdauer (Gruber et al., 2017)

1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen von branchenübergreifender Klimatisierungs- und Raumlufttechnik

Im Folgenden werden die technische Umsetzung und die wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Klimatisierungs- und Raumlufttechnik in unterschiedlichen Industriebranchen beschrieben. *Kapitel 1.3* und *1.4* geben einen Überblick über vielversprechende Energieflexibilitätsmaßnahmen bei den betrachteten unterschiedlichen Industrieunternehmen verschiedener Branchen. Eine energieflexible Betriebsweise raumlufttechnischer Anlagen kann prinzipiell durch die Steuerung der Ventilatorantriebe in Stufen oder stufenlos mittels Frequenzumrichter erfolgen (Kaup, 2009). Lüftungsanlagen können primär zum positiven Lastausgleich genutzt werden (Kaup, 2009).

Tab. 1 stellt eine Übersicht der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen der Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei den Umsetzungspartnern dar. Diese werden im Folgenden je Umsetzungspartner kurz dargestellt.

Tab. 1 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei den Umsetzungspartnern

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Auftrag unterbrechen (Lüftung)	B+T Oberflächentechnik GmbH	Galvanotechnik
Energie speichern (inhärent)	Dr. Oetker	Lebensmittelindustrie

1.3 Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei der B+T Oberflächentechnik GmbH

Die B+T Oberflächentechnik GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen in Wetzlar/Rechtenbach und in der Galvanotechnik und Oberflächenveredlung tätig. Die B+T Oberflächentechnik GmbH verfügt über modernste Galvanik-Linien sowie Wärmebehandlungsanlagen nach dem neuesten Stand der Technik. Als Oberflächenspezialist werden diverse metallische Oberflächen und Güter veredelt. 90 Prozent der Güter werden an Kunden aus dem Bereich der Automobilindustrie geliefert. Energie- und Ressourceneffizienz an den Produktionsstandorten der B+T Oberflächentechnik GmbH nehmen einen hohen Stellenwert ein, was im Rahmen des Energie- und Umweltmanagements nach DIN EN ISO 50001 und 14001 systematisch verbessert wird.

Bei der galvanischen Beschichtung der metallischen Oberflächen entstehen giftige Gase, wodurch zwingend eine Klimatisierungs- bzw. raumluftechnische Anlage zum Luftaustausch benötigt wird. Dadurch sind Flexibilitätspotenziale bei B+T stark an die aktuelle Auftragslage bzw. Fertigungsplanung gekoppelt. Als Energieflexibilitätsmaßnahme kommt in Bezug auf die Lüftung lediglich eine Auftragsunterbrechung in Frage, sofern es die Auftragslage und Produktionsplanung zulässt.

1.4 Energieflexible Technologie für klimatisierte Räume und Gebäude in der Industrie am Beispiel eines Kühllagers (Intercool GmbH, Dr. Oetker)

Bei der Analyse von Energieflexibilitätsmaßnahmen im Kühllager müssen bestimmte Parameter betrachtet werden, die vom Anwendungspartner Intercool GmbH verifiziert sind. An erster Stelle steht die strikte Einhaltung von definierten Raumtemperaturen, die aufgrund der spezifischen Lager-temperaturanforderung der jeweiligen Lagergüter unbedingt eingehalten werden müssen. Zusätzlich können auch Anforderungen an die relative Feuchte der Raumluf gestellt werden. Die Kühlung der Lagerräume erfolgt in der Regel mittels elektrisch angetriebener Kompressionskälteanlagen, deren Betrieb durch folgende Faktoren bestimmt wird:

- Wärmekapazität: Die spezifische Wärmekapazität der zu kühlenden Güter multipliziert mit der gelagerten Masse der Güter
- Temperaturanforderungen der gelagerten Güter
- Transmissionseigenschaften der Gebäudehülle
- Luftaustauschraten durch Toroffenstehzeiten
- Wärmeeintrag durch Personen, Beleuchtung, Flurförderfahrzeuge und Lagertechnik
- Nachkühlung von Lagergütern, die mit höheren Temperaturen eingelagert werden

Die Kälteanlagen werden mithilfe von Raumluf temperaturesensoren gesteuert, um den geforderten Temperaturbereich einzuhalten. Eine vielversprechende Variante, das Energieflexibilitätspotenzial auszuschöpfen, ist das An- und Ausschalten der Kälteanlage: Tiefkühlager können in Zeitphasen von günstigen Stromtarifen auf eine tiefere Temperatur als für die Produkte notwendig heruntergekühlt werden (z. B. -28°C statt -20°C). Durch den erzielten Temperaturpuffer bleiben die Kälteanlagen während den Zeiten mit hohen Strompreisen ausgeschaltet, bis die Mindesttemperatur erreicht ist. Bei Kühl lagern und Produktionsstätten mit Temperaturen über 0°C sind die Temperaturbereiche für die einzelnen Produkte enger definiert, z. B. für Fleischprodukte $+0^{\circ}\text{C} / +2^{\circ}\text{C}$; für Molkereiprodukte $+4^{\circ}\text{C} / +6^{\circ}\text{C}$ und für Pharmaprodukte $+2^{\circ}\text{C} / +8^{\circ}\text{C}$ (Intercool GmbH).

1.4.1 Anwendungsfall am Standort Moers, Dr. Oetker

Im Folgenden werden die vielversprechenden Energieflexibilitätsmaßnahmen anhand des klimatisierten Hochregallagers von Dr. Oetker, das heute von »Moers Frischeprodukte« betrieben wird, beschrieben. Am Standort Moers werden für Dr. Oetker und Gropper vor allem Desserts und gekühlte Getränke verarbeitet und gelagert. Der Standort umfasst zwei Hochregallager und mehrere Verarbeitungszonen wie Kältetunnel, in denen Kälte benötigt wird. Die zentrale Kälteanlage für die Hochregallager 1 und 2 besteht aus einer Kompressionskältemaschine mit Schraubenverdichtertechnik. Als Kältemittel wird Ammoniak eingesetzt. Das verdichtete Ammoniak wird im Kühl lager durch einen Wärmeübertrager geführt und mit der Zuluft mehrerer Ventilatoren verdampft (Umluftbetrieb). Bei diesem Prozess wird der Lagerluft Wärme entzogen und somit die Raumluf gekühlt.

Bei einem Hochregallager wurde überprüft, inwieweit das Temperaturband erweitert werden kann, ohne dass die Anforderungen der Lebensmittel verletzt werden. Im Referenzfall wurde die Raumkonditionierung auf starre $2,5^{\circ}\text{C}$ gesteuert. Im optimierten Fall konnte die Minimaltemperatur aufgrund von Energieeffizienzgründen auf ca. 2°C und die Maximaltemperatur auf ca. 5°C gesetzt werden. Das ist die Temperatur, bei der laut Hersteller die Lebensmittel keine qualitätsmindernden Effekte erleiden.

Nun können die gelagerten Lebensmittel als inhärente Kältespeicher fungieren, den Zeitraum bis zur Erreichung von T_{max} verlängern und einen möglichen Zeitraum von hohen Strompreisen überbrücken (Lastverschiebung). Im umgekehrten Fall kann bei niedrigen Strompreisen die Anlage wieder eingeschaltet werden, um den günstigeren Strom zur Kühlung bis zur unteren Grenze des Temperaturbands zu nutzen (Lasterhöhung).

Im Realversuch konnte nach Abschaltung des Kühlkreislaufs ein Zeitraum von drei Stunden überbrückt werden, bis die kritische Maximaltemperatur von 5 °C erreicht wurde. Die Leistung, die für Hochregallager 1 zur Verfügung steht, wird auf 130 kW geschätzt (Sauer et al., 2019). Das daraus resultierende Energieflexibilitätspotenzial wird *Kapitel 1.5* angegeben.

1.5 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

Zur einheitlichen Hochrechnung der ermittelten standortspezifischen Energieflexibilitätspotenziale auf die Wirtschaftszweigebene »Klasse« in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2008) dient eine gemeinsam entwickelte Methode (*Abbildung 2*). In einem ersten Schritt wird zunächst der Wirtschaftszweig mit den Unterklassen identifiziert, indem die jeweiligen Energieflexibilitätsmaßnahmen untersucht werden. Anschließend werden die eingesetzten Querschnittstechnologien und deren maßnahmenspezifische Energieflexibilitätspotenziale auf Standortebene ermittelt. Die ermittelten maßnahmenspezifischen Potenziale werden dann auf die jeweilige Klasse des Wirtschaftszweigs hochgerechnet. Die Hochrechnung wird hierbei auf die Wirtschaftszweigebene »Klasse« durchgeführt, da eine Hochrechnung auf höhere Ebenen aufgrund der zunehmend unterschiedlichen Prozesse und Anlagen als nicht valide betrachtet wird.

Als Faktor für die Hochrechnung dient der Anteil des elektrischen Energiebedarfs des betrachteten Unternehmens am Gesamtenergiebedarf des Wirtschaftszweigs. Dieser Faktor wurde gewählt, da die elektrischen Energiebedarfe der Unternehmen und der Wirtschaftszweige meist vorliegen oder ermittelbar sind. Um eine valide Hochrechnung zu gewährleisten, wurde zudem eine maßnahmenspezifische Hochrechnung durchgeführt. Die im Folgenden genannten kumulierten Flexibilitätspotenziale ergeben sich aus den in *Tabelle 2* gelisteten maßnahmenspezifischen Einzelpotenzialen.



Abb. 2 Methode zur Ermittlung und Hochrechnung der Energieflexibilitätspotenziale auf Wirtschaftszweigebene in Deutschland

1.5.1 B+T Oberflächentechnik GmbH

Im Wirtschaftszweig der Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung beträgt das ermittelte Energieflexibilitätspotenzial in Deutschland mit einem relativen Energiebedarf der B+T Oberflächentechnik GmbH von 0,12 Prozent am gesamten Wirtschaftszweig insgesamt 353,7 GWh/a im Falle einer Lastreduktion.

1.5.2 Intercool/Dr. Oetker KG

Im Wirtschaftszweig der Herstellung von Frucht- und Gemüsesäften (WZ 10.32) beträgt das ermittelte Energieflexibilitätspotenzial in Deutschland mit einem relativen Energiebedarf der Dr. Oetker KG von 9,07 Prozent am gesamten Wirtschaftszweig insgesamt 12,6 GWh/a im Falle einer Lastverschiebung.

Tab. 2 Übersicht der Energieflexibilitätspotenziale ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Klimatisierungs- und Raumlufttechnik

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Auftrag unterbrechen in Galvanik	283,4 MW Abrufdauer: 24 h Abrufhäufigkeit: 52-mal pro Jahr
Energie speichern (inhärent) in Lebensmittelindustrie	2,9 MW Abrufdauer: 3 h Abrufhäufigkeit: 1.460-mal pro Jahr

2 Energieflexible Klimatisierungs- und Raumlufttechnik in der ETA-Fabrik

Autoren: von Hayn · Schneider · da Silva · Wendt · Weigold · Schneider

Zur branchenübergreifenden Untersuchung des Energieflexibilitätspotenzials in der industriellen Klimatisierungs- und Raumlufttechnik dient der energieflexible Klimaraum der ETA-Fabrik am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt. Der Klimaraum fungiert als Demonstrator, dessen Komponenten und Versorgungstechnik stets weiterentwickelt und für einen energieflexiblen Betrieb befähigt werden. Im Folgenden werden das Versorgungssystem und dessen Komponenten, steuerungsseitige Anbindung, Überwachung und Betriebsweise vorgestellt.

2.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen

2.1.1 Klimaraum: Versorgungssystem und Komponenten

Zur Untersuchung der Energieflexibilität klimatisierter Räume in der Industrie, die sich im Wesentlichen aus der inhärenten Energiespeicherung des Raums inkl. Rauminhalt und aus zusätzlichen thermischen Energiespeichern im Versorgungssystem ergibt, verfügt der in der ETA-Fabrik aufgebaute Klimaraum über umfangreiche Aktorik und Sensorik. Im Fokus der Untersuchungen steht der Kühlbetrieb des Klimaraums. Über die Anbindung des Versorgungssystems an das gebäudeseitige Heißwassernetz kann der Raum jedoch auch beheizt werden. Die Versorgungstechnik und die verbauten Komponenten sind im Hydraulikschema in *Abbildung 3* schematisch dargestellt.

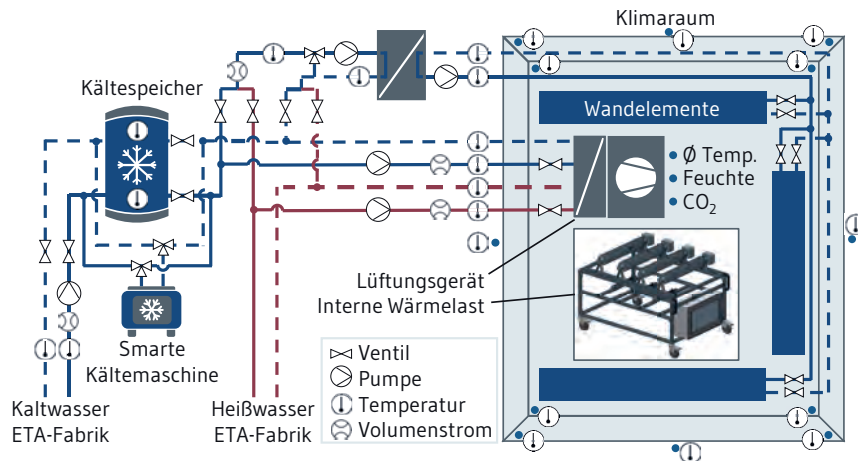


Abb. 3 Schematischer Aufbau der Versorgungstechnik des Klimaraums in der ETA-Fabrik (PTW, TU Darmstadt)

Aufgrund des gewählten Aufbaus bestehen zwei verschiedene Möglichkeiten der Raumklimatisierung. Zum einen kann der Raum über innovative, thermisch aktivierte Wandelemente gekühlt werden, die vom Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) der TU Darmstadt entwickelt wurden. Diese dienen nicht nur der Raumkühlung, sondern übernehmen durch ihre Masse und den Aufbau auch die Funktion eines thermischen Energiespeichers im Raum. Der Aufbau und die Funktionsweise der Wandelemente werden im *Kapitel 2.1.2* genauer vorgestellt. Zum anderen ist ein konventionelles Lüftungsgerät an der Decke des Raums verbaut und dient als Referenzfall. Die Kälteleistung des Lüftungsgeräts kann über den Volumenstrom von einer dezentralen, drehzahlgeregelten Pumpe und einem Regelventil geregelt werden. Hierzu wurde ein kaskadierter PI-Regler auf der Steuerung implementiert. Die Wandelemente sind über einen Wärmeübertrager hydraulisch von der Versorgungsseite getrennt. Dadurch kann mithilfe eines Mischventils die Vorlauftemperatur des Wassers zur Versorgung der Wandelemente geregelt werden.

Das zur Raumkühlung benötigte Kaltwasser kann sowohl durch das gebäudeseitige Kaltwassernetz der ETA-Fabrik als auch durch eine separate »smarte« Kompressionskältemaschine der Firma BKW bereitgestellt werden. Diese Kältemaschine ist eine Spezialanfertigung und besitzt sowohl einen drehzahlgeregelten Verdichter als auch eine drehzahlgeregelte Umwälzpumpe und kann somit bedarfsgerecht eine Kälteleistung von 3,5 bis 10 kW zur Verfügung stellen. Über Umschaltventile kann die Wärme zur Rückkühlung wahlweise über einen Lüfter an die Umgebung oder über einen Wärmeübertrager fluidgebunden an das gebäudeseitige Warmwassernetz abgegeben werden. Zudem ist es möglich, über weitere Umschaltventile sowohl den Speicher als auch den Raum direkt mit Kaltwasser zu versorgen. Die direkte Raumversorgung erweitert die Betriebsstrategien und erlaubt es, im energieflexiblen Betrieb auch bei entladem Kaltwasserspeicher schnell auf einen kurzfristigen Kältebedarf reagieren zu können. Die smarte Kältemaschine soll außerdem dazu befähigt werden, mithilfe selbstlernender Algorithmen Betriebsstrategieoptimierungen für einen energieflexiblen

Betrieb durchzuführen. Um hierfür die erforderlichen Daten zu liefern, verfügen die Kältemaschine und der Klimaraum über ein umfangreiches Messstellenkonzept zum Trainieren der Modelle. Neben umfangreicher Sensorik sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärseite der Kältemaschine sind im Klimaraum ein CO₂-Sensor, ein Feuchtigkeitssensor und Temperatursensoren in jeder Raumecke verbaut. Die übertragenen Wärmemengen werden im Versorgungssystem durch diverse Temperatursensoren und Wärmemengenzähler erfasst. Als thermischer Energiespeicher zur zeitlichen Entkopplung des Kältebedarfs von der Kälteerzeugung kommt ein 1000-l-Wasserspeicher zum Einsatz. Um das Energieflexibilitätpotenzial des Klimaraums zu heben, wird der Speicher zukünftig mit verkapselten Phasenwechselmaterialelementen erweitert (PCM-Elementen, PCM: Phase Change Material).

Um die verschiedenen flexiblen Klimatisierungsstrategien von Fertigungshallen zu untersuchen, wird ein eigens entwickeltes Heizgerät mit vier elektrischen Heizungsradiatoren als interne Wärmequelle verwendet, mit welchem beliebige Wärmeströme zwischen 0 und 6 kW in den Klimaraum eingebracht werden können. Durch benutzerdefinierte Skripte auf der verbauten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) lassen sich somit zeitabhängige thermische Lastprofile (beispielsweise Abwärmemengen von Werkzeugmaschinen) in den Klimaraum eintragen. Die Abwärme realer Maschinen stimmt in guter Näherung mit dem elektrischen Energiebedarf überein und kann hieraus ermittelt werden. Zugeführte und abgeführte Wärmeströme zu den Maschinen (z. B. durch Abwärmenutzung oder zentrale Kühlung) müssen jedoch in der Bilanz der Abwärmeleistung berücksichtigt werden. Für einen schnellen Wärmeeintrag werden die Radiatoren zusätzlich von Querstromlüftern angeströmt. Um sicherzustellen, dass die korrekte thermische Leistung freigesetzt wird, erfolgt über ein Leistungsmessgerät außerdem eine Zustandsrückführung an die SPS.

2.1.2 Aufbau der thermisch aktivierten Wandelemente

Ziel der Anwendung von thermisch aktivierten Wandmodulen ist die Nutzung der baulichen Struktur zur flexiblen Temperaturregulierung. Dabei erfolgt eine thermische Kopplung der Baukonstruktion mit der Funktion der Kältespeicherung- und -übertragung. Solche Systeme sollen zur alleinigen oder ergänzenden bivalenten Kühlung des Klimaraums verwendet werden.

Die eigentliche Funktion der thermischen Aktivierung ist die gezielte Nutzung der thermischen Trägheit der Wandelemente und die Erhöhung der Wärmeübertragung durch die großen Übertragungsflächen. Somit wird eine energetisch optimierte Regelbarkeit ermöglicht und das Energieflexibilitätpotenzial erhöht. Die thermische Trägheit der Wandelemente resultiert wesentlich aus zwei Baustoffeigenschaften: der Rohdichte und der spezifischen Wärmekapazität. Je höher beide Kenngrößen sind, desto größer ist die daraus resultierende thermische Trägheit und somit die zeitversetzte Raumkühlung.

Die Maximierung der Wärmeübertragung hängt stark von der Lage des Übertragungssystems im Wandmodul ab. Bei einer oberflächennahen thermischen Aktivierung durch wasserdurchströmte Rohrsysteme lässt sich die Oberflächentemperatur rapide auf die Zieltemperatur reduzieren, wodurch die erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Oberflächentemperatur erreicht wird. Dies ist für eine bessere Regelbarkeit und zur Maximierung der Leistungsabgabe notwendig.

Für die künftigen messtechnischen Untersuchungen sollen insbesondere unterschiedliche bauliche Konstruktionen der Wandelemente herangezogen werden können, weshalb die Wandelemente modular austauschbar sind. Dabei werden die zu untersuchenden Wandmodule an die Wände des Klimaraums und an das Versorgungssystem des Klimaraums hydraulisch angebunden. Folglich trägt die Baukonstruktion zu einem Lastmanagement bei, welches durch eine intelligente Betriebsweise der einzelnen Klimatisierungskomponenten zur Erhöhung der Energieflexibilität des Klimaraums führt. Hierbei können diverse Parameter in der Konstruktion variiert werden:

- Durchmesser der Rohrleitungen in den Wandelementen
- Material der Ummantelung (z. B. Kupfer oder Polypropylen)
- Abstand der Rohre zueinander
- Dicke und Baustoffeigenschaften der Überdeckung der Rohrsysteme

Für die angestrebte Untersuchung der Energieflexibilität werden drei unterschiedliche Wandkonstruktionen konzipiert. Zwei Varianten beinhalten Phasenwechselmaterialien (PCM) mit unterschiedlichen Phasenwechseltemperaturen, um die Wärmekapazität zu steigern (*Abbildung 4*, rechts). Mit einer weiteren Lehmvariante ist in Zusammenarbeit mit der Firma Leipfinger-Bader ein nachhaltiges System entwickelt worden, welches aus ökologischen Baustoffen konfiguriert ist (*Abbildung 4*, links).

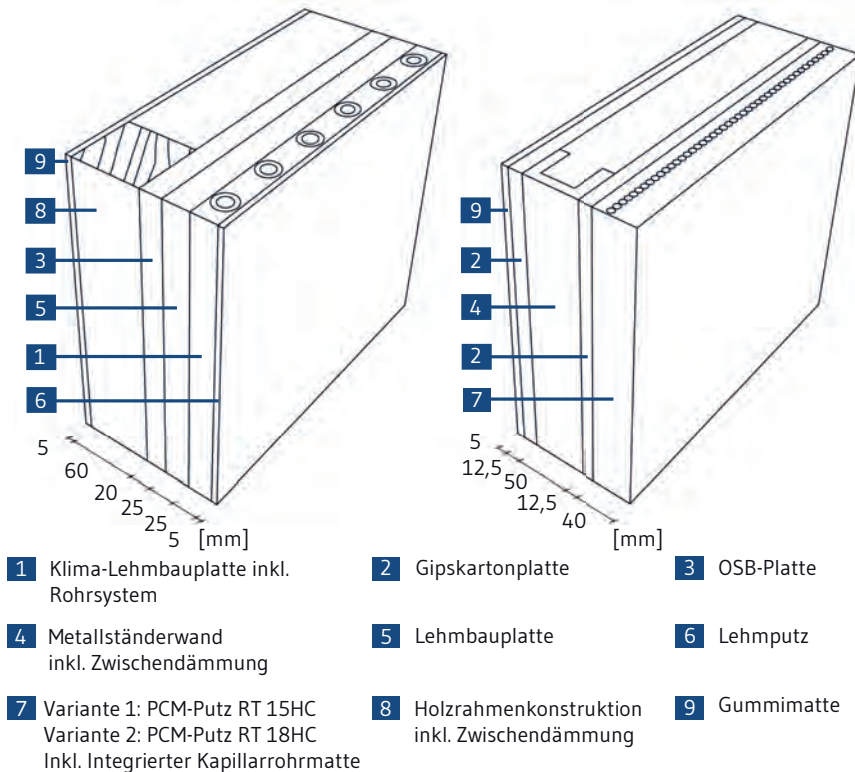


Abb. 4 Schematischer Aufbau der thermisch aktivierten Wandmodule

Die für die Energieflexibilität relevanten Bauteileigenschaften befinden sich in den raumseitigen Schichten, die der thermischen Trägheit und der Kälteübertragung dienen. Im Rahmen der nachhaltigen Variante aus Lehm wird die thermische Trägheit durch die Rohdichte ($\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$) und Wärmekapazität ($c_p = 1,0 \text{ kJ/kgK}$) erhöht. Die Kälteübertragung erfolgt über die mit Wasser durchflossenen Rohre, die mit Lehmputz überdeckt sind. Bei der Ausführung der Lehmputz-Überdeckung wurden zwei Varianten umgesetzt (eine Überdeckung mit 7 mm und eine mit 15 mm), wodurch die Kälteübertragungseigenschaften in Abhängigkeit der Überdeckung messtechnisch untersucht werden können.

Bei den beiden weiteren Wandkonfigurationen handelt es sich um thermisch aktivierte Wände mit integrierten PCM. In diesem Fall liegt der Fokus bei der Maximierung der Wärmespeicherfähigkeit durch die Anwendung von PCM im Bereich der Putzüberdeckung der Rohrsysteme. Dabei werden zwei Phasenwechselmaterialien verwendet, die sich in ihren Phasenwechseltemperaturen (Schmelz- und Erstarrungstemperatur) unterscheiden.

2.1.3 Steuerung und Energiemonitoring

Zur Steuerung und Überwachung des Raums und der versorgungstechnischen Anlagen kommen verschiedene Geräte und Plattformen zum Einsatz. Die Datenpunkte des Klimaraums laufen auf insgesamt drei Beckhoff Steuerungen auf: eine zur Überwachung der Versorgungstechnik des Raums, eine zur Steuerung der smarten Kältemaschine und eine zur Regelung der internen Wärmelast. Die Datenpunkte sind über den Datenaustausch-Standard OPC UA freigegeben. Dies ermöglicht eine hochfrequente, zentrale Steuerung und Überwachung der Aktoren und Sensoren durch die Gebäudeautomation der ETA-Fabrik. Zudem werden alle relevanten Datenpunkte in der Energiedatenbank EnEffCo der ÖKOTEC Energiemanagement GmbH gespeichert und visualisiert. Hier laufen auch die elektrischen Leistungsmessungen des Hauptanschlusses und aller Nebenaggregate auf, die von insgesamt drei Janitza-Leistungsmessgeräten aufgenommen werden. Gesteuert und überwacht wird der Klimaraum von dem SCADA-System der ETA-Fabrik, das auf der Software Atvise basiert.

2.1.4 Energieflexible Betriebsweise des Klimaraums

Der energieflexible Klimaraum der ETA-Fabrik enthält zwar energieflexible Komponenten, jedoch kann eine Energieflexibilisierung des Klimaraums nur durch eine lastmanagementgeführte Betriebsweise sichergestellt werden. Die energieflexible Betriebsweise des Klimaraums besteht aus mehreren möglichen Szenarien bzw. Betriebszuständen und hat das Ziel, die Anforderung an die Raumtemperatur nicht zu verletzen. Mithilfe des Energieleitstands und des Sensormonitorings lassen sich diese Betriebszustände überwachen und einstellen. Dabei spielen insbesondere zwei Einflussgrößen eine wesentliche Rolle, die als Daten-Inputs im 15-Minuten-Takt eingelesen werden: der aktuell vorliegende Strompreis sowie der Kühlenergiebedarf des Klimaraums. Eine Animation dieser Betriebszustände kann auf YouTube aufgerufen werden (Institut für Statik und Konstruktion, 2020). Diese Betriebszustände werden nachfolgend mithilfe der *Abbildung 5* erläutert.

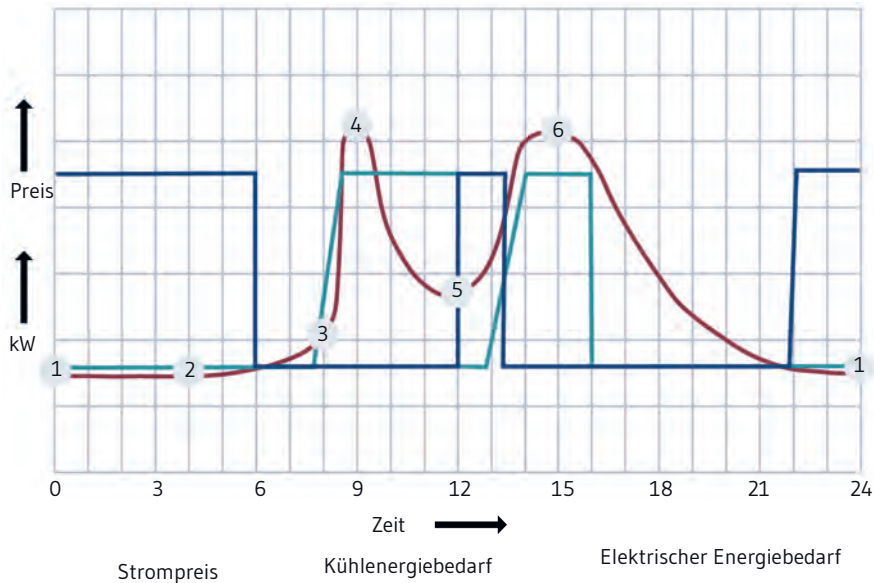


Abb. 5 Betriebszustände (1 bis 6) in Abhängigkeit von Strompreis, Kühlenergiebedarf und elektrischem Energiebedarf

- **Laden des PCM-Pufferspeichers:** Während des ersten Betriebszustands wird der Klimaraum noch nicht aktiv genutzt, wodurch kein Kühlenergiebedarf vorliegt. Zeitgleich herrschen niedrige Strompreise, sodass die Kältemaschine mit Strom gespeist und der PCM-Speicher mit Kühlenergie versorgt wird. Dies erfolgt, solange der Strompreis niedrig ist.
- **Thermische Aktivierung der Wandmodule über die Kältemaschine:** Im zweiten Betriebszustand ist der Strompreis weiterhin günstig. Nun werden die Wandmodule über die Kältemaschine thermisch aktiviert, um den Raum vor Schichtbeginn vorab zu temperieren.
- **Kältebereitstellung durch vortemperierte Wandmodule:** Im Betriebszustand 3 steigen der Strompreis und die vortemperierten Wände, die eine hohe Trägheit/Speicherkapazität aufweisen, werden als Kältespeicher genutzt und halten somit die Raumtemperatur auf einem bestimmten Temperaturniveau.
- **Thermische Aktivierung der Wandmodule über den PCM-Speicher:** Im Zuge des vierten Betriebszustands wird die Arbeit im Klimaraum aufgenommen, d. h., dass eine Abwärmequelle Wärme in den Raum emittiert. Unterdessen wird ein hoher Strompreis beobachtet, weshalb es sinnvoll ist, keinen Strom für die Kälteerzeugung zu beziehen. In dieser Zeit wird der PCM-Speicher als Kältebezugsquelle für die thermische Aktivierung der Wandmodule genutzt. Dies wiederholt sich im Betriebszustand 6.

- **Thermische Aktivierung der Wandmodule über die Kältemaschine:** Im fünften Betriebszustand fällt der Strompreis, und die Kälte wird wieder über die Kältemaschine bezogen (vgl. Betriebszustand 2). Dabei werden die Wandmodule thermisch aktiviert.

2.1.5 Simulationsmodell des Klimaraums

Im Zuge des Kopernikus-Projekts SynErgie konnten durch eine simulative Untersuchung mehrerer Betriebs- und Anlagenkonstellationen des Klimaraums Rückschlüsse auf deren Energieflexibilitätspotenzial gezogen werden. Dabei wurde die Simulationsumgebung Dymola (Modelica) verwendet. Eine optimierte Konfiguration lag dann vor, wenn das gewählte System die klimatischen Anforderungen erfüllte sowie eine hohe Energieflexibilität in Form von Stromerlösen aufweisen konnte. Im Rahmen der Anlagenkonstellation wurden wie oben beschrieben die Konfigurationen der Wandmodule, eine Lüftungsanlage sowie die Kältespeicherung über PCM-Speicher berücksichtigt. Die Ergänzung von Wandmodulen und Pufferspeicher resultiert in einer erhöhten Wärmespeicherkapazität im System, wodurch eine höhere Energieflexibilität im Gesamtsystem erzielt werden soll.

Durch die Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Intercool GmbH konnten Randbedingungen bestimmt werden, die in der Wirtschaft Anwendung finden und hier beispielhaft untersucht werden. Der Anwendungsfall I bildet bei 16 bis 18 °C Lagerhallen für Pharma- und Käseprodukte ab. Der Anwendungsfall II bildet mit 20 bis 22 °C Klima- und Messräume und der Anwendungsfall III mit 20 bis 26 °C Produktionshallen ab.

Die simulative Analyse unterliegt folgenden Randbedingungen:

- Betrachtungszeitraum: 01.06.2020 bis 10.06.2020
- Kältemaschine: 12 °C Vorlauftemperatur, 2 kW
- Klimaraum: 90 m³ Luftvolumen
- Abwärmeerzeugung: 8–12 Uhr mit 1 kW, 12–13 Uhr mit 0,5 kW, 13–16 Uhr mit 1 kW
- Wandmodulfläche: 24 m²
- Wandaufbau: bestehend aus PU-Dämmung, Kapillarrohrmatte und PCM-Putz
- Wärmespeicherkapazität Wandmodule: 206.971 kJ (bei $\Delta T = 8,4$ °C)
- Wärmespeicherkapazität Pufferspeicher: 338.280 kJ (bei $\Delta T = 6,8$ °C)
- Maximaler Volumenstrom der Lüftungsanlage primär (Medium: Glycolgemisch): 0,181 kg/s, sekundär (Medium: Luft): 0,0792 kg/s
- Maximaler Volumenstrom Wandmodule (Medium: Glycolgemisch): 0,164 kg/s
- Außentemperatur: durchschnittliche Hallentemperatur 22 °C

Die zu optimierende Zielgröße sind die in einem bestimmten Zeitraum anfallenden Stromkosten, die durch unterschiedliche Konstellationen des Anlagensystems und dessen Betriebssteuerung minimiert werden sollen. Das Energieflexibilitätpotenzial pro Energieflexibilitätsmaßnahme und Anwendungsfall wird durch die Gegenüberstellung der eingesparten Stromkosten analysiert. Je höher die Stromkosteneinsparung, desto höher das Energieflexibilitätpotenzial.

Aus der simulativen Betrachtung der einzelnen Betriebs- und Anlagenkonstellationen des Klimaraums konnte vorerst qualitativ identifiziert werden, dass der Einsatz eines Pufferspeichers mit Phasenwechselmaterialien in allen Anwendungsfällen erheblich zur Energieflexibilität beiträgt und somit die Stromkosten senkt. Im Anwendungsfall I ist eine bivalente Betriebsweise notwendig gewesen, da die Kälteübertragungsleistung der Wandmodule nicht ausreichend war, um die im Raum erzeugte Abwärme auf die Ziel-Raumtemperatur abzukühlen.

Eine große Herausforderung stellt bei der Modellierung die Steuerung der Versorgungstechnik dar. In jedem Anwendungsfall müssen kleine Stellschrauben angepasst werden, um das Modell ohne Verletzung der Anforderungen durchlaufen zu lassen. Aufgrund dessen wurde eine technisch detaillierte und wirtschaftliche Betrachtung im Anwendungsfall III durchgeführt, die in *Kapitel 2.2* näher erläutert wird.

2.2 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen

Die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Energieflexibilitätsmaßnahmen und deren energieflexiblen Betrieb können in Anwendungsfall III aufgezeigt werden. Dieser stellt eine vielversprechende Anwendung in der Industrie dar, in der die untersuchten Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Klimatisierung implementiert werden könnten.

Ziel der Untersuchung ist es, die Energieflexibilitätsmaßnahmen und deren Varianten nach derselben Strompreiskurve zu optimieren, um das jeweilige Energieflexibilitätpotenzial miteinander vergleichen zu können. Dabei wird angenommen, dass die Energieflexibilität direkt mit der Stromkosteneinsparung korreliert, die somit die Zielgröße darstellt. Die Annahme beruht darauf, dass eine Optimierung (Steuerung und Speichertechnik) des Systems nach günstigen Strompreisen ausgelegt werden sollte, damit eine hohe Energieflexibilität erreicht werden kann.

Für diese Untersuchung werden die Großhandelsstrompreise der EEX aus dem Jahr 2020 herangezogen. Die Simulationsdauer wird auf ein Jahr erhöht, um saisonale Preisschwankungen mit zu berücksichtigen. Die Außentemperatur der Halle wurde auf 26 °C angehoben, um Kühlbetrieb zu gewährleisten. Als Referenz dient die konventionelle Lüftungsanlage mit reiner Hysterese-Steuerung zwischen 20 °C und 26 °C. Für die weiteren untersuchten Varianten berechnet ein Kühlalgorithmus nach dem aktuellen Strompreis und den thermischen Anforderungen des Raums ein Steuerungssignal (an/aus) für den Kältekreis. Die Regelstrategie beinhaltet erneut eine Hysterese-Steuerung zwischen 20 °C und 26 °C für die Lüftungsanlage und die Wandmodule, zusätzlich jedoch auch die

strompreisgeführte Komponente, die den Kältekreis zur Vorkonditionierung des Raums unterhalb eines Strompreises von 15 €/MWh aktiviert. Der Pufferspeicher wird hingegen nur über eine strompreisgeführte Steuerung (< 34 €/MWh) mit der Kälteanlage verbunden.

2.2.1 Ergebnis

Als Referenzvariante dient eine konventionell gesteuerte Lüftungsanlage nach Temperaturanforderung im Kühlbetrieb. In V1 wird die Referenzvariante mit der strompreisgeführten Steuerung und in V1+SP mit dem PCM-Speicher erweitert. Für V2 wird der strompreisgeführte monovalente Betrieb der Wandmodule modelliert und in V2+SP mit dem PCM-Speicher erweitert.

Tab. 3 Simulationsergebnisse aus Anwendungsfall III 20–26 °C

Anlagenkonstellation	Anwendungsfall III 20–26 °C		
	Stromkosten [€/a]	Energiebedarf [kWh]	Rel. Stromkosteneinsparung ggü. Referenz
Referenz: Monovalent Lüftung	33,21	1.070	0,0 %
V1: Monovalent Lüftung (strompreisgef. Steuerung)	32,83	1.082	1,1 %
V2: Monovalent Wandmodule (strompreisgef. Steuerung)	28,42	1.369	14,4 %
V1 + Speicher	25,52	1.158	23,2 %
V2 + Speicher	24,27	1.430	26,9 %

Aus Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass die strompreisgeführte Steuerung der Referenzvariante nur geringfügig zu einer Erhöhung der Energieflexibilität führt. Das Modell der strompreisgeführten Wandmodule (V2) kann hier jedoch eine deutliche Steigerung des Energieflexibilitätspotenzials um 14,4 Prozent aufzeigen, das mit der erhöhten inhärenten Speicherkapazität im System zusammenhängt. Bei Hinzunahme des PCM-Speichers kann in beiden Varianten ein hohes Energieflexibilitätspotenzial erreicht werden. In allen Varianten fällt auf, dass der Energiebedarf mit steigender Energieflexibilität zunimmt. Dieses Verhalten ist auf die höheren thermischen Verluste durch Be- und Entladung des Speichers oder der Wandmodule zurückzuführen.

2.2.2 Fazit

Da für diese Analyse Strompreise ohne zusätzliche Abgaben, Umlagen und Netzentgelte angenommen werden, fällt der Erlös von 8,94 €/a sehr gering aus. Es ist anzumerken, dass die eingesetzte installierte Leistung der im Klimaraum befindlichen Kälteanlage maximal 2 kW beträgt und der Erlös bei größeren Anlagen entsprechend größer ausfallen würde. Außerdem ist der Erlös davon abhängig, welche

Stromeinkaufsstrategie das jeweilige Unternehmen wählt. Aufgrund dessen ist eine abschließende wirtschaftliche Bewertung nicht möglich. Diese Untersuchung zielt darauf ab, wie hoch das Energieflexibilitätspotenzial der untersuchten Varianten im Vergleich zu einer bestimmten Referenz ausfällt. Auf Grundlage dieser Simulation können jedoch Hochrechnungen und Abschätzungen über ähnliche Anwendungsfälle getätigt werden.

3 Energieflexible Klimatisierungs- und Raumlufttechnik bei B+T GmbH

Autoren: Vogt · Herrmann

Zur Untersuchung des Energieflexibilitätspotenzials in der industriellen Klimatisierungs- und Raumlufttechnik wird ein Galvanikbetrieb bei der B+T Oberflächentechnik GmbH betrachtet. Im Folgenden wird die ausgewählte Flexibilitätsmaßnahme vorgestellt und die technische als auch eine wirtschaftliche Bewertung am Beispiel des industriellen Umsetzungspartners vorgestellt.

3.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme

Wie bereits in *Kapitel 1.2* vorgestellt, ist B+T Oberflächentechnik GmbH ein mittelgroßer Galvanikbetrieb in Deutschland und führt primär Zink-Nickel-Beschichtungen in einer vollständigen galvanischen Prozesskette, einschließlich Vor- und Nachbehandlung, durch. Bei der Oberflächenbeschichtung der metallischen Bauteile in den Galvanikbecken können verschiedene Emissionen, neben Feinstaubpartikeln auch verschiedene Chemikalien, wie zum Beispiel Chromsäure, Salpetersäure, nitrose Gase und Fluorchlorkohlenwasserstoffe, in die Umgebungsluft freigesetzt werden. Daher ist zum Schutz der Mitarbeitenden eine RLT-Anlage in unmittelbarer Nähe der Galvanikbecken während der Produktionszeiten zwingend erforderlich. Entsprechend ist auch eine Änderung des Betriebs der RLT-Anlage als auch der Galvanikbecken stark an die momentane Auftragslage am Standort geknüpft. Ist die Auftragslage geringer, können die RLT-Anlage und die Galvanikbecken ihre Last stark reduzieren. Da die Auftragslage unterschiedlich sein kann, sich nur bedingt präzisieren lässt und stets Unwägbarkeiten vorhanden sind, ist eine vollautomatisierte Lastreduktion in Abhängigkeit der Auftragslage nur bedingt sinnvoll. Daher ist die technische Umsetzung der Lastreduktion in Abhängigkeit der Auftragslage im Anwendungsfall bei der B+T Oberflächentechnik GmbH bevorzugt nur manuell sinnvoll umsetzbar, dafür dann aber in der Regel für längere Zeiträume je Lastreduktion (~24 h/Woche). Eine manuelle Umsetzung in diesem Zusammenhang bedeutet, dass der Betreiber eine Änderung des Anlagenbetriebs remote oder direkt am Bedienpanel der Anlage vornimmt. Um die manuelle Umsetzung der Lastreduktion und deren Auswirkungen auf die Umgebungsluft im Zusammenspiel mit den RLT-Anlagen bei den Galvanikbecken analysieren zu können, wurden an verschiedenen Stellen im Werk (*Abbildung 6*) entsprechende Messtechnik zur Luftkonditionsmessung installiert, wobei der Betrachtungsfokus hier auf dem Galvanik-Hallenteil liegt. Diese Multifunktionsmessknoten sind in der Lage kontinuierlich Messgrößen wie die Temperatur, Feuchtigkeit, Luftströmung (in drei Dimensionen), Feinstaubpartikel, CO₂-Gehalt als auch flüchtige organische Verbindungen zu erfassen

und in entsprechende Datenbanken zu speichern. Hierdurch entsteht eine hohe Transparenz in Bezug auf die Luftkondition und Luftströmungsausbreitung, wodurch dann Energieflexibilitätsmaßnahmen der Lastreduktion in Abhängigkeit der Auftragslage genauer bewertet werden können.



Abb. 6 Technologischer Aufbau zur Luftkonditionsmessung bei der B+T Oberflächentechnik GmbH

3.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme

Im Anwendungsfall wird nach VDI 5207 Blatt 2 die Zielsetzung verfolgt, Energieflexibilität durch die Lastreduktion in Abhängigkeit der Auftragslage extern anzubieten. Auch bei der manuellen Lastreduktion können IKT-seitige Hemmnisse auftreten. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn eine Drosselung der RLT-Anlage nicht umgesetzt werden kann, wenn keine Frequenzumrichter in den Ventilatoren verbaut sind oder wenn Sollwerte für Temperaturregelungen nicht angepasst werden können. Da im betrachteten Fall die Anlage (RLT-Anlage und Galvanikbecken) bei geringer Auftragslage im Zweifelsfall auch ohne Drosselung komplett abgeschaltet werden kann, sind die IKT-seitigen Hemmnisse als gering einzustufen.

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Energieflexibilitätsmaßnahme der Lastreduktion werden folgende Überlegungen angestellt: Je Galvaniklinie kann durch Lastverzicht mit einer Leistung von 172 kW gerechnet werden. Bei einer Abschaltdauer von 24 Stunden und 52 Abrufen pro Jahr (Tabelle 2) ergibt sich ein Potenzial von 214,7 MWh pro Jahr. Bezogen auf das Werk sind das pro Jahr 429,3 MWh an elektrischer Leistung, da am Standort zwei Galvaniklinien vorhanden sind. Bei Stromkosten von 0,2 €/kWh (Valev, 2019) ergeben sich so durch den Lastverzicht erwartete Erlöse in Höhe von 85.860 Euro.

Insgesamt kann die Wirtschaftlichkeit der Energieflexibilitätsmaßnahme bei B+T als sinnvoll eingestuft werden. Falls es die Auftragslage erlaubt, können diese Zeiträume zum Anbieten von Energieflexibilität genutzt und so Umsätze für das Unternehmen generiert werden. Als nachteilig sind die geringe Planbarkeit sowie die manuelle Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahme zu sehen. Durch das manuelle Abschalten der Anlage in Abhängigkeit der Auftragslage sind zusätzliche Personalkosten erforderlich, die allerdings durch entsprechende Einnahmen durch die Energieflexibilitätsmaßnahme wieder kompensiert werden könnten.

4 Literatur

AHMED, T., A.S. FUNG und R. KUMAR, 2020. Energy benchmarking and ventilation related energy saving potentials for SMEs in Greater Toronto Area [online]. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118961. ISSN 09596526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2019.118961

GRUBER, A. M., U. WAGNER und H. BRADKE, 2017. Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien [online]: Universitätsbibliothek der TU München.

HAO, H., A. KOWLI, Y. LIN, P. BAROOAH und S. MEYN, 2013. Ancillary service for the grid via control of commercial building HVAC systems. In: 2013 American Control Conference (ACC 2013). Washington, DC, USA, 17 – 19 June 2013. Piscataway, NJ: IEEE, S. 467–472. ISBN 978-1-4799-0178-4.

HESSELBACH, J., C. HERRMANN, R. DETZER, L. MARTIN, S. THIEDE und B. LÜDEMANN, 2008. Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services. 15th Conference on Life Cycle Engineering, Sydney Australia. 15th Conference on Life Cycle Engineering, Sydney, Australia.

INSTITUT FÜR STATIK UND KONSTRUKTION, 2020. Energieflexibler Klimaraum in der ETA-Fabrik [online] [Zugriff am: 8. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=sRCRmNtZoOE>

KAUP, C., 2009. Elektroenergiebedarf von RLT-Geräten und deren Potenziale zur Energieeinsparung.

KEMMLER, A., S. STRASSBURG, F. SEEFELDT, N. ANDERS, C. ROHDE, T. FLEITER, A. AYDEMIR, H. KLEEBERGER, L. HARDI und B. GEIGER, August 2016. Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005–2014.

RECKNAGEL, H., E. SPRENGER und E.-R. SCHRAMEK, Hg., 2007. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: Vulkan-Verlag GmbH.

SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

STATISTISCHES BUNDESAMT, 2008. Klassifikation der Wirtschaftszweige [online]. Wiesbaden. 3100100-08900-4. Verfügbar unter: www.destatis.de

VALEV, N., 2019. GlobalPetrolPrices: Electricity prices for businesses. Verfügbar unter: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

VOGT, M. und C. HERRMANN, 2021. Energy efficiency of technical building services in production environments–Application to dry rooms in battery production [online]. CIRP Annals, 70(1), 21–24. ISSN 00078506. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.cirp.2021.03.020](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.03.020)





C.7

Prozesskälte

Management Summary

In diesem Kapitel werden Energieflexibilitätspotenziale und ausgewählte Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesskälteversorgung in der Lebensmittel- und Automobilindustrie beschrieben. Da Kompressionskältemaschinen elektrische Energie nutzen, um Kälte zu erzeugen, können insbesondere thermische Energiespeicher zur Flexibilisierung genutzt werden. Untersuchungen bei der DMK Group zeigen, dass die Nutzung volatiler Strompreise beim Energiebezug zur Kühlung verschiedener prozessinterner Kältespeicher, beispielsweise einem Käselager, ein Kostenreduktionspotenzial von über zehn Prozent an der Kältemaschine bewirkt. Des Weiteren wird gezeigt, wie Sprinklertanks bei der Mercedes Benz AG als Kältespeicher zum Peak-Shaving genutzt werden können. Ein dritter Anwendungsfall zeigt auf, wie die inhärenten Kältespeicher der Badischen Staatsbrauerei Rothaus AG zur energieflexiblen Prozesskältebereitstellung genutzt werden können, was zu einer Reduktion der Kältebereitstellungskosten um bis zu 9 Prozent führt.

Autoren

Aselmann, Peter
peter.aselmann@rothaus.de
Badische Staatsbrauerei Rothaus AG
Rothaus 1, 79865 Grafenhausen-Rothaus

Bianchini, Isabella
isabella.bianchini@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Dietrich, Bastian
b.dietrich@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Emde, Alexander
alexander.emde@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Hinck, Torben
torben.hinck@dmk.de
DMK Group
Industriestraße 27, 27404 Zeven

Hofmann, Philipp
philipp.hofmann@daimler.com
Mercedes Benz AG
Benzstraße, 71059 Sindelfingen

Moske, Jonas
info@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Sauer, Alexander
alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Scheil, Claudia
claudia.scheil@dmk.de
DMK Group
Industriestraße 27, 27404 Zeven

Seyed Sadjjadi, Bijan
bijan.seyed.sadjjadi@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Sossenheimer, Johannes
j.sossenheimer@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

von Hayn, Adrian
a.hayn@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Weigold, Matthias
weigold@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

1 Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung

Autoren: Sossenheimer · Dietrich · von Hayn · Weigold

1.1 Energieflexible Prozesskältebereitstellung

Im Jahr 2017 betrug der Endenergiebedarf für Kältetechnik in Deutschland rund 87 TWh, wovon 73 TWh mit elektrischem Strom erzeugt wurden. Das entsprach einem Anteil von etwa 14 Prozent am gesamten deutschen Strombedarf in diesem Zeitraum. Davon entfielen etwa die Hälfte auf Industriekälte (14 Prozent), Nahrungsmittelherstellung (8 Prozent) und Klimakälte (26 Prozent) (Institut für Luft- und Kältetechnik, 2019).

Prozesskälte wird in der Regel über strombetriebene Kompressionskältemaschinen erzeugt (Institut für Luft- und Kältetechnik, 2019). Um Produktions- und Lagerprozesse zu kühlen, wird die erzeugte Prozesskälte von einem anlageninternen Kältemittelkreislauf auf einen Sekundärkreislauf übergeben. Die Rückkühlung der Kältemaschine erfolgt üblicherweise über Nass- oder Trockenkühltürme. Neben klassischen Kompressionskältemaschinen werden auch Absorptionskältemaschinen eingesetzt, welche mit Abwärme oder fossilen Brennstoffen betrieben werden.

Da industrielle Prozesskälte überwiegend elektrisch erzeugt wird, liegen hier große Energieflexibilitätspotenziale. Viele Prozesse mit einem hohen Kältebedarf, z. B. gekühlte Flüssigkeitstanks oder Produktlager, verfügen über inhärente Speicherkapazitäten. Diese prozessinternen Kältespeicher entkoppeln die Nutzenergiebereitstellung vom Nutzenergiebedarf der Produktion. Dadurch wird eine energetische Flexibilisierung der Kältebereitstellung ermöglicht, indem die thermischen Energiespeicher zwischen den zulässigen Grenztemperaturen energieflexibel gekühlt werden (Strobel, 2021).

1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung

Typische Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesskältebereitstellung sind das (inhärente) Speichern von thermischer Energie und organisatorische Eingriffe wie die Unterbrechung von Kühlprozessen.

Nachfolgend wird die technische Umsetzung und wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesskälteversorgung in unterschiedlichen Industriebranchen beschrieben. *Tabelle 1* gibt einen Überblick über vielversprechende Energieflexibilitätsmaßnahmen bei Industrieunternehmen verschiedener Branchen.

Tab. 1 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesskältebereitstellung

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Energie speichern im Käselager	DMK Group	Lebensmittelindustrie
Energie speichern in Eiswasserbecken	DMK Group	Lebensmittelindustrie
Energie speichern in Salzwasserbecken	DMK Group	Lebensmittelindustrie
Energie speichern in Sprinklerbecken und neuem thermischen Speicher	Mercedes Benz AG	Automobilindustrie
Bierkühlungsprozess unterbrechen	Badische Staatsbrauerei Rothaus AG	Lebensmittelindustrie
Energie speichern in Kaltwasserspeicher	Badische Staatsbrauerei Rothaus AG	Lebensmittelindustrie

1.3 Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der DMK Group

Die DMK Group ist eines der größten Molkereiunternehmen Europas. Neben dem Kerngeschäft, der Veredelung von Rohmilch zu diversen Molkereiprodukten und Käse, werden Eis, Babynahrung sowie Zutaten für die weiterverarbeitende Lebensmittelindustrie erzeugt. Dazu gehören auch zunehmend Grundstoffe für Nahrungsmittel aus pflanzlichen Rohstoffen.

Im Rahmen des seit 2011 laufenden Nachhaltigkeitsprogramms der DMK Group werden konkrete Ziele in über 20 Aktionsfeldern verfolgt. Ein besonders wichtiges Thema ist hierbei die Energie- und Ressourceneffizienz an den Produktionsstandorten, die im Rahmen des Energie- und Umweltmanagements nach DIN EN ISO 50001 und DIN EN ISO 14001 systematisch verbessert wird.

Vielversprechende Energieflexibilitätpotenziale im Bereich der Prozesskälteversorgung finden sich in den klimatisierten Lagern, in denen große Käsemengen zum Teil über mehrere Monate lagern, in den Salzwasserbecken, welche zur Aufsalzung der Käselaipe wie auch zur Rindenbildung benötigt werden, und in den Eiswasserspeichern des Kälteversorgungssystems.

1.4 Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei Mercedes-Benz

Die Mercedes-Benz AG mit Hauptsitz in Stuttgart zählt zu den weltweit führenden Herstellern von Premium-Pkw über alle Segmente, von Kompaktwagen über Limousinen bis hin zu SUV. Das Unternehmen hat den Anspruch, als Pionier in Fahrzeugtechnik, -qualität und -sicherheit zu gelten. Wo die Marktbedingungen es zulassen, will der deutsche Automobilhersteller bereits ab 2030 ausschließlich batterie-elektrische Fahrzeuge verkaufen.

Als zentraler Bestandteil der Nachhaltigkeitsstrategie hat die Mercedes-Benz AG klare Ziele zur Verbesserung des Klimaschutzes, der Luftqualität und des Ressourcenverbrauchs gesetzt. So soll beispielsweise im Rahmen der Ambition 2039 bis zum Jahr 2039 die gesamte Neuwagenflotte des Unternehmens CO₂-neutral produziert werden. Außerdem soll der Energieverbrauch pro Fahrzeug von 2013/2014 bis 2030 um 43 Prozent reduziert werden.

Vielversprechend zur Erhöhung der Energieflexibilität eines Automobilwerks ist die Nutzung vorhandener Sprinklertanks als Energiespeicher beziehungsweise die Integration neuer Kältespeicher im Energiesystem. Diese ermöglichen die Entkoppelung der Kälteerzeugung, welche größtenteils über Kompressionskältemaschinen erfolgt, vom Kälteverbrauch der Prozessanlagen oder Klimatisierung. Dies erlaubt die Verschiebung von Lastspitzen für Peak Shifting oder atypische Netznutzung, ohne den Produktionsprozess zu beeinflussen. Weitere Chancen der Nutzung von Kältespeichern liegen sowohl in der Erhöhung des Wirkungsgrads einzelner Kältemaschinen als auch in einer möglichen Teilnahme an Energiemärkten (z. B. Regelenergiemarkt und Spotmarkt).

1.5 Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der Badischen Staatsbrauerei Rothaus

Die Badische Staatsbrauerei Rothaus AG hat ihren Sitz im Hochschwarzwald. Mit einem einzigen Produktionsstandort und einem Marktanteil in Deutschland von etwa 1 Prozent ist sie eine mittelgroße Brauerei. Gebraut werden verschiedene Biere, darunter auch alkoholfreie Sorten.

Als Hersteller reiner Naturprodukte legt die Rothaus Brauerei schon seit Jahrzehnten großen Wert auf Nachhaltigkeit und Bewahrung der Umwelt. So wurde der Standort bereits 2008 auf eine nachhaltige Wärmeversorgung mittels Holzhackschnitzeldampfkessel umgestellt. Mit dieser aktuell größten in Brauereien eingesetzten Biomasseheizung wurden im Jahr 2016 etwa 3.200 Tonnen CO₂ eingespart. Die Rothaus-Brauerei setzt zudem auf neuste Produktionsanlagen mit hoher Effizienz und bezieht 100 Prozent regionalen Ökostrom. Mithilfe eines Umweltmanagementsystems nach DIN EN ISO 14001 und eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001 kann der Energiebedarf erfasst und optimiert werden (Badische Staatsbrauerei Rothaus AG, 2021).

Für die verschiedenen Arbeitsschritte des Brauprozesses wird vor allem Wärme- und Kälteenergie unterschiedlicher Temperaturbänder benötigt. Die Flexibilisierung der Kälteerzeugung zur Kühlung des Biers steht hierbei im Fokus, da etwa 97 Prozent der benötigten Kälte in der Brauindustrie durch Kompressionskältemaschinen elektrisch erzeugt wird (Institut für Luft- und Kältetechnik, 2019). Als Energieflexibilitätsmaßnahmen werden im Detail die Unterbrechung des Kühlprozesses nach der Nachgärung und vor der Lagerung des Biers und die inhärente Energiespeicherung in den großen Bierlagertanks untersucht. Hier liegen hohe Energieflexibilitätpotenziale vor und es ist kaum ein Einfluss auf die Lebensmittelqualität zu erwarten.

2 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

Zur Ermittlung der Energieflexibilitätspotenziale in Deutschland wurden die quantifizierten Potenziale der Prozesskältebereitstellung von der Standortebene auf den Wirtschaftszweig hochgerechnet. Als Faktor für die Hochrechnung diente hierbei der Anteil des elektrischen Energiebedarfs des betrachteten Unternehmens am Gesamtenergiebedarf des Wirtschaftszweigs. Um ein valides Ergebnis zu gewährleisten, wurde eine maßnahmenspezifische Hochrechnung durchgeführt. Die im Folgenden genannten kumulierten Energieflexibilitätspotenziale ergeben sich aus den in *Tabelle 2* gelisteten maßnahmenspezifischen Einzelpotenzialen.

Tab. 2 Energieflexibilitätspotenziale ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesskältebereitstellung

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Energie speichern im Käselager	6 MW Abrufdauer: max. 21 h Abrufhäufigkeit: ca. 300-mal pro Jahr
Energie speichern in Eiswasserbecken	3 MW Abrufdauer: max. 15 min Abrufhäufigkeit: ca. 17.500-mal pro Jahr
Energie speichern in Salzwasserbecken	3 MW Abrufdauer: max. 15 h Abrufhäufigkeit: ca. 500-mal pro Jahr
Energie speichern in Sprinklerbecken oder in einem neuen thermischen Speicher	50 MW Abrufdauer: max. 8 h Abrufhäufigkeit: bis zu 250-mal pro Jahr
Bierkühlungsprozess unterbrechen	13 MW Abrufdauer: wöchentlich 96 h Abrufhäufigkeit: 52-mal pro Jahr
Energie speichern im Kaltwasserspeicher	13 MW Abrufdauer: 12 h Abrufhäufigkeit: ca. 260-mal pro Jahr

Mit den identifizierten Energieflexibilitätspotenzialen wurde bei der Brauerei Rothaus ein maßnahmenspezifisches Energieflexibilitätspotenzial von 822 MWh/a quantifiziert. Auf Basis des relativen Energiebedarfs des Standortes von 0,8 Prozent (bezogen auf den gesamten Wirtschaftszweig) konnte für den deutschen Wirtschaftszweig der Biererzeugung ein Energieflexibilitätspotenzial von insgesamt 103 GWh/a ermittelt werden.

Analog hierzu wurde für die Automobilindustrie maßnahmenspezifisch ein Energieflexibilitätspotenzial von insgesamt 9,5 GWh/a für die maximale Lastbereitstellung und ein Potenzial von 415 GWh/a für die maximale Abrufdauer ermittelt.

Die Hochrechnung des Energieflexibilitätspotenzials von drei Energieflexibilitätsmaßnahmen am betrachteten DMK-Standort auf das milchverarbeitende Gewerbe beträgt 73 GWh/a.

3 Prozesskälteversorgung im milchverarbeitenden Gewerbe

Autoren: Dietrich · Sossenheimer · Scheil · Hinck

Die Herstellungskosten der Endprodukte im milchverarbeitenden Gewerbe werden signifikant beeinflusst von der Energieintensivität der Produktionsprozesse für die Milchveredelung. Wichtig ist vor allem die Einhaltung von Qualitätsstandards. Bei allen Milcherzeugnissen müssen in jedem Verarbeitungsschritt individuell definierte Erhitzungs- und Abkühlprozesse eingehalten werden, um die gewünschten Produkteigenschaften herzustellen und gleichzeitig das Wachstum unerwünschter Bakterienstämme zu verhindern. Ebenfalls muss im gesamten Verlauf – von der Lagerung bis zum Vertrieb – die lückenlose Kühlkette eingehalten werden. Hieraus leiten sich Anforderungen an die Flexibilisierung der Prozesskälteversorgung ab. Die im Folgenden beschriebenen Energieflexibilitätsmaßnahmen und Ergebnisse basieren auf VDI (2021).

3.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Bei Produktionsstandorten der Milchindustrie entfallen in der Regel 20 bis 30 Prozent des elektrischen Energiebedarfs auf die Prozesskältebereitstellung. Für die Bereitstellung der Kälteleistung werden in der Molkereiindustrie (wie auch in anderen Sparten der Lebensmittelindustrie) NH_3 -Kältemaschinen verwendet. Eine solche Anlage ist beispielhaft in *Abbildung 1* abgebildet.



Abb. 1 NH_3 -Kältemaschine (l.) eines Salzbeckens (r.) (DMK Group, VDI 2021)

Eine häufig an Molkereistandorten auffindbare Kältesystemkonfiguration ist in *Abbildung 2* abgebildet. Typischerweise erzeugt eine NH_3 -Kältemaschine durch Einsatz elektrischer Energie Kälte in einem NH_3 -Kreislauf und überträgt diese durch einen Wärmeübertrager an einen Wasser-Glykol-Kreislauf. Dieser versorgt zugleich die gekühlten Lager und ein Eiswasserbecken (in der Literatur auch Eisspeicher genannt), welches wiederum verschiedene Produktionsprozesse (beispielsweise Aufsalzungsbecken) mit Prozesskälte versorgt.

Die dargestellte Systemkonfiguration führt durch die häufigen Energieumwandlungs- und Übertragungsvorgänge zwar zu einigen Energieeffizienzverlusten, ermöglicht jedoch eine vorteilhafte Auslegung der Kältemaschine hinsichtlich Dimensionierung und Lastverhalten. Durch die Integration des Eiswasserbeckens wird sichergestellt, dass kein Kontakt zwischen Kältemittel und Produkt entsteht, was für die Lebensmittelsicherheit unerlässlich ist. Die Kälteanlagen sind meist kaskadiert geregelt, indem zur Deckung von Grundlasten und Lastspitzen bei unterschiedlichen Anforderungsprofilen Gruppen konstant- oder drehzahl geregelter Kompressoren zu- oder weggeschaltet werden.

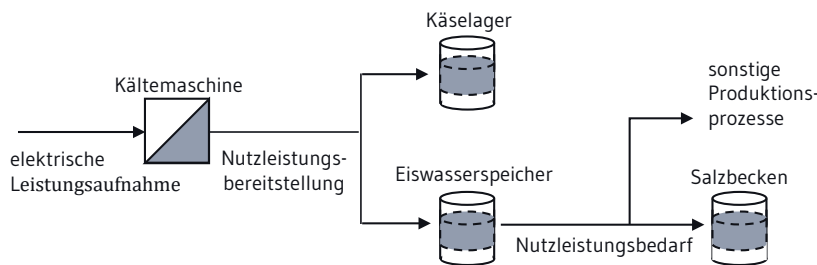


Abb. 2 Darstellung eines typischen Kältesystems am Standort eines Molkereibetriebs (angelehnt an Strobel, 2021 und VDI, 2021)

Das Vorgehen zur Identifizierung der Energieflexibilitätspotenziale erfolgte bei der DMK Group nach VDI 5207-2. Im ersten Schritt wurde hierfür das technische Potenzial vielversprechender Kältespeicher und -verbraucher bewertet. Darauf aufbauend erfolgte die wirtschaftliche Potenzialabschätzung, die im Folgenden genauer beschrieben wird.

Für die energetische Flexibilisierung eignen sich besonders temperaturtrüger Kälteverbraucher mit großen thermischen Speicherkapazitäten. Dabei werden insbesondere die prozessinternen Speicherkapazitäten ausgenutzt, die sich zum Beispiel durch den Spielraum zwischen einer zulässigen oberen und unteren Temperaturgrenze eines Kälteprozesses ergeben. Die Kälteerzeugung kann dann innerhalb dieser vorgegebenen Temperaturgrenzen flexibel betrieben werden, um so auf schwankende Strompreise oder das Angebot an erneuerbaren Energien reagieren zu können. Bei der DMK Group liegen die größten technischen Flexibilisierungspotenziale in den klimatisierten Lagern mit großer

Produktmenge, den Eis- bzw. Eiswasserspeichern und den großen Salzwasserbecken, in denen während der Käseproduktion die Aufsatzung der Käselaipe und die Rindenbildung erfolgt (*Abbildung 1* rechts).

Zur ersten Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials der drei oben genannten Kältespeicher werden diese analog zu VDI 5207 Blatt 2 anhand der beiden Kenngrößen Leistungsindikator (LI) und Zeitindikator (ZI) bewertet. Der Leistungsindikator ist ein Maß für die flexibilisierbare Leistung (ΔP). Der Zeitindikator beschreibt die Dauer (Δt), in welcher die Anlage für mögliche Energieflexibilitätsmaßnahmen (in dem Fall Energiespeicherung) zur Verfügung steht.

Das Kältesystem in *Abbildung 2* hat eine elektrische Anschlussleistung von 600 kW, eine gemittelte elektrische Leistungsaufnahme von 200 kW bei durchschnittlich 5.000 Jahresbetriebsstunden und eine Leistungszahl von 3. Hieraus ergibt sich ein Zeitindikator von 5.000 h/a und ein Leistungsindikator zwischen 33 und 107 kW, welcher die maximal abrufbare elektrische Leistung abzüglich des von anderen Prozessen benötigten Grundlastkältebedarfs beschreibt. Die Ergebnisse der technischen Potenzialanalyse sind in *Tabelle 3* zusammengefasst.

Tab. 3 Übersicht der Ergebnisse der technischen Potenzialanalyse am betrachteten Produktionsstandort

Energieflexibilitätsmaßnahme	Leistungsindikator	Zeitindikator
Energie speichern im Käselager	91 kW	5.000 h/a
Energie speichern im Eiswasserbecken	107 kW	5.000 h/a
Energie speichern im Salzwasserbecken	33 kW	5.000 h/a

3.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Übergeordnet verfolgt die DMK Group das Ziel, mit der flexiblen Steuerung der Kälteerzeugung auf volatile Energiepreise reagieren zu können und damit CO₂ und Energiekosten zu reduzieren. Die CO₂-Emissionen reduzieren sich, da bei geringem Strompreis meist auch der CO₂-Fußabdruck des Strommixes geringer ist. Dies ergibt sich daraus, dass bei erhöhtem Anteil erneuerbarer Energien der Großhandelsstrompreis sinkt (Rövekamp et al., 2021). Eine externe Vermarktung der Flexibilitäten ist aufgrund von Restriktionen hinsichtlich der IKT-Anbindung und insbesondere hinsichtlich der Schaltung von Anlagen durch externe Teilnehmer nicht geplant.

Dabei gestaltet sich der Aufwand zur Befähigung der Anlagen je nach Standort unterschiedlich. Am untersuchten Standort besteht bereits ein übergeordnetes Leitsystem, mit dem die Klimatisierung der Produktlager aufwandsarm flexibilisiert werden kann. Andere Standorte besitzen ein solches System jedoch nicht. Es müssen neben dem Leitsystem auch Sensoren nachgerüstet werden, die den aktuellen Zustand des Energiespeichers und der Kälteversorgung präzise und zuverlässig abbilden. Nicht zuletzt müssen genaue Prognosen zum Kältebedarf erstellt werden, um den flexiblen Betrieb zu gewährleisten.

Neben den oben genannten technischen Hemmnissen bestehen bei der Befähigung zum flexiblen Betrieb insbesondere Hemmnisse im organisatorischen Bereich. So muss die Produktqualität zu jeder Zeit gesichert sein, weshalb ein Eingriff in die Produktionsprozesse (betrifft Eiswasserbecken und Salzwasserbecken) im ersten Schritt ausgeschlossen wurde.

Um das wirtschaftliche Energieflexibilitätpotenzial der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen zu ermitteln, wurde mithilfe des E-Flex-Scanners des SynErgie-Projekts eine simulierte Betriebsoptimierung der Kältemaschinen durchgeführt (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2021). Dafür wurden eine ideale Kältebedarfsprognose sowie viertelstundenscharfe Day-Ahead-Strompreise der Jahre 2017 bis 2019 angenommen. Dies deckt sich mit dem Ziel der DMK Group, von schwankenden Strompreisen zu profitieren. Die Auswertung zeigt, dass bei einem energieflexiblen Betrieb des Käselagers mit 4.000 Tonnen eingelagertem Käse und des Salzwasserbeckens mit 1.000 m³ Fassungsvermögen jeweils etwa 1 ct/kWh eingespart werden kann. Die Flexibilisierung des Eiswasserbeckens mit 180 m³ Fassungsvermögen ermöglicht Einsparungen von 0,2 ct/kWh. Für die Berechnung der prozentualen Energiekostenreduktion des Kälteaggregats wurde ein Brutto-Strompreis von 10 ct/kWh angenommen.

Aufgrund der organisatorischen Hemmnisse bei der Flexibilisierung des produktionsnahen Salzwasserbeckens bieten daher aktuell die Käselager die größten umsetzbaren wirtschaftlichen Energieflexibilitätpotenziale.

Tab. 4 Übersicht der Ergebnisse der wirtschaftlichen Energieflexibilitätpotenziale am betrachteten Produktionsstandort

Energieflexibilitätsmaßnahme	Brutto-Energiekostenreduktion	Prozentuale Reduktion der Brutto-Energiekosten
Energie speichern im Käselager	1,0 ct/kWh	10%
Energie speichern im Eiswasserbecken	0,2 ct/kWh	2%
Energie speichern im Salzwasserbecken	1,1 ct/kWh	11%

4 Energieflexible Prozesskälteversorgung in der Automobilindustrie

Autoren: Seyed Sadjjadi · Emde · Bianchini · Hofmann · Sauer

Innerhalb des Produktionsprozesses eines energieflexiblen Automobilwerks kommt der Prozesskälteversorgung eine wichtige Rolle zu. Schon jetzt stellt die Prozesskälteversorgung ein großes Potenzial zur Flexibilisierung der energetischen Last innerhalb des Produktionsprozesses dar. Die Prozesskälte wird hierbei zentral oder dezentral mithilfe verschiedener Kältemaschinen bereitgestellt und über ein wassergeführtes Versorgungsnetz in Ringform an die verschiedenen Abnahmestellen transportiert. Im Vorlauf des Kälteversorgungsnetzes des Referenzsystems wird typischerweise eine Temperatur von 8 °C erreicht, und die Rücklauftemperatur des Kälteversorgungssystems beträgt 16 °C. Für eine sichere und durchgehende Produktion ist es wichtig, diese Parameter zu jedem Zeitpunkt einzuhalten,

damit die Produktion nicht zum Stillstand kommt und nicht durch die Implementierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen beeinflusst wird. Daraus leiten sich verschiedene Anforderungen an die Bereitstellung von Energieflexibilität ab, die im Folgenden näher erläutert werden.

4.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen wird mithilfe eines thermischen Speichers realisiert. Er entkoppelt die Kälteerzeugung und den Kälteverbrauch und kann autark be- und entladen werden. Als mögliche Anwendungsfälle wurden folgende technische Umsetzungen identifiziert:

- Option 1: Einbindung eines neuen sensiblen Kältespeichers in das Kälteversorgungsnetz
- Option 2: Umrüstung von vorhandenen Sprinklertanks zu sensiblen Kältespeichern und deren Einbindung in das Kälteversorgungsnetz

Bei der Einbindung eines neuen sensiblen Kältespeichers (Option 1) wird ein Speicher genutzt, der als zusätzliche technologische Komponente an das Kälteversorgungsnetz angeschlossen wird. Er besitzt eine Leistung von 2,6 MW sowie eine Speicherkapazität von 1800 kWh und wird als eigenständige Lösung bereitgestellt, wodurch er nach Bedarf für die Kältebereitstellung genutzt werden kann. Der Kältespeicher wird hydraulisch entkoppelt. Dies verhindert eine Beeinträchtigung der Prozesskälteversorgung durch die Nutzung des zusätzlichen Speichers. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, den Speicher zentral oder dezentral anzuordnen. Bei der dezentralen Anordnung wird der Speicher lediglich für einen Teil der Kälteversorgung genutzt und weist somit eine kleinere Kapazität auf. Welches Einbindungskonzept zur Anwendung kommt, hängt maßgeblich von der vorhandenen Infrastruktur und der Verfügbarkeit von Freiflächen ab.

Der zweite untersuchte Anwendungsfall (Option 2) ist der Umbau von Sprinklertanks zu sensiblen Kältespeichern. Diese haben im betrachteten Anwendungsfall eine Größe von 1.000 m³. Der Vorteil dieser Option ist, dass die Tanks bereits existieren und somit nur noch um die Peripherie erweitert werden müssen, zum Beispiel um Wärmeübertrager, Rohrleitungen oder Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Ein Nachteil besteht in der Gewährleistung der Sicherheit, da die Umrüstung von Sprinklertanks mögliche Risiken mit sich bringt. So muss zum Beispiel der Brandschutz, also das Abführen von Wasser zu Löschzwecken, zu jeder Zeit gewährleistet oder eine Kaltwasserentnahme im oberen Bereich des Sprinklertanks sichergestellt sein. Letzteres kann aufgrund der Temperaturschichtung die Leistungsfähigkeit des Speichers negativ beeinflussen. Sollten sich die Kälteerzeuger nicht in unmittelbarer Nähe zu den Sprinklertanks befinden, müssten lange Rohrleitungen installiert werden, was zu weiteren Übertragungsverlusten führen würde.

Die beiden beschriebenen Optionen beruhen auf dem gleichen Prinzip: Der Kältespeicher fungiert nicht als hydraulische Weiche, sondern ist in der Lage, zu jedem Zeitpunkt und unabhängig vom Lastgang be- und entladen zu werden. Dies ermöglicht eine zeitliche Entkopplung und das größtmögliche Energieflexibilitätspotenzial bei der Bereitstellung von Prozesskälte.

Für beide technischen Lösungen wird ein intelligentes Steuerungskonzept benötigt. Die Be- und Entladung des Speichers muss über ein Lastmanagementsystem unter Berücksichtigung des aktuellen Systemzustandes automatisiert aufeinander abgestimmt werden. So wird die Zyklenzahl optimiert und der Speicher möglichst effizient betrieben. Zusätzlich können in einem nächsten Schritt Prognose-Tools eingebunden werden, die beispielsweise künftige Lastverläufe und Preisdaten von den Energiemärkten einbeziehen, um die Betriebsstrategie weiter zu optimieren und zusätzliche Kostenpotenziale zu erschließen.

4.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die Einbindung des thermischen Speichers als Neuinstallation (Option 1) oder als Umrüstung der Sprinklertanks (Option 2) kann mehrere Ziele haben. Im vorliegenden Anwendungsfall liegt der Fokus auf Peak-Shifting. Durch die Einbindung des Speichers können Lastspitzen geglättet und zeitlich verschoben und somit vor allem das Netzentgelt reduziert werden. In diesem Kapitel werden quantitative und qualitative Untersuchungen zu diesem Ziel näher beleuchtet.

Mithilfe von Jahressimulationen wurde dieser Anwendungsfall für den Kälteversorgungsverbund einer Referenzproduktionslinie untersucht, welche nur mithilfe von Kompressionskältemaschinen gespeist wird. Im Rahmen der Simulationen wurden ein Speicher implementiert sowie hinsichtlich der Speichergröße die maximal zu reduzierenden Leistungsspitzen variiert sowie ein wirtschaftliches Optimum aufgezeigt. Mithilfe der Kapitalwertmethode haben sich daraus paarweise Konfigurationen aus Speichergröße und der dazugehörigen maximal zu reduzierenden Leistung am Netzanschluss ergeben. Für die nachfolgende Bewertung werden die beiden oben beschriebenen Optionen miteinander verglichen.

Im ersten Anwendungsfall wird die Neuinstallation eines Kältespeichers (Option 1) beschrieben, welcher hinsichtlich Leistung und Speicherkapazität wirtschaftlich optimal ausgelegt wurde. Die Speicherkapazität für den betrachteten Anwendungsfall beträgt 1.800 kWh und die Be- und Entladeleistung beträgt 2,6 MW. Der zweite Anwendungsfall beinhaltet die Umrüstung der vorhandenen Sprinklertanks zu sensiblen Kältespeichern (Option 2). Hierbei beträgt das nutzbare Speichervolumen der Sprinklertanks 1.000 m³ und die Be- und Entladeleistung wurde ebenfalls mit 2,6 MW angenommen. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 5* zusammengefasst.

Die Annuitäten der jeweiligen Systeme wurden für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren berechnet. Im Vergleich zur Kapitalwertmethode können durch die Annuitäten die jährlichen Kosten innerhalb des Betrachtungszeitraums dargestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse nachfolgend mithilfe der Annuitätenmethode bewertet. Dabei folgt die wirtschaftliche Bewertung Literaturwerten und wird ohne Marktgleich durchgeführt. Sowohl die Neuinstallation des Speichers als auch die Umrüstung der Sprinklertanks weisen trotz der zusätzlichen Investitionen und Betriebskosten im Vergleich zum Referenzsystem höhere Annuitäten auf. Durch die vergleichsweise niedrigen Investitionskosten weist die Lösung mit den Sprinklertanks die beste Amortisationszeit und die vielversprechendsten Annuitäten auf. Die Sprinklertanks weisen hierbei jedoch die größten Risiken auf. Die originäre Funktion der Sprinklertanks muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet

und insbesondere bei der Nutzung der Sprinklertanks als Kältespeicher sichergestellt sein. Aufgrund der niedrigeren Risikoeinschätzung und der vergleichsweise hohen Annuität ist für diesen Anwendungsfall die Neuinstallation eines Kältespeichers zu favorisieren.

Tab. 5 Übersicht der Ergebnisse des simulativ untersuchten Anwendungsfalls »Peak Shifting« für die Neuinstallation eines Speichers und für die Umrüstung der Sprinklertanks

	Referenz	Neuinstallation	Sprinklertanks
Annuitäten	-727.000 €/a	-635.300 €/a	-609.400 €/a
Investitionskosten	0	192.600 €	92.700 €
Energiekosten	727.000 €/a	610.000 €/a	593.000 €/a
Betriebskosten	0	6.000 €/a	7.000 €/a
Amortisationszeit	-	1,89 Jahre	0,7 Jahre
Risikoeinschätzung	-	Niedrig	Hoch

Werden die jährlichen Energiekosten miteinander verglichen, so ist erkennbar, dass die Systeme mit Speicher deutlich niedrigere jährliche Energiekosten aufweisen als das Referenzsystem. Dabei sind vor allem zwei Faktoren entscheidend: Zum einen kann durch die Einbindung eines Kältespeichers die Effizienz der Kältemaschinen gesteigert werden, indem diese in effizienteren Betriebspunkten laufen. Zum anderen können durch das Peak-Shifting leistungsbezogene Netzentgelte reduziert werden (*Abbildung 3*). Dabei dient die Simulation des Kälteverbundsystems ohne Kältespeicher als Referenz. Die Option der umgerüsteten Sprinklertanks (Option 2) weist die geringsten jährlichen leistungsbezogenen Netzentgelte auf. Diese haben im Vergleich zur wirtschaftlich optimalen Konfiguration eines neuen Kältespeichers eine größere Kapazität, wonach diese in der Theorie auch mehr Leistungsspitzen glätten können und daher die Höhe der Netzentgelte stärker verringert wird. Entscheidend für die Glättung von Leistungsspitzen ist aber nicht nur die Kapazität, sondern auch die Be- und Entladeleistung des Speichers. Neben den im vorherigen Abschnitt beschriebenen sicherheitsrelevanten Einschränkungen gilt hier einschränkend, dass die Leistungsfähigkeit oder die maximal entnehmbare Wassermenge der umgerüsteten Sprinklertanks auf Annahmen basiert und im Detail untersucht werden muss.

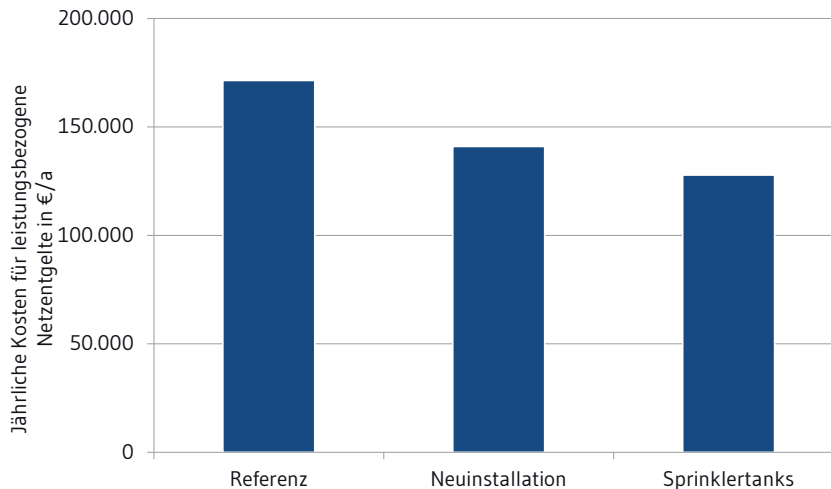


Abb. 3 Beispielhafte Darstellung der jährlichen leistungsbezogenen Netzentgelte für das Referenzsystem, die Neuinstallation eines Speichers und die Umrüstung der Sprinklertanks

Der Aufwand für die energieflexible Betriebsweise ist beim Anwendungsfall »Peak Shifting« als gering einzustufen. Durch den Einsatz eines Lastmanagementsystems kann dieser Anwendungsfall ohne zusätzliche Schnittstellen umgesetzt werden. Für weitere Ausbaustufen und die Optimierung der energieflexiblen Betriebsweise wird der Aufwand deutlich zunehmen. Zusätzliche Zielsetzungen, beispielsweise die Reaktion auf volatile Energiepreise oder das externe Anbieten von Flexibilität, können zu gesteigertem Aufwand führen. Dabei sind unterschiedliche Schnittstellen zum Energiemarkt und eine Echtzeitverarbeitung von Daten erforderlich. Das heißt, dass ein intelligentes Lastmanagement integriert sein muss, um diese Potenziale zu realisieren.

Neben Peak Shifting dient die Einbindung des thermischen Speichers auch der Verbesserung der Resilienz der Energieinfrastruktur. So werden zusätzliche Redundanzen für die Kältebereitstellung im System geschaffen. Je nach Anwendungsfall kann die Einbindung eines thermischen Speichers den Ausbau von zusätzlichen Kältemaschinen für Spitzenkältebedarfe reduzieren.

5 Energieflexible Prozesskälteversorgung im Brauereigewerbe

Autoren: von Hayn · Moske · Aselmann

In diesem Kapitel wird das Energieflexibilitätpotenzial im Brauprozess basierend auf von Hayn et al. (2022) untersucht. Hierbei werden zunächst der Brauprozess und die eingesetzten Technologien und Energiebedarfe untersucht. Im Brauprozess wird in verschiedenen Arbeitsschritten Prozesskälte benötigt. Das anfangs hohe Temperaturniveau der gekochten Würze wird beim Abkühlprozess meist

über eine Wärmeübertragung zur Effizienzsteigerung für andere parallele Prozesse mit Wärmebedarf (z. B. zur Vorwärmung von Wasser) genutzt. Zur weiteren Abkühlung der Würze auf niedrigere Temperaturen während des Gärprozesses muss jedoch aktiv über Kältemaschinen gekühlt werden. Die Kältemaschinen werden wiederum auch zur Abkühlung auf Lagertemperatur und während der Lagerung eingesetzt. In der Lebensmittelindustrie und insbesondere in der Brauindustrie kommen Querschnittstechnologien wie Kompressionskältemaschinen zur Kälteerzeugung zum Einsatz. Im Brauereigewerbe werden etwa 97 Prozent der benötigten Kälte durch elektrische Kältemaschinen im Bereich von mehreren 100 Kilowatt bis einige Megawatt bereitgestellt (Institut für Luft- und Kältetechnik 2019). Deutschlandweit werden für die Herstellung von Bier jährlich 213,5 GWh elektrische Energie zur Kälteerzeugung benötigt (Institut für Luft- und Kältetechnik, 2019). In der hier exemplarisch betrachteten Brauerei der Rothaus AG kommt für die Kälteversorgung eine NH₃-Kolbenverdichteranlage mit 350 kW elektrischer Anschlussleistung und einem Jahresenergiebedarf von 840 MWh zum Einsatz (von Hayn et al., 2022). Der Anteil des elektrischen Energiebedarfs für Prozesskälte liegt am untersuchten Standort bei ca. elf Prozent, kann in Brauereien aber auch bis zu 35 Prozent betragen (Sauer, 2006).

Zur zeitlichen Entkopplung des Energiebedarfs können im Brauprozess neben vorhandenen thermischen Energiespeichern auch die zu kühlenden Produkte selbst als inhärente Energiespeicher genutzt werden. Gerade der Brauprozess bietet hierzu ein großes Potenzial, denn Bier besitzt einen hohen Wasseranteil und somit auch eine hohe Wärmekapazität. Zudem wird es in großen Gär- und Lagertanks gekühlt, welche inhärente Energiespeicher mit hoher Kapazität darstellen.

Zur Untersuchung des Energieflexibilitätpotenzials nach VDI 5207 (Blatt 2) ist sowohl das Wissen zu benötigten Energien, Leistungen und Betriebsdauern als auch ein technisches Verständnis des Produktionsprozesses mit den einzuhaltenden Prozessparametern notwendig. Produktspezifische Hemmnisse bei einer energieflexiblen Bierproduktion betreffen primär die einzuhaltenden hohen Qualitätsanforderungen und die engen Toleranzen im Herstellungsprozess. Die Produktionsplanung für den Brauprozess basiert im Wesentlichen auf der eng festgelegten Sudfolge, die kaum Raum für einen flexiblen Betrieb bietet. Da es sich beim Produkt Bier um ein Lebensmittel handelt und Qualitätseinbußen befürchtet werden, sind Abweichungen und Toleranzen aufgrund der Rezeptvorgaben und des engen Produktionsablaufs bisher nur schwer durchzusetzen. Aus diesem Grund wurden zur Ermittlung von Energieflexibilitätpotenzialen primär Prozesse mit geringeren Prozessanforderungen untersucht.

5.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

In einer ersten Grobanalyse wurden drei mögliche Flexibilisierungsmaßnahmen für unterschiedliche Kälteverbraucher identifiziert: die Energiespeicherung in einem thermischen Kaltwasserspeicher zur Würzekühlung, die Unterbrechung des Kühlprozesses nach der Nachgärung und die inhärente Energiespeicherung während des Lagerprozesses. Diese Energieflexibilitätsmaßnahmen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

In der Rothaus-Brauerei wird ein thermischer Energiespeicher zur Kaltwasserspeicherung eingesetzt. Er hat ein Volumen von 125 m^3 , speichert $4\text{ }^\circ\text{C}$ kaltes Brauchwasser und wird auf einen Füllgradbereich von 30 bis 70 Prozent geregelt. Das $4\text{ }^\circ\text{C}$ kalte Wasser aus dem Speicher wird mit $10\text{ }^\circ\text{C}$ kaltem Frischwasser auf $8\text{ }^\circ\text{C}$ gemischt und dann zur Kühlung der Würze nach dem Brauprozess verwendet. Der Kaltwasserspeicher könnte also zur energieflexiblen Speicherung von thermischer Energie genutzt werden und hat den Vorteil, dass er nicht direkt in den Kühlprozess eingebunden ist. Die Analyse hat jedoch gezeigt, dass mit einer Wärmekapazität von 921 kWh das Energieflexibilitätspotenzial relativ gering ist. Außerdem werden für eine detaillierte Betrachtung notwendige Informationen wie die Häufigkeit der Befüllung nicht erfasst.

Der Kühlprozess zwischen Nachgärung und Lagerung und der anschließende Lagerungsprozess eignen sich besonders gut für die Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen. Da die chemischen Prozesse der alkoholischen Gärung hier bereits abgeschlossen sind, sind kaum Auswirkungen auf die Qualität des Endprodukts durch Eingriffe in den Kühlprozess zu erwarten. Während der Nachgärung wird das Bier auf sein endgültiges Aroma verfeinert. Ist der finale Verfeinerungsgrad erreicht, stagnieren die chemischen Prozesse des Biers und es kann zur Lagerung von $12\text{ }^\circ\text{C}$ auf $0\text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt werden. Dieser wöchentlich durchgeführte Kühlprozess dauert etwa drei Tage, kann jedoch innerhalb einer Woche beliebig oft und lange unterbrochen werden.

Aufgrund der abgeschlossenen chemischen Prozesse eignet sich auch der anschließende Lagerungsprozess zur Untersuchung des Energieflexibilitätspotenzials. Nach der Kühlung muss das Bier in den Lagertanks auf einer Temperatur von etwa $0\text{ }^\circ\text{C}$ gehalten werden. Um das Potenzial für die Energieflexibilisierung zu erhöhen, kann im Lagerprozess eine gewisse Toleranz der Lagertemperatur zur inhärenten Energiespeicherung von $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$ zugelassen werden, ohne den Prozess zu stören. Da der zulässige Temperaturbereich jedoch sehr gering ist, ergibt sich daraus auch nur ein geringes Potenzial von $80,25\text{ kWh}$ pro Speicher. Außerdem besteht bei einer Unterkühlung die Gefahr einer Oberflächenvereisung. Zudem kann die Anomalie des Wassers zu Temperaturzonenveränderungen im Speicher führen, was eine sichere Temperaturregelung sehr schwierig gestaltet.

Eine erste Analyse hat gezeigt, dass die Kühlung der Lagertanks nach der Nachgärung einen hohen Energiebedarf aufweist und dass der Prozess innerhalb eines langen Zeitraums unterbrochen werden kann, ohne dass die Produktqualität darunter leidet. Aufgrund der Hemmnisse und des deutlich geringeren Potenzials der beiden anderen Energieflexibilitätsmaßnahmen wurde die Unterbrechung des Kühlprozesses nach der Nachgärung als die Energieflexibilitätsmaßnahme mit dem höchsten Energieflexibilitätspotenzial identifiziert und daher für die weitere detaillierte Untersuchung ausgewählt.

Um das technische Energieflexibilitätspotenzial zu bewerten, muss zunächst der elektrische Energiebedarf für den betrachteten Prozess der Bierkühlung nach der Nachgärung ermittelt werden. *Abbildung 4* zeigt ein vereinfachtes Hydraulikschema der betrachteten Ammoniak-Kälteanlage und eines der 57 Lagertanks. Die Lagertanks sind parallel an eine zentrale NH_3 -Kältemaschine angeschlossen und verfügen über vier Wärmeübertrager mit unterschiedlicher Wärmeleistung zur Kühlung des

Biers, in denen das flüssige Ammoniak durch Direktverdampfung teilweise verdampft. Das von der Kältemaschine bereitgestellte flüssige Ammoniak wird in einem Flüssigkeitsabscheider gesammelt und nicht nur für diesen, sondern auch für alle anderen Kühlprozesse am Standort eingesetzt.

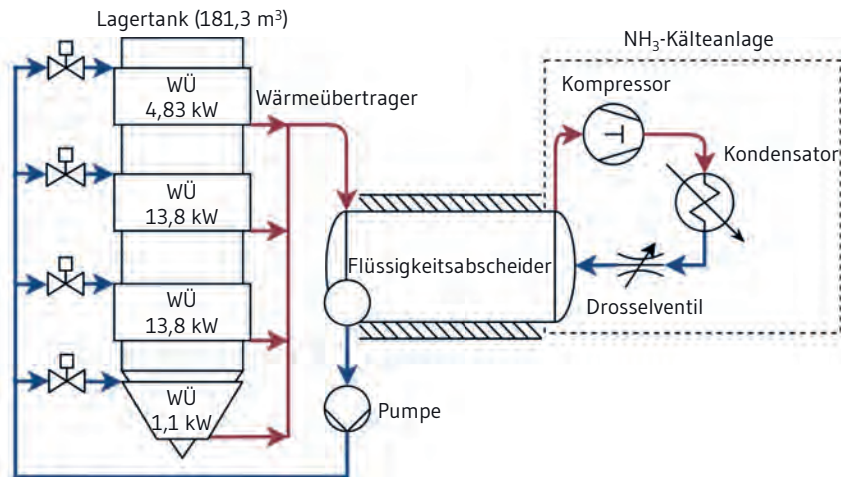


Abb. 4 Hydraulikschema des betrachteten Ammoniak-Kältesystems für den exemplarischen Kühlprozess eines der 57 Lagertanks (von Hayn et al., 2022)

Da es sich bei der Kälteanlage um eine zentrale Kältemaschine handelt, die mehrere Prozesse gleichzeitig versorgt, und nur der Gesamtstrombedarf der Anlage erfasst wird, kann der flexibilisierbare elektrische Energiebedarf für die einzelnen Kühlprozesse nicht direkt gemessen werden und muss über den Kältebedarfsanteil zur Kühlung des Biers (also die Wärmekapazität der einzelnen Lagertanks) ermittelt werden. Die insgesamt 57 Lagertanks haben ein Bruttovolumen von je 181,3 m³ und damit einen Energieinhalt von 2.407 kWh pro Speicher für die betrachtete Kühlung von 10 °C auf 0 °C. Bei einer Leistungszahl der Kälteanlage von 3 entspricht dies einem elektrischen Energiebedarf von 802 kWh.

Zudem muss zur Ermittlung des Energieflexibilitätspotenzials auch die flexibilisierbare Leistung eines einzelnen Speichers ermittelt werden. Da hier Ammoniak als Kältemittel mit unvollständiger Direktverdampfung eingesetzt wird, kann die für den Prozess eingesetzte Kühlleistung nicht direkt gemessen werden. Stattdessen wird die Leistung zur Kühlung des Biers in den Lagertanks anhand der Leistungsdaten der vier installierten Wärmetauscher pro Lagertank ermittelt. Sie beträgt insgesamt 33,53 kW, und mit der Umrechnung über die Leistungszahl der Kältemaschine ergibt sich so eine flexibilisierbare elektrische Leistung von 11,17 kW pro Tank.

Neben dem Energie- und Leistungsbedarf werden für die Ermittlung des Energieflexibilitätspotenzials auch die mögliche Abrufhäufigkeit und die Abrufdauer dieser Flexibilitätsmaßnahme benötigt. Zur Kühlung der benötigten Biermenge nach der Nachgärung werden insgesamt neun Lagertanks einmal pro Woche für etwa 72 h gekühlt. Da die Energieflexibilitätsmaßnahme innerhalb einer Woche nur dann abgerufen werden kann, wenn der Prozess nicht bereits läuft, ergibt sich eine mögliche Abrufdauer von 96 h aus der Differenz von einer Woche und der Prozessdauer. Insgesamt wird eine elektrische Leistung von 100,53 kW für 72 h pro Woche abgerufen, und eine elektrische Energie von 7.218 kWh kann jede Woche beliebig oft für insgesamt 96 h pro Woche durch Unterbrechung des Kühlprozesses verschoben werden.

5.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Um das wirtschaftliche Potenzial von Energieflexibilitätsmaßnahmen zu ermitteln, müssen die einsparbaren Betriebskosten bestimmt werden. Für die Brauerei Rothaus ergeben sich im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, einen wirtschaftlichen Nutzen aus der Umsetzung von EFM zu erzielen: Lastspitzenglättung, bei der die leistungsbezogenen Netzentgelte des Unternehmens reduziert werden, oder die Teilnahme am Day-Ahead-Strommarkt, bei der Preisschwankungen an der Strombörse ausgenutzt werden.

Zum aktuellen Zeitpunkt wird die elektrische Energie der Brauerei Rothaus zu einem festen Strompreis bezogen. Aus diesem Grund wäre eine Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen aktuell noch nicht wirtschaftlich. Um jedoch das wirtschaftliche Potenzial für einen perspektivischen Strombezug vom Day-Ahead-Markt zu bestimmen, wird in der weiteren ökonomischen Analyse ein Energieeinkauf zu Brutto-Großhandelspreisen des Day-Ahead-Spotmarkts angenommen. Wirtschaftliche Potenziale aus einer Lastspitzenglättung stehen hierbei nicht im Fokus. Da die Großhandelspreise jedoch nur den Nettostrompreis für ein Unternehmen darstellen, muss für eine detaillierte Analyse der Bruttostrompreis berechnet werden. Die Stromsteuerabgaben richten sich in erster Linie nach dem jährlichen Strombedarf des Unternehmens, wobei Entlastungsregelungen nur für bestimmte Branchen und energieintensive Unternehmen gelten. Für die Rothaus-Brauerei gelten diese Entlastungsregelungen nicht, sodass bei Unternehmen dieser Größenordnung auf den Nettopreis pauschal Umlagen in Höhe von 89,70 €/MWh aufgeschlagen werden, darunter die EEG-Umlage, die Stromsteuer sowie weitere Umlagen (BDEW, 2021).

Im betrachteten Kühlprozess ergibt sich ein wirtschaftliches Potenzial, wenn der Prozess innerhalb einer Woche unterbrochen und verlagert wird. Um den Energiebedarf auf Zeitfenster mit günstigen Strompreisen verteilen zu können, wird die zuvor berechnete Prozessdauer von 72 Stunden auf die einstündigen Zeitfenster mit den niedrigsten Strompreisen einer Produktionswoche verteilt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Energieflexibilitätspotenzial anhand historischer Daten ermittelt wurde und vereinfachend von einer konstanten durchschnittlichen Kühlleistung während des Prozesses ausgegangen wurde.

Die elektrischen Leistungsbedarfe für den untersuchten Kühlprozess im konventionellen und im optimierten energieflexiblen Betrieb sind in *Abbildung 5* für die Dauer einer Produktionswoche gegenübergestellt. Zusätzlich ist die Entwicklung des Strompreises am Day-Ahead-Spotmarkt inkl. Steuern für eine typische Produktionswoche dargestellt (12.08.2019 bis 19.08.2019).

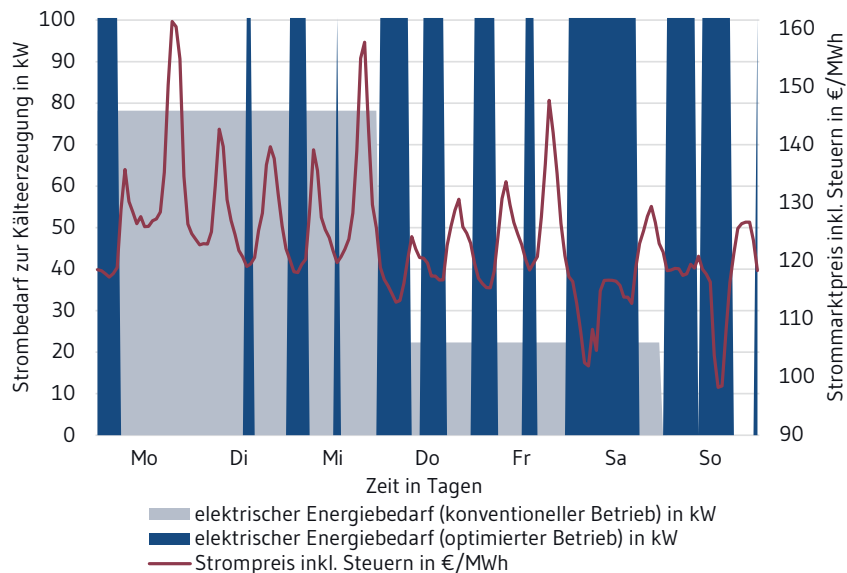


Abb. 5 Verteilung des Strombedarfs für den Kühlprozess nach der Nachgärung auf die Zeiträume mit den niedrigsten Strompreisen innerhalb einer Woche (von Hayn et al., 2022)

In der Grafik ist zu erkennen, dass der Strombedarf für den konventionellen Betrieb zu Beginn der Woche höher ist als gegen Ende der Woche. Dies resultiert aus dem Betriebsablauf bei Rothaus, bei dem typischerweise zu Wochenbeginn sieben Speicher für 72 Stunden und ab Donnerstag die restlichen beiden Speicher gekühlt werden (ebenfalls für 72 Stunden). Für die optimierte energieflexible Betriebsweise wurden die 72 wirtschaftlichsten Ein-Stunden-Zeiträume ermittelt und der elektrische Leistungsbedarf von neun parallel gekühlten Speichern auf die ermittelten Zeiträume verteilt. Aus der zuvor ermittelten Leistung für einen Speicher kann die elektrische Leistung zur Kühlung der neun Speicher innerhalb einer Woche berechnet werden. Mit diesem optimierten Betrieb wird die kostengünstigste Betriebsweise für den Kühlprozess nach der Nachgärung in der betrachteten Woche erreicht.

Zur Berechnung der Betriebskosten einer Woche wird für beide Betriebsweisen der elektrische Energiebedarf mit dem Bruttostrompreis des jeweiligen Zeitfensters multipliziert und aufsummiert. Es zeigt sich, dass durch den energieflexiblen Betrieb und die damit verbundene Ausnutzung von Zeiten mit niedrigen Strompreisen eine beispielhafte Betriebskosteneinsparung von rund neun Prozent erreicht werden kann.

6 Literatur

BADISCHE STAATSBRAUEREI ROTHHAUS AG, 2021: Engagement & Umweltschutz. Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter <https://www.rothaus.de/brauerei/heimat-und-umwelt>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

BDEW (Hg.), 2021: BDEW-Strompreisanalyse 2021. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, zuletzt aktualisiert am 10.06.2021, zuletzt geprüft am 07.09.2021.

INSTITUT FÜR LUFT- UND KÄLTETECHNIK, 2019: Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland. Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten 2017. Unter Mitarbeit von Dr. Karin Jahn. Hg. v. VDMA e.V. Allgemeine Lufttechnik. Forschungsrat Kältetechnik e.V. Frankfurt am Main.

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021: E-Flex Scanner berechnet Energieflexibilitätspotenzial der Produktionsinfrastruktur. Online verfügbar unter <https://synergie-projekt.de/news/e-flex-scanner-berechnet-energieflexibilitaetspotenzial-der-produktionsinfrastruktur>, zuletzt geprüft am 10.11.2021.

RÖVEKAMP, P., M. SCHÖPF, F. FELIX, M. WEIBELZAHL, G. FRIDGEN, 2021: Renewable electricity business models in a post feed-in tariff era. In: Energy 216, S. 119228. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119228.

SAUER, J., 2006: Anforderungen an die Kältetechnik in Brauereien – damals und heute. Veranstaltung zur ordentlichen Mitgliederversammlung HKK Historische Kälte- und Klimatechnik e.V. Unter Mitarbeit von Huppmann AG. München. Online verfügbar unter https://www.vhkk.org/page/vortrag/pdf/Anforderungen_Kaeltetechnik-Brauereien.pdf.

STROBEL, N., 2021: Einsatz inhärenter Energiespeicher in Produktionssystemen zum elektrischen Lastmanagement. Dissertation. TU Darmstadt, Darmstadt.

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

VDI 5207, Blatt 2: Energieflexible Fabrik – Identifikation und technische Bewertung. 2021.

VDI, Hg., 2021. Energieflexibel in die Zukunft – Wie Fabriken zum Gelingen der Energiewende beitragen können. Unter Mitarbeit von A. Bachmann, L. Bank, C. Bark, D. Bauer, B. Blöchl et al. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. Verfügbar unter: doi:10.24406/FIT-N-638765

VON HAYN, A., J. MOSKE, P. ASELMANN, M. WEIGOLD, 2022: Demand side management in the cooling supply of brewing processes. In: Procedia CIRP 105, S. 146–151. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.025.





C.8

Prozesswärme

Management Summary

Im vorliegenden Kapitel werden Energieflexibilitätspotenziale und untersuchte Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Prozesswärmeversorgung der chemischen und der metallverarbeitenden Industrie beschrieben. Unternehmen dieser Branchen mit hohem Bedarf an Prozesswärme sind Evonik Industries AG und Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Im Hinblick auf die Energieflexibilitätspotenziale werden bei der Prozessdampfversorgung von Evonik die Energieflexibilitätsmaßnahmen Bivalenz, Energiespeicherung sowie Prozessparameteranpassung und bei Schaeffler die Veränderung der Auftragsreihenfolge und die Energiespeicherung simulativ untersucht.

Für die Prozessdampfversorgung bei Evonik beträgt das jahresgemittelte Energieflexibilitätspotenzial bei bivalenter Dampfversorgung 6,1 MW und kann als Regelleistung oder am Spotmarkt angeboten werden. Unter Annahme einer auf optimalen Preisprognosen basierenden Bietstrategie lassen sich durch die Vermarktung als negative Sekundärregelleistung bis zu 197.000 Euro pro Jahr erzielen. Die übrigen Energieflexibilitätsmaßnahmen führen zu keinem nennenswerten Energieflexibilitätspotenzial. Die Veränderung der Auftragsreihenfolge in der Schmiede bei Schaeffler führt zu einer Summe aller reduzierten Leistungsspitzen von 1,2 MW und einer jährlichen wirtschaftlichen Einsparung von 120.000 Euro. Das Energieflexibilitätspotenzial durch Energiespeicherung in den Abschreckbecken der Härterei beträgt 1,12 MW und führt zu Energiekosteneinsparungen von bis zu 9 Prozent.

Autoren

Borst, Fabian
f.borst@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Schulz, Julia
julia.schulz@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), TU München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Sossenheimer, Johannes
j.sossenheimer@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Weigold, Matthias
weigold@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Zäh, Michael
michael.zaeh@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
schaften (iwb), Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

1 Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesswärmebereitstellung

Autoren: Borst · Schulz · Sossenheimer · Weigold · Zäh

1.1 Energieflexible Prozesswärmebereitstellung

Die Prozesswärmeversorgung weist mit 67 Prozent den derzeit höchsten Anteil am industriellen Endenergiebedarf in Deutschland auf (Stand 2019 nach AG Energiebilanzen e.V., 2020). Insbesondere die Prozesse der energieintensiven Sektoren wie der Chemie-, der Papier- und der Lebensmittelindustrie erfordern hohe Temperaturniveaus und große Wärmemengen, um die Produktionsprozesse zu temperieren (Kemmler et al., 2017). Hierfür wird meist fossile oder elektrische Energie in Wärme gewandelt. Bei zentralen Prozesswärmeversorgungsanlagen kommen oft Prozessdampf oder -wasser auf hohem Temperaturniveau als Wärmeträgermedium zum Einsatz (Biglia et al., 2017).

Die Dampferzeugung erfolgt durch zentrale Kessel- oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK), von denen in Deutschland 72 Prozent mit fossilen Energieträgern wie Mineralöl, Gas oder Kohle betrieben werden (AG Energiebilanzen e.V., 2020). Der Dampf wird dabei zentral sowie gemäß der höchsten Druck- bzw. Temperaturanforderung bereitgestellt und über Rohrleitungssysteme zu den Wärmeverbrauchern transportiert. Durch die fortschreitende Elektrifizierung der Prozessdampferzeugung, beispielsweise mit flexiblen Elektrodenkesseln, können einerseits redundante konventionelle Kesselanlagen bivalent betrieben werden und andererseits kann die inhärente Energiespeicherkapazität des thermischen Netzes energieflexibel genutzt werden.

Bei elektrisch bereitgestellter Prozesswärme können externe Wärmespeicher und vorhandene prozessinterne Speicherkapazitäten genutzt werden, um die Wärmeversorgung von der Energieumwandlung zu entkoppeln. Dadurch wird eine energieflexible Betriebsweise der Energiewandler ermöglicht (Strobel, 2021).

1.2 Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung

Typische Energieflexibilitätspotenziale der Prozesswärmebereitstellung sind u.a. das Speichern von thermischer Energie, der bivalente Energiebezug des thermischen Energiewandlers sowie organisatorische Energieflexibilitätsmaßnahmen (*Abbildung 1* im Vorwort von *Abschnitt C*).

Nachfolgend wird die technische und wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung in unterschiedlichen Industriebranchen beschrieben. *Tabelle 1* gibt einen Überblick über vielversprechende Energieflexibilitätsmaßnahmen bei zwei Industrieunternehmen.

Tab. 1 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Bivalente Prozessdampfbereitstellung	Evonik Industries AG	Chemische Industrie
Inhärente Energiespeicherung im Prozessdampfnetz	Evonik Industries AG	Chemische Industrie
Anpassung von Prozessparametern bei der Dampferzeugung	Evonik Industries AG	Chemische Industrie
Änderung der Auftragsreihenfolge bei Schmiedeanlagen	Schaeffler Technologies AG & Co. KG	Metallverarbeitende Industrie
Energiespeicherung in Abschreckbecken	Schaeffler Technologies AG & Co. KG	Metallverarbeitende Industrie

1.3 Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Evonik

Die Evonik Industries AG als internationaler Spezialchemiekonzern mit über 33.000 Mitarbeitenden umfasst fünf operative Divisionen: Specialty Additives, Nutrition & Care, Smart Materials, Performance Material und Technology & Infrastructure. Diese entwickeln zahlreiche Produkte der Spezialchemie, wobei die Division »Technology & Infrastructure« mit über 8.000 Mitarbeitenden für den Betrieb der Produktionsstandorte und insbesondere für deren Energieversorgung zuständig ist. Um eine energieflexible Betriebsführung der Prozessdampfversorgung für den Standort Darmstadt zu untersuchen, wird im Folgenden eine Methodik zur simulativen Bewertung des Energieflexibilitätspotenzials für Prozessdampfnetze präsentiert. Die Versorgung von über 30 Dampfverbrauchern am Standort erfolgt über eine zentrale Dampferzeugung. Es besteht keine Möglichkeit, den Produktionsplan einzelner Verbraucher anzupassen. Aus diesem Grund wurden die Energieflexibilitätsmaßnahmen »Bivalenz«, »inhärente Energiespeicherung« und »Anpassung« von Prozessparametern untersucht, deren Umsetzung unabhängig von den jeweiligen Produktionsprozessen erfolgen kann.

1.4 Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Schaeffler

Die Schaeffler Technologies AG & Co. KG ist ein global tätiger Automobil- und Industrielieferer, der Präzisionskomponenten und Systeme in Motoren, Getrieben und Fahrwerken sowie Wälz- und Gleitlagerlösungen für eine Vielzahl von Industrieanwendungen produziert. Mit ca. 90.500 Mitarbeitenden ist Schaeffler eines der weltweit größten Familienunternehmen und verfügt mit rund 170 Standorten in über 50 Ländern über ein großes Netz aus Produktionsstandorten, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen und Vertriebsgesellschaften. Die Firma Schaeffler hat 2013 ein Energiemanagementsystem nach ISO 50001 in der Unternehmensgruppe eingeführt. Aktuell sind ca. 90 Prozent der Werke nach dieser Norm zertifiziert.

Am Standort in Schweinfurt werden Wälzlager für die Schwerindustrie, für Produktionsmaschinen, für die Antriebs- und die Schienenverkehrstechnik, für die Medizintechnik und für die Windkraft produziert. Die Hauptenergieverbraucher am Standort Schweinfurt sind die Bereiche der Schmiede und der Härterei. Bei voller Produktionsauslastung werden hier Leistungen bis zu 14 MW abgerufen. Das Energieflexibilitätsziel des Energiemanagements am Standort in Schweinfurt ist die Optimierung des Spitzenlastmanagements.

Im Werk in Schweinfurt liegen im Bereich der Schmiede und der Härterei vielversprechende Energieflexibilitätspotenziale vor. Die Höhe des Strombedarfs der in den Schmiedeanlagen verwendeten Induktionsöfen ist abhängig von der Auftragsreihenfolge der Schmiedeteile und kann durch gezielte Anpassung flexibilisiert werden. Des Weiteren kommen in der Härterei Abschreckbecken zum Einsatz, die als Energiespeicher genutzt werden können.

1.5 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

Zur Ermittlung der Energieflexibilitätspotenziale in Deutschland wurden die quantifizierten Potenziale der Prozesswärmebereitstellung von der Standortebene auf den Wirtschaftszweig hochgerechnet. Als Faktor für die Hochrechnung diente hierbei der Anteil des elektrischen Energiebedarfs des betrachteten Unternehmens am Gesamtenergiebedarf des Wirtschaftszweigs. Um eine valide Hochrechnung zu gewährleisten, wurde eine maßnahmenspezifische Hochrechnung durchgeführt. Die im Folgenden genannten kumulierten Energieflexibilitätspotenziale ergeben sich aus den in *Tabelle 2* gelisteten maßnahmenspezifischen Einzelpotenzialen.

Tab. 2 Energieflexibilitätspotenziale ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung (Berechnungsmethode vgl. *Kapitel A.2*)

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Bivalente Prozessdampfbereitstellung	7.300 MW Abrufdauer: < 4 h Abrufhäufigkeit: ca. 1.460-mal pro Jahr
Inhärente Energiespeicherung im Prozessdampfnetz	1.000 MW Abrufdauer: < 15 min Abrufhäufigkeit: ca. 17.500-mal pro Jahr
Anpassung von Prozessparametern bei der Dampferzeugung	140 MW Abrufdauer: < 15 min Abrufhäufigkeit: ca. 17.500-mal pro Jahr

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Änderung der Auftragsreihenfolge bei Schmiedeanlagen	180 MW Abrufdauer: 3 h Abrufhäufigkeit: ca. 70- bis 120-mal pro Jahr
Inhärente Energiespeicherung in Abschreckbecken	28 MW Abrufdauer: 0,5 h Abrufhäufigkeit: ca. 5300-mal pro Jahr

2 Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der chemischen Industrie

Autoren: Borst · Weigold

Im Folgenden wird eine Methodik zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung des Energieflexibilitätspotenzials von Dampfnetzen mithilfe dynamischer Simulationsmodelle basierend auf (Borst et al., 2021) vorgestellt. Hierfür wird im vorliegenden Abschnitt ein Konzept zur technischen Modellierung von Dampfversorgungssystemen im Kontext von Energieflexibilitätsuntersuchungen entwickelt, woraufhin im Anschluss dessen Anwendung auf das Dampfversorgungssystem von Evonik am Standort Darmstadt beschrieben wird. Anschließend wird das quantifizierte Energieflexibilitätspotenzial für verschiedene Vermarktungsoptionen und -szenarien wirtschaftlich bewertet.

2.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die im Folgenden vorgestellte Methode zielt auf die technische Modellierung industrieller, zentraler Dampfversorgungssysteme im Kontext von Energieflexibilitätsbetrachtungen ab. Für eine detaillierte Beschreibung der Methodik sei auf Borst et al. (2021) verwiesen. Das System ist in die drei Subsysteme Dampferzeugung, Dampfverteilung und Dampfverbrauch unterteilt. Die Dampferzeugung erfolgt auf der höchsten benötigten Druckstufe und kann auf verschiedenen Energieträgern basieren. Da nicht alle Verbraucher Dampf auf Maximaldruck benötigen, gliedert sich die Verteilung in Dampfnetze verschiedener Druckstufen, wobei zur Druckreduzierung Dampfumformstationen eingesetzt werden können. Bei den Verbrauchern handelt es sich um verschiedene Produktionsprozesse, aber auch Gebäudeheizungen, die als unabhängige Einheiten agieren.

Aufgrund der verbrauchsseitigen Intransparenz und der Herausforderung, in verschiedenste Prozesse eingreifen zu müssen, werden ausschließlich Energieflexibilitätsmaßnahmen untersucht, die die Dampferzeugung und Verteilung betreffen. Da die Energieflexibilitätsmaßnahmen unmittelbar die Modellierung dieser Subsysteme beeinflussen, werden die simulativ erprobten Energieflexibilitätsmaßnahmen thermischer Dampfnetze kurz erläutert (*Abbildung 1*). Für eine bivalente Dampferzeugung wird untersucht, welches Energieflexibilitätspotenzial aus dem zielgerichteten Wechselbetrieb von

Gas- und Elektrodampfkessel resultiert. Zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials über die inhärente Speicherkapazität des Versorgungssystems wird davon ausgegangen, dass in Zukunft nur noch ein elektrisch beheizter Dampferzeuger zur Verfügung steht. Das Dampfsystem fungiert hierbei als Druck- bzw. Temperaturspeicher innerhalb der zulässigen Toleranzen. Gleiches gilt für die Anpassung von Prozessparametern in der Dampferzeugung, wobei das Energieflexibilitätspotenzial hier aus stationären Leistungsdifferenzen bei Druck- und Temperaturvariation resultiert. Unabhängig von der Energieflexibilitätsmaßnahme muss gewährleistet werden, dass die Druck- und Temperaturrestriktionen der Dampferzeugung nicht verletzt werden.

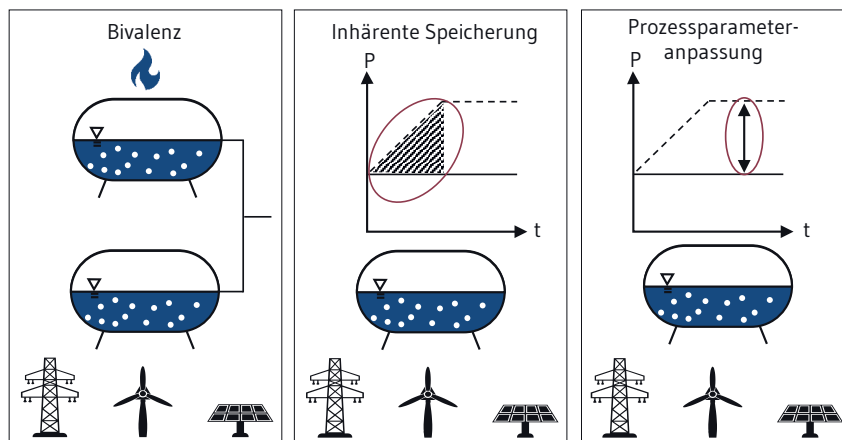


Abb. 1 Untersuchte Energieflexibilitätsmaßnahmen beim Dampfnetz (Borst et al., 2021)

Zur Modellierung werden die objektorientierte Modellierungssprache Modelica und die Simulationsumgebung Dymola verwendet. Für die beschriebene Vorgehensweise sind neben der Modelica Standard Library keine weiteren Bibliotheken notwendig (Modelica Association, 2020). Das Fluidsystem wird basierend auf Modelica Fluidports als eindimensionales Strömungsmodell, das durch die Variablen Absolutdruck, Massenstrom und spezifische Enthalpie beschrieben wird, modelliert. Im Folgenden werden einige Grundannahmen und Modellierungsansätze beschrieben.

Unabhängig von der jeweiligen Dampferzeugungstechnologie wird ein kennfeldbasierter Ansatz zur Modellierung eines generischen Dampferzeugers genutzt. Dieser gliedert sich in zwei Submodelle – die Modelle für den Sattdampferzeuger und für den Überhitzer. Die Systemgrenze auf der Erzeugerseite bildet eine ideale Massenstromquelle, die dem Sattdampferzeugermodell Speisewasser mit einer bestimmten Temperatur zuführt. Die erforderliche Wärmeleistung wird in Abhängigkeit des Betriebspunkts, der Nennleistung und des Betriebspunktabhängigen Wirkungsgrads berechnet. Dieses Modell wird auch zur Modellierung des Überhitzers verwendet. Der Sattdampferzeuger wird auf den Druck und der Überhitzer auf die Temperatur geregelt, wobei die Simulation von Energie-

flexibilitätsmaßnahmen komplexere Regelstrategien erfordert. Diese werden in Borst et al. (2021) beschrieben. Die an die Erzeugung anschließenden Dampfumformstationen werden als lineare, isenthalpe Ventile abgebildet. Das dynamische Verhalten der Komponenten wird über PT1-Glieder approximiert.

Da ein physikalisches Modell des Dampfverteilungssystems, das auf Rohrlängen, -durchmessern, -krümmungen und -rauigkeiten basiert, einen großen Parametrierungsaufwand zur Folge hat, werden für verschiedene Rohrabschnitte datengetriebene Regressionsmodelle verwendet. Die Dampfverbraucher werden über Massenstromsenken modelliert, welche dem System gemäß einem Zeitverlauf Dampf entnehmen. Hierdurch kann die Anzahl nichtlinearer Gleichungen reduziert und somit die Simulationsgeschwindigkeit gesteigert werden.

Am untersuchten Standort wird überhitzter Prozessdampf durch eine zentrale Erzeugung mit der höchsten benötigten Druckanforderung von 13 bar bereitgestellt. Dabei werden Drücke zwischen 11,5 bar und 13 bar sowie Temperaturen zwischen 200 °C und 230 °C toleriert. Anschließend wird der Dampf teilweise durch Dampfumformstationen auf 7 bar bzw. 3 bar gedrosselt und über entsprechende Verteilnetze zu den Verbrauchern geleitet. Zur Validierung und für alle folgenden Simulationsstudien wird ein viertelstündlich diskretisierter Datensatz der Dampfmassenströme aus dem Jahr 2019 verwendet. Zur Validierung des Druck- und Wärmeverlustmodells wird die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme ausgewertet, die für das Druckverlustmodell 1,9 Prozent und für das Wärmeverlustmodell 4,6 Prozent beträgt.

Im Folgenden wird das aus verschiedenen Energieflexibilitätsmaßnahmen resultierende Energieflexibilitätspotenzial simulativ quantifiziert. Hierbei handelt es sich um das iterativ bestimmte technische Potenzial, das die Einhaltung der Netzrestriktionen gewährleistet.

2.1.1 Bivalenz

Im bivalenten Szenario wird davon ausgegangen, dass neben einem konventionellen, gasbetriebenen Dampfkessel ein auch Elektrodenkessel zur Vermarktung von Energieflexibilitätspotenzialen als Regelleistung oder am Day-Ahead-Markt zur Verfügung steht. Aufgrund der unterschiedlichen Aktivierungsanforderungen der Vermarktungsoptionen muss der elektrische Dampferzeuger innerhalb unterschiedlicher Zeiträume an- bzw. abgeschaltet werden, woraus Druck- und Temperaturschwankungen entstehen. Sofern diese die Netzrestriktionen verletzen, muss das theoretisch zur Verfügung stehende Energieflexibilitätspotenzial reduziert werden (*Abbildung 2 a, c*). Dies erfolgt iterativ mithilfe automatisierter Parameterstudien für die Druckrestriktion im Sattedampferzeuger und für die Temperaturrestriktion im Überhitzermodell, bis das technisch mögliche Potenzial quantifiziert wurde (*Abbildung 2 b, d*). *Abbildung 2* veranschaulicht dieses Vorgehen am Beispiel einer negativen Sekundärregelleistung.

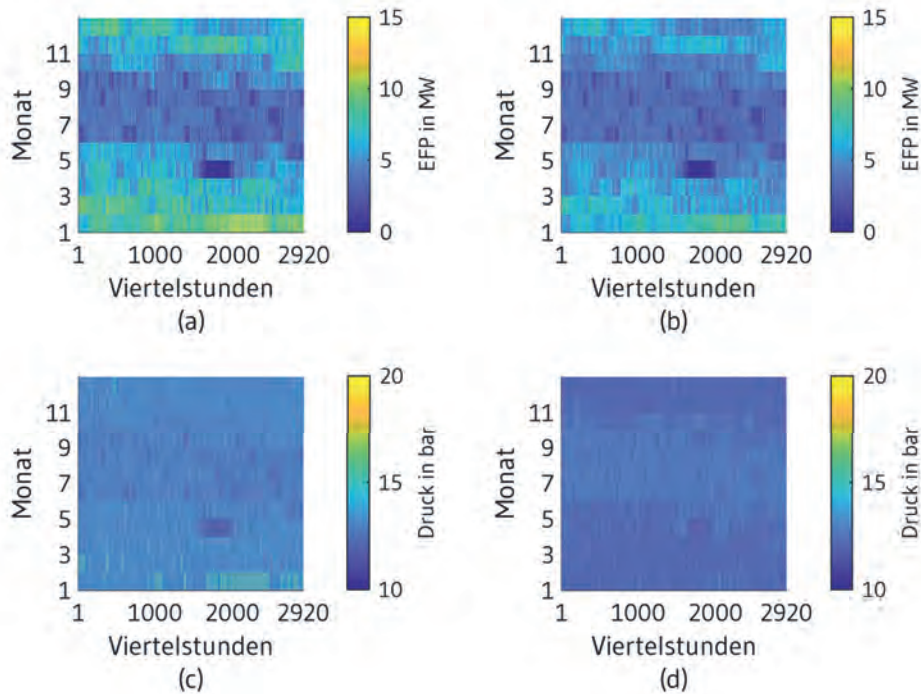


Abb. 2 Theoretisches und technisches Potenzial für eine negative Sekundärregelleistung: (a) Theoretisches Potenzial, (b) technisches Potenzial, (c) Druck bei theoretischem Potenzial, (d) Druck bei technischem Potenzial (Borst et al., 2021)

Die Energieflexibilitätspotenziale anderer Vermarktungsoptionen werden an dieser Stelle nicht dargestellt, da sie dem qualitativen Verlauf aus *Abbildung 2* entsprechen. Das jahresgemittelte Energieflexibilitätspotenzial beträgt für die Primärregelleistung 3,1 MW, für die negative Sekundärregelleistung 4,8 MW und für die negative Minutenreserveleistung 5,6 MW. Für den Abruf von positiver Regelleistung und der Vermarktung am Day-Ahead-Markt konnte keine Verletzung der Dampfnetzrestriktionen beobachtet werden, weshalb das technische dem theoretischen Potenzial entspricht und über ein Jahr gemittelt 6,1 MW beträgt.

2.1.2 Inhärente Speicherung

Um das Energieflexibilitätspotenzial der inhärenten Speicherkapazität des Dampfnetzes zu quantifizieren, wird davon ausgegangen, dass nur ein Dampferzeuger zur Verfügung steht, dessen Leistung so lange flexibilisiert wird, bis der Maximaldruck bzw. die Maximaltemperatur erreicht ist. Das Energie-

flexibilitätspotenzial hängt vom entnommenen Massenstrom ab und resultiert zu über 60 Prozent aus dem flüssigen Wasser im Sattdampferzeuger sowie der druckinduzierten Änderung der Verdampfungstemperatur. Das über ein Jahr gemittelt Energieflexibilitätspotenzial beträgt 800 kW.

2.1.3 Anpassung der Prozessparameter

Das Energieflexibilitätspotenzial, das aus der Anpassung der Prozessparameter Druck und Temperatur resultiert, beträgt aufgrund der nahezu druckunabhängigen Verdampfungsenthalpie im Jahresmittel 108 kW.

2.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Im Rahmen der wirtschaftlichen Bewertung liegt der Fokus aufgrund des deutlich höheren Energieflexibilitätspotenzials auf dem bivalenten Szenario. Da bestimmte Regelleistungsarten Pay-as-Bid-Preisbildungsverfahren aufweisen, wird außerdem eine auf optimalen Preisprognosen basierende Bietstrategie verglichen mit einer realistischen Strategie, in der jeweils der Grenzpreis der letzten Auktion unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 0,9 geboten wird. Bezüglich der Steuer- und Umlagebelastung werden ein Minimalkostenszenario von 9€/MWh exkl. MwSt. und ein Maximalkostenszenario von 166,5€/MWh exkl. MwSt. einander gegenübergestellt (Deutsche Bundesnetzagentur, 2020). Die Vermarktung positiver Regelleistung führt selbst im Minimalkostenszenario aufgrund der hohen Stromkosten zur Vorhaltung des Energieflexibilitätspotenzials nicht zu positiven Erträgen. Die Day-Ahead-Vermarktung ist im Maximalszenario aufgrund des hohen fixen Anteils an Steuern und Abgaben am Strompreis ebenfalls nicht wirtschaftlich. *Abbildung 3* zeigt deshalb ausschließlich die Ergebnisse für den negativen Sekundärregelleistungs-, den Minutenreserve- und den Day-Ahead-Markt unter Annahme des Minimalkostenszenarios und in Abhängigkeit verschiedener Bietstrategien. Die höchsten Erlöse lassen sich für die Vermarktung von Sekundärregelleistung erzielen. Diese betragen für das Jahr 2019 bei optimaler Bietstrategie insgesamt 197.000 Euro und bei realistischer Bietstrategie 83.000 Euro.

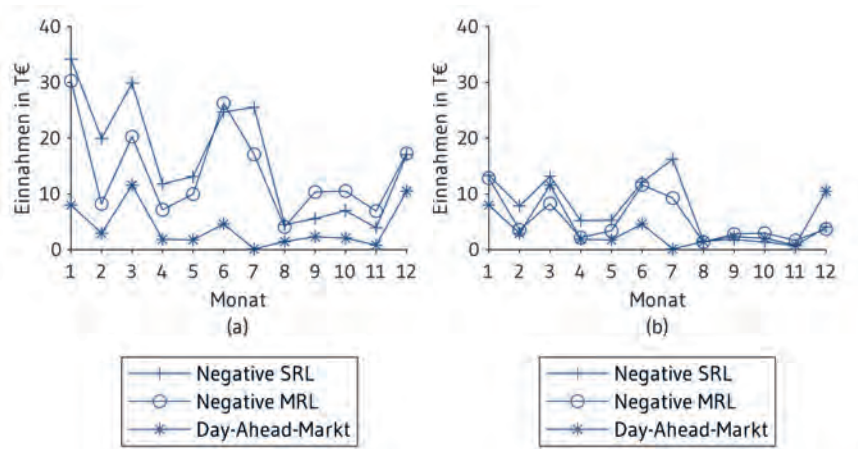


Abb. 3 Erlöse bei bivalentem Betrieb bei Bruttostromkosten von 9€/MWh für (a) optimale Bietstrategie und (b) realistische Bietstrategie (Borst et al., 2021)

3 Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der metallverarbeitenden Industrie

Autoren: Schulz · Zäh

Im Folgenden wird ein Vorgehen zur energetischen Modellierung der Prozesse in der Schmiede und in der Härterei des Schaeffler-Standorts Schweinfurt vorgestellt. Um Energieflexibilitätspotenziale in diesen Bereichen zu erschließen, zu bewerten und umzusetzen, ist die Beschreibung der auftretenden Lasten basierend auf Produktions- und Sensordaten aus dem ERP- oder dem ME-System nötig. In *Kapitel 3.1* wird zunächst die technische Umsetzung der Anpassung der Auftragsreihenfolge bei den Schmiedeanlagen und des Speicherns von Energie in den Abschreckbecken der Härterei beschrieben.

3.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

3.1.1 Anpassen der Auftragsreihenfolge bei den Schmiedeanlagen

Durch die technische Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahme »Anpassen der Auftragsreihenfolge« bei den Schmiedeanlagen sollen die Energiekosten durch eine Reduzierung der auftretenden Lastspitzen verringert werden.

In den betrachteten Schmiedeanlagen wird Rundstahl nach dem Prinzip der induktiven Erwärmung elektrisch auf eine Temperatur von etwa 1.200 °C erhitzt. Die vierstufige Presse schert die benötigte Bauteilgröße vom erwärmten Rundstahl ab. Anschließend wird das Bauteil in mehreren Stufen umgeformt und ein Loch ausgestempelt. Auf den vier Schmiedeanlagen können bis 5,0 kg schwere Werkstücke mit einer Presskraft von bis zu 15.000 kN und einer Hubzahl zwischen 50 und 100 Hub pro Minute gefertigt werden.

Im ersten Schritt sind die Anforderungen an das Simulationsmodell durch eine Analyse der abzubildenden Prozesse zu ermitteln. Zum einen ist eine hinreichende Modellierungsgenauigkeit gefordert, welche durch

- die Aufnahme der Belegungspläne sowie Pausenzeiten der einzelnen Produktionsstationen als Eingangsgrößen der Modellierung,
- die Berücksichtigung von unregelmäßigen und unvorhersehbaren Ereignissen, welche nicht durch die vorliegenden Produktionsdaten abgebildet werden, und
- die Abbildung des werkstück- und maschinenspezifischen Leistungsbedarfs erreicht werden soll.

Um eine spätere Integration in die Produktionsplanung zu gewährleisten, bedarf es einer praxistauglichen Simulationszeit.

Für die Modellierung sind der Aufbau einer geeigneten Datenbasis aus Produktionsdaten der ERP-, ME- und BDE-Systeme sowie Verbrauchsdaten erforderlich. Historische Verbrauchsdaten in einer Auflösung von unter einer Minute sowie die Betriebszustände, die Betriebszeiten, die Leistungskennzahlen der Anlagen, die auszubringende Produktionsmenge und relevante Prozessparameter werden berücksichtigt und mithilfe einer skriptbasierten Analyse zu Eingangsparametern für die Modellierung aufbereitet.

Unregelmäßige und unvorhersehbare Ereignisse (Unterbrechungen), die nur in den historischen Verbrauchsdaten ersichtlich sind, werden mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet. Die auftretenden Unterbrechungen lassen sich je Produktionsauftrag durch Anzahl, Zeitpunkt und Dauer hinreichend genau beschreiben.

Der Materialfluss der Schmiedeanlagen wird in Tecnomatix Plant Simulation modelliert und energetisch mit den Betriebszuständen »Betriebsbereit«, »Rüsten«, »Produktion«, »Pause« und »Störung/Stillstand« abgebildet. Wesentlich für die Modellierung dieser Betriebszustände ist die Bestimmung des Leistungsbedarfs aus den historischen Daten. Dabei wird nach Graßl (2015) von einer konstanten Leistung während eines Betriebszustandes ausgegangen und die Leistung als werkstückabhängig angenommen. Des Weiteren sind für die Definition der Betriebszustände »Rüsten« und »Produktion« Informationen über die Rüstzeiten beziehungsweise Auftragszeiten notwendig, welche ebenfalls werkstückspezifisch sein können. Die werkstück- und anlagenspezifischen Daten werden in einer

Datenbank abgespeichert. In der Datenbank sind jeder Kombination aus Werkstück und Schmiede-anlage die Auftragszeiten, die Rüstzeiten und die benötigte Leistung zugeordnet, sodass sich darauf basierend der Leistungsverlauf der Schmiede-anlage abbilden lässt.

Die Auftragsreihenfolge in der Schmiede soll so angepasst werden, dass die auftretende Leistungs-spitze minimiert wird. Für das vorliegende Optimierungsproblem ist die Verwendung eines genetischen Algorithmus sinnvoll, da ein solcher insbesondere für Reihenfolgeprobleme gut geeignet ist und in der Regel kurze Rechenzeiten aufweist. Grundlage der Optimierung sind die Betriebszustände der einzelnen Schmiede-anlagen, die basierend auf den historischen Daten ermittelt werden können. Der genetische Algorithmus durchläuft ausgehend von einer zufälligen Ausgangspopulation an Auftrags-reihenfolgen iterativ den Optimierungsprozess. Die einzelnen Individuen der Ausgangspopulation unterscheiden sich hierbei in der Reihenfolge der zu produzierenden Produkte auf den einzelnen Produktionsstationen. Die Produktionsaufträge unterschiedlicher Produktionsstationen werden bei der Generierung neuer Individuen nicht vermischt, um mögliche anlagenbedingte Einschränkungen hinsichtlich des Produktspektrums zu berücksichtigen. Die einzelnen Individuen durchlaufen anschlie-ßend wiederholt den Simulationsprozess zur Bestimmung des Leistungsverlaufs. Nach Abschluss eines Simulationsdurchlaufs wird die auftretende Leistungsspitze berechnet und als Fitnesswert für den genetischen Algorithmus herangezogen. Sobald alle Individuen modelliert sind, werden dieje-nigen mit dem geringsten Fitnesswert ausgewählt und als Elterngeneration für die Bestimmung neuer Individuen verwendet. Tritt keine Verbesserung des Fitnesswerts auf, ist das Abbruchkriterium für die Optimierung erreicht und die Auftragsreihenfolge mit der geringsten in diesem Optimierung-schritt auftretenden maximalen Leistung kann identifiziert werden.

Zur Modellvalidierung werden die simulierten Lastgänge mit den realen verglichen. *Abbildung 4* (oben) zeigt nur geringe Abweichungen zwischen den simulierten und den realen Energiemengen der betrachteten Schmiede-anlagen M1 bis M4, sodass das aufgebaute Modell einsetzbar ist.

Zur Bewertung der optimierten Auftragsreihenfolge wurden die drei Tage mit den im Datensatz vorhandenen höchsten Lastspitzen modelliert (Tage A, B und C). Die Optimierungsergebnisse zeigen, dass nicht nur die maximale Lastspitze an allen drei Tagen deutlich gesenkt werden konnte, sondern auch, dass die Bandbreite der modellierten Spitzenlasten verringert werden kann (*Abbildung 4 unten*). So befindet sich für Tag A das Leistungsmaximum bei der ursprünglichen Auftragsreihenfolge bei ca. 9.100 kW, während die Lastspitze bei der optimierten Auftragsreihenfolge bei ca. 7.500 kW liegt.

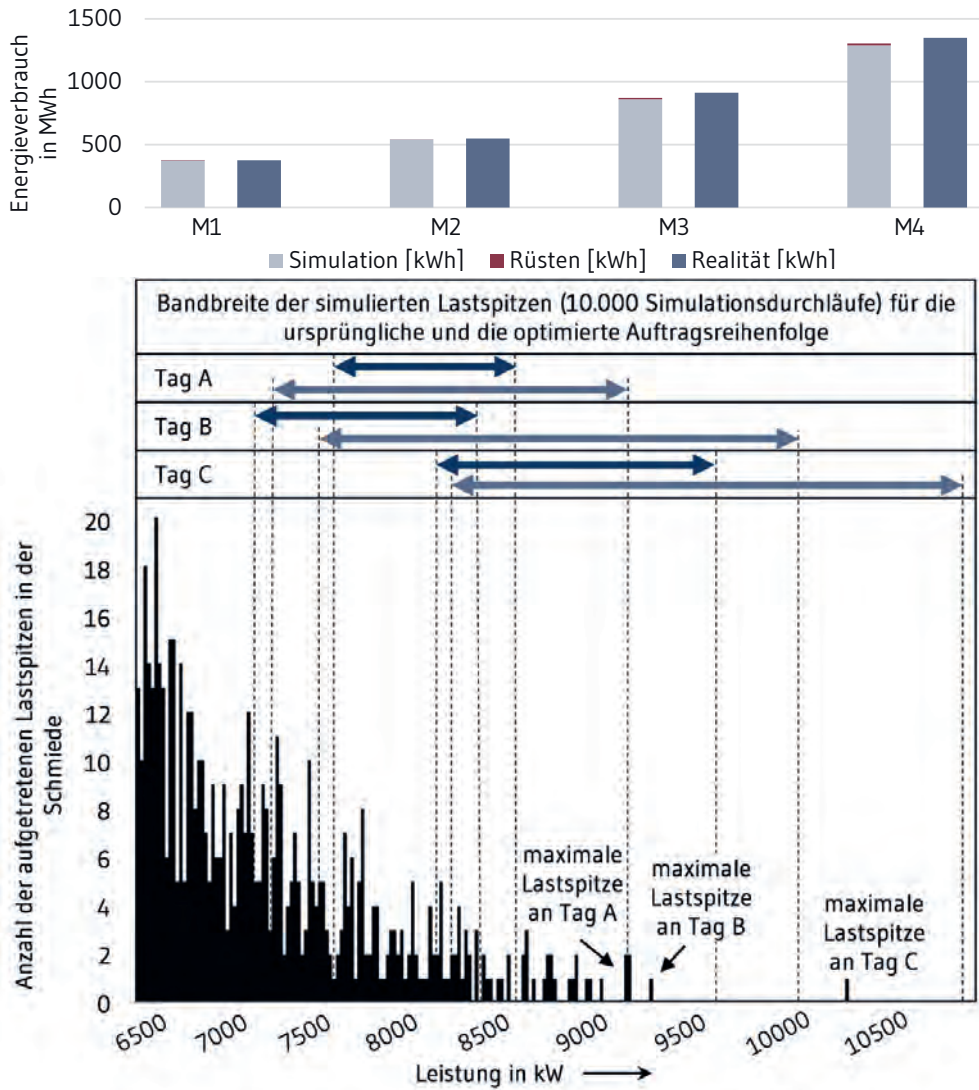


Abb. 4 Vergleich der simulierten und der realen Lastgänge der vier Schmiedeanlagen M1 bis M4 (oben) und Vergleich der auftretenden Spitzenlasten der ursprünglichen und der optimierten Auftragsreihenfolge an den Tagen mit den drei höchsten Lastspitzen (Tage A, B und C) (unten).

3.1.2 Energie speichern in den Abschreckbecken der Härterei

Durch die technische Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahme »Energie speichern« in den Abschreckbecken sollen die Energiekosten durch die Nutzung variabler Strompreise reduziert werden.

In der Härterei werden Lagerringe und Kegelrollen in Rollenherdöfen wärmebehandelt. Zu Beginn werden die Werkstücke in der Vorwaschmaschine gereinigt und unter Schutzgasatmosphäre im erdgasbetriebenen Hochtemperaturofen auf ca. 850 °C erwärmt. Die erwärmten Bauteile werden dann bei einer Betriebstemperatur von ca. 200 °C in den elektrisch beheizten Martensitsalzbädern (SBM) abgekühlt. Je nach Härteprozess durchlaufen die Bauteile anschließend die Luftkühlstrecke oder das Bainitsalzbad (SBB, Betriebstemperatur ca. 220 °C). Im erdgasbetriebenen Niedertemperaturofen werden die Bauteile bei einer Temperatur von ca. 240 °C angelassen. Am Ende durchlaufen sie die Nachwaschmaschine. Der größte Anteil des elektrischen Energiebedarfs kann den Abschreckbecken SBM und SBB zugeordnet werden. Das Temperaturband der Abschreckbecken kann zur inhärenten Energiespeicherung genutzt werden.

Zur Modellierung der Abschreckbecken wurde (wie für die Schmiedeanlagen) Plant Simulation herangezogen, wobei die folgenden vier Heizzustände »Heizen mit drei Heizgruppen« (270 kW), »Heizen mit zwei Heizgruppen« (180 kW), »Heizen mit einer Heizgruppe« (90 kW) und »nicht heizen« hinterlegt sind. Als Eingangsgröße in das Modell wird der Heizplan verwendet, der die Heizphasen der Becken beinhaltet. Mithilfe der thermischen Bilanzierung der Abschreckbecken werden minütlich die Verlustleistung und die Temperatur in den Abschreckbecken bestimmt.

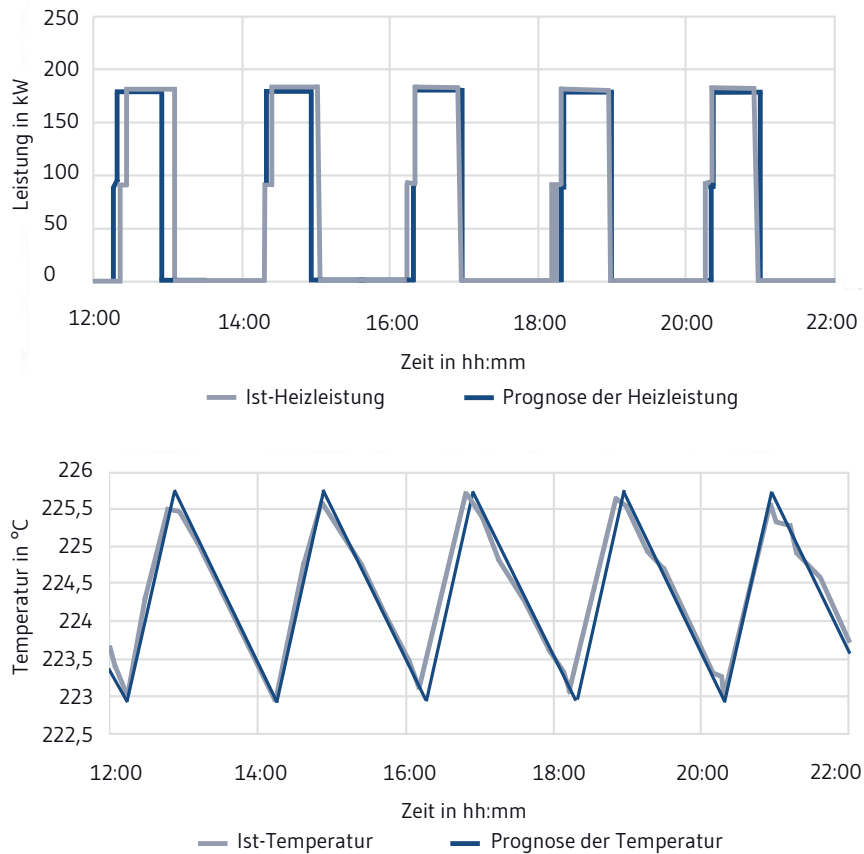


Abb. 5 Leistungsverlauf eines beispielhaften Bainitsalzbadts (oben) mit zugehörigem Temperaturverlauf (unten)

Vergleicht man die modellierten Leistungsverläufe mit den realen Heizleistungsverläufen, so stellt man fest, dass mithilfe des aufgebauten Modells die Heizleistung der Abschreckbecken hinreichend genau modelliert werden kann und deshalb zur Bewertung des Energieflexibilitätspotenzials und zur Ableitung einer Betriebsstrategie geeignet ist. Dies zeigen beispielhaft die gemäß *Abbildung 5* für einen Tag im Februar 2021 simulierte Leistung im Vergleich zur tatsächlichen Heizleistung eines Bainitsalzbadts sowie der dazugehörige Temperaturverlauf.

3.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen kann einerseits hinsichtlich der Reaktion auf volatile Energiepreise in der Härterei und andererseits im Hinblick auf die Lastspitzenreduzierung im Bereich der Schmiede durchgeführt werden.

3.2.1 Reaktion auf volatile Energiepreise in der Härterei

Zur wirtschaftlichen Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Härterei wurden Spotmarktpreise aus dem Jahr 2019 herangezogen (Bundesnetzagentur, 2019). Zusätzlich zur oben beschriebenen Simulation der aktuellen Betriebsweise der Abschreckbecken wurde das Heizen in Abhängigkeit der Spotmarktpreise simuliert. *Abbildung 6* zeigt beispielhaft die angepassten Betriebsweisen eines SBM (oben) und eines SBB (unten).

Im Vergleich zur ursprünglichen Fahrweise konnten in den betrachteten Beispielwochen die bezogenen Spotmarktpreise um ca. 40 Prozent bei dem SBB bzw. um ca. 92 Prozent bei dem SBM reduziert werden. Für eine jährliche Abschätzung der Einsparung wurde angenommen, dass etwa 40 Prozent des Strombedarfs über den Spotmarkt bezogen werden. Trotz eines Mehrverbrauchs von 2 MWh aufgrund des durchschnittlich höheren Temperaturniveaus über alle acht betrachteten Abschreckbecken können die jährlichen Energiekosten bei angepasster Betriebsweise um ca. 3,4 Prozent reduziert werden. Bezieht man die gesamte Energiemenge über den Spotmarkt, ist eine Reduktion um ca. 9 Prozent möglich.

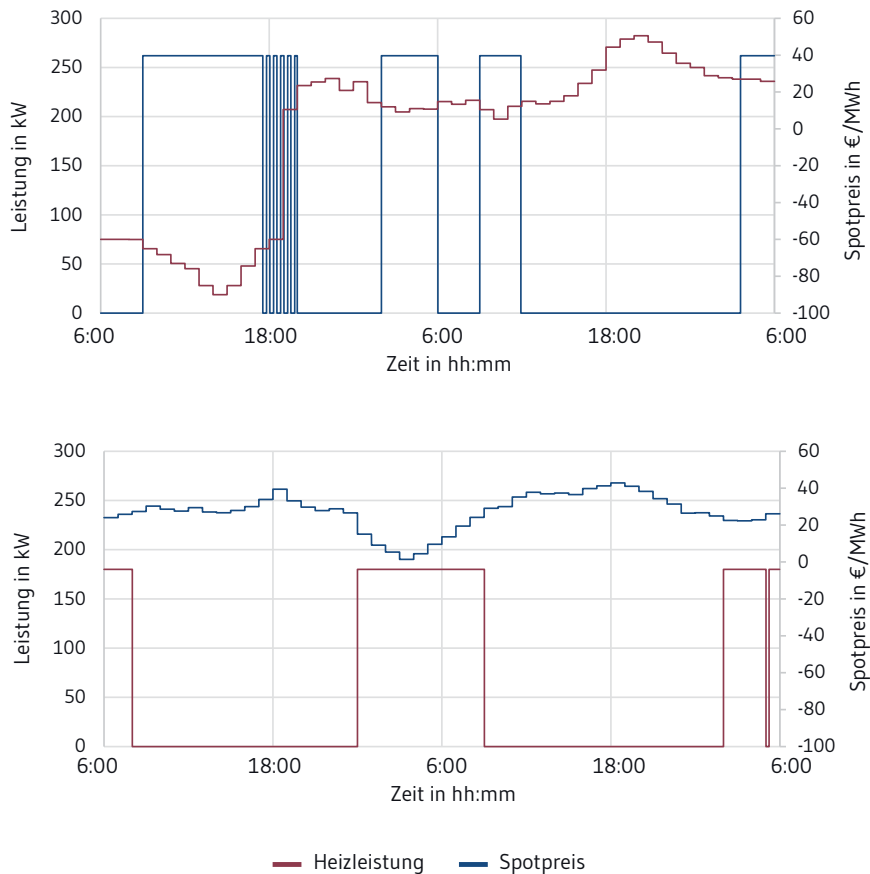


Abb. 6 Beispielhafter Leistungsverlauf bei einer an Spotmarktpreise angepassten Betriebsweise des SBM (Ausschnitt 08.–09.06.2019, oben) und des SBB (Ausschnitt 02.–03.11.2019, unten)

3.2.2 Lastspitzenglättung in der Schmiede

Die Simulationsergebnisse nach der Anwendung der genetischen Optimierung versprechen eine starke Reduktion der Bandbreite und auch der Höhe der auftretenden Lastspitzen in der Schmiede bei Schaeffler. Unter der Annahme eines Leistungspreises von ca. 100 €/kW können bei einer Reduktion der jährlichen Lastspitzen um ca. 1,2 MW insgesamt 120.000 Euro eingespart werden. Die vorzusehenden Investitionskosten für die Integration der Simulationsergebnisse in die Auftragsplanung und die Anpassung der Auftragssteuerung hängen sehr stark von der Art der Integration ab.

4 Literatur

- AG ENERGIEBILANZEN E.V., Hg., 2020. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken [online] [Zugriff am: 26.10.21]. Verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_19_v3.pdf
-
- BIGLIA, A., L. COMBA, E. FABRIZIO, P. GAY und D. RICAUDA AIMONINO, 2017. Steam batch thermal processes in unsteady state conditions: Modelling and application to a case study in the food industry [online]. Applied Thermal Engineering, 118(2), 638–651. ISSN 13594311. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.004
-
- BORST, F., N. STROBEL, T. KOHNE und M. WEIGOLD, 2021. Investigating the Electrical Demand-Side Management Potential of Industrial Steam Supply Systems Using Dynamic Simulation [online]. Energies, 14(6), 1533. Energies. Verfügbar unter: doi:10.3390/en14061533
-
- BUNDESNETZAGENTUR, 2019. SMARD Strommarktdaten [online]. Marktdaten visualisieren. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/home>
-
- DEUTSCHE BUNDESNETZAGENTUR, 2020. Monitoringbericht 2019 [online]. Bericht [Zugriff am: 24. August 2021]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=6
-
- GRASSL, M., 2015. Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2015. München: Utz. Forschungsberichte / IWB. 300. ISBN 978-3-8316-4476-6.
-
- KEMMLER, A., S. STRASSBURG, F. SEEFELDT, N. ANDERS, C. ROHDE, T. FLEITER, A. AYDEMIR, H. KLEEBERGER, L. HARDI und B. GEIGE, 2017. Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014. Endbericht [online] [Zugriff am: 28. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-09_cc_01-2017_endbericht-datenbasis-energieeffizienz.pdf
-
- MODELICA ASSOCIATION, 2020. Modelica Standard Library [online] [Zugriff am: 28. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary>
-
- STROBEL, N., 2021. Einsatz inhärenter Energiespeicher in Produktionssystemen zum elektrischen Lastmanagement. Dissertation. Darmstadt.
-





C.9

Bivalenter Nichteisenmetalldruckguss

Management Summary

Ein Energieträgerwechsel, bei dem der Energiebedarf dynamisch aus zwei Energieträgern bezogen werden kann, weist bei Schmelzöfen in der Branche Nichteisenmetalldruckguss das größte Energieflexibilitätpotenzial auf. In der technischen Umsetzung eines bivalenten Ofens wurden numerisch die optimalen Positionen des Brenners und der Heizelemente aufgezeigt. Aufgrund von Bauraumrestriktionen und dem damit verbundenen Risiko der Hotspot-Bildung wurde ein Konzept mit Gebläsebrenner und Luftvorwärmung realisiert.

Es konnte eine starke Abhängigkeit verschiedener Energiepreis- und Prozessparameter auf den ökonomischen Nutzen des bivalenten Konzepts festgestellt werden. Dieses profitiert von einem möglichst geringen, auf die Wirkungsgrade normierten Preisunterschied zwischen Strom und Gas. Weitere Anwendungsfälle wie Peak-Shaving oder der Einsatz im Regelleistungsmarkt können die Wirtschaftlichkeit weiter erhöhen.

Autoren

Bark, Carlo
carlo.bark@cc-bark.de
Bark Magnesium GmbH
Birkenweg 8, 72355 Schömberg

Dick, Michael
m.dick@hindenlang.de
Hindenlang GmbH
Neurott 1, 75931 Lobbach

Gerdes, Jan-Niklas
jan-niklas.gerdes@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Hartmann, Benjamin
b.hartmann@hindenlang.de
Hindenlang GmbH
Neurott 1, 75931 Lobbach

Köse, Ekrem
ekrem.koese@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Mages, Alexander
alexander.mages@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Sauer, Alexander
alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

1 Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Technologien im Nichteisenmetalldruckguss

Autoren: Mages · Köse · Sauer · Bark

Die Gussindustrie zählt zu den besonders energieintensiven Branchen. Bei der Produktion in Nichteisenmetallgießereien ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch von 3,6 MWh/t, der zu 43 Prozent über Strom und zu 57 Prozent über Brennstoffe (hauptsächlich Erdgas) gedeckt wird. Durch den hohen Gesamtenergieverbrauch von 4,2 TWh/a besteht in der Nichteisenmetallbranche das Potenzial, Schwankungen im Stromnetz signifikant auszugleichen (Guminski et al., 2019).

Aufgrund seines sehr geringen spezifischen Gewichts und seiner elektromagnetischen Eigenschaften ist Magnesium heute als Konstruktionswerkstoff im Leichtbau und in Bereichen der elektromagnetischen Abschirmung unverzichtbar. Magnesium kommt in zahlreichen Produkten der Automobil-, der Luft- und Raumfahrtindustrie, aber auch des Elektronik- und Medizinsektors zum Einsatz. Des Weiteren ist Magnesium (verglichen mit Faserverbundwerkstoffen) in großem Maße recyclingfähig und kann damit den Trend zur Kreislaufwirtschaft unterstützen. Als Rohstoff ist Magnesium in großem Umfang verfügbar (van Huyen Vu, 2011). Trotz dieser enormen Vorteile besitzen Magnesiumlegierungen einen geringen Marktanteil und bieten daher ein großes Wachstumspotenzial (Dieringer et al., 2017).

Über 90 Prozent der technisch eingesetzten Magnesiumlegierungen werden im Druckgussverfahren hergestellt (Dieringer et al., 2017). Im betrachteten Referenzunternehmen wurde der energieintensive Druckgussprozess untersucht. In diesem Prozess wird die Schmelze mit hohem Druck und hoher Geschwindigkeit in eine metallische Dauerform eingepresst. Der Großteil der Anlagen arbeitet im Warmkammerverfahren, bei dem die Druckgussmaschine, der Warmhalteofen und die Gießkammer eine Einheit bilden. *Abbildung 1* zeigt die energetischen und hinsichtlich des Zeitaufwands maßgeblichen Prozessschritte. Neben obligatorischen gibt es produktabhängige Arbeitsschritte, in denen das Werkstück mechanisch nachbearbeitet oder beschichtet wird.

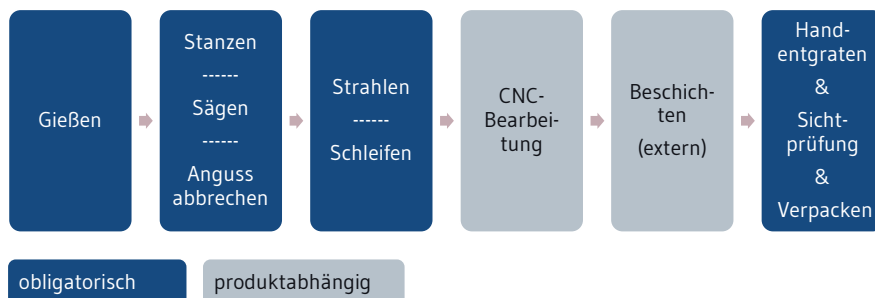


Abb. 1 Prozesskette des Referenzunternehmens

2 Energieflexibler Nichteisenmetalldruckguss

Insgesamt wurden 16 Flexibilitätsmaßnahmen untersucht. In den *Abbildungen 2* und *3* sind die flexibilisierbaren Leistungen, deren Abrufdauer und die geschätzten Abrufkosten der Flexibilitätsmaßnahmen zusammengestellt. Die Berechnungsgrundlagen und Annahmen sind in (Sauer et al., 2019) dargestellt. Von diesen weist bei energieintensiven Technologien wie dem Tiegelofen und den Heizkühlgeräten ein Energieträgerwechsel ein besonders hohes Flexibilitätspotenzial auf. Dies wird durch eine hohe flexibilisierbare Leistung und eine gleichzeitig sehr lange Abrufdauer möglich (Sauer et al., 2019). Technisch kann diese Energieflexibilitätsmaßnahme durch die bivalente Ausgestaltung einer Anlage umgesetzt werden. Die Energieversorgung erfolgt hierbei dynamisch durch zwei Energieträger. Insbesondere thermische Prozessanlagen eignen sich für diesen Ansatz.

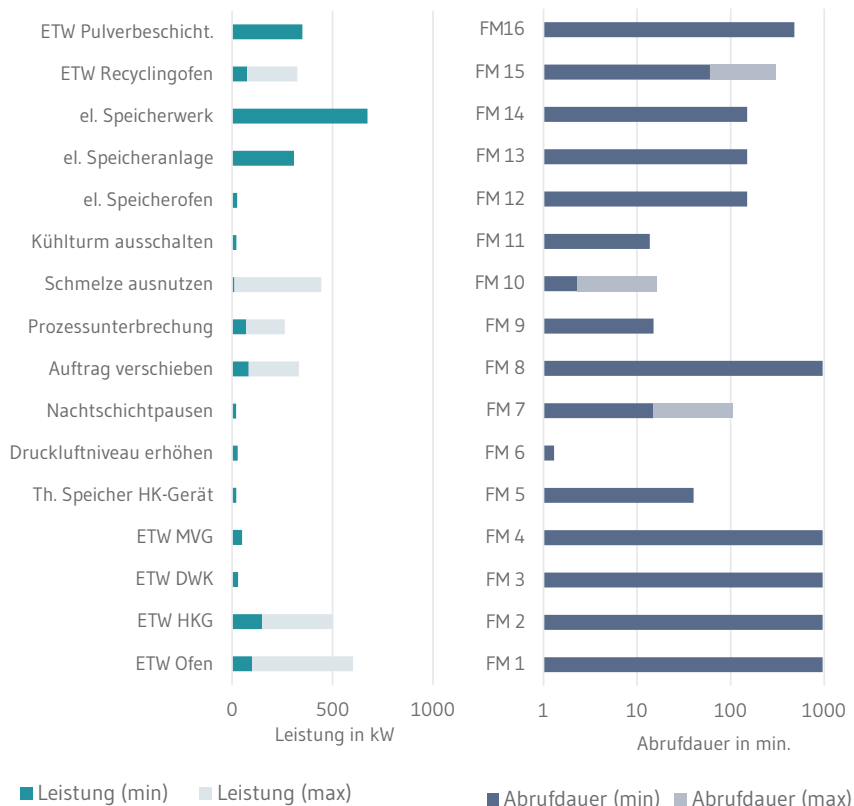


Abb. 2 Übersicht über die Abrufleistung und die Abrufdauer der Flexibilitätsmaßnahmen beim untersuchten Anwendungsfall der Torun Bark Magnesium GmbH

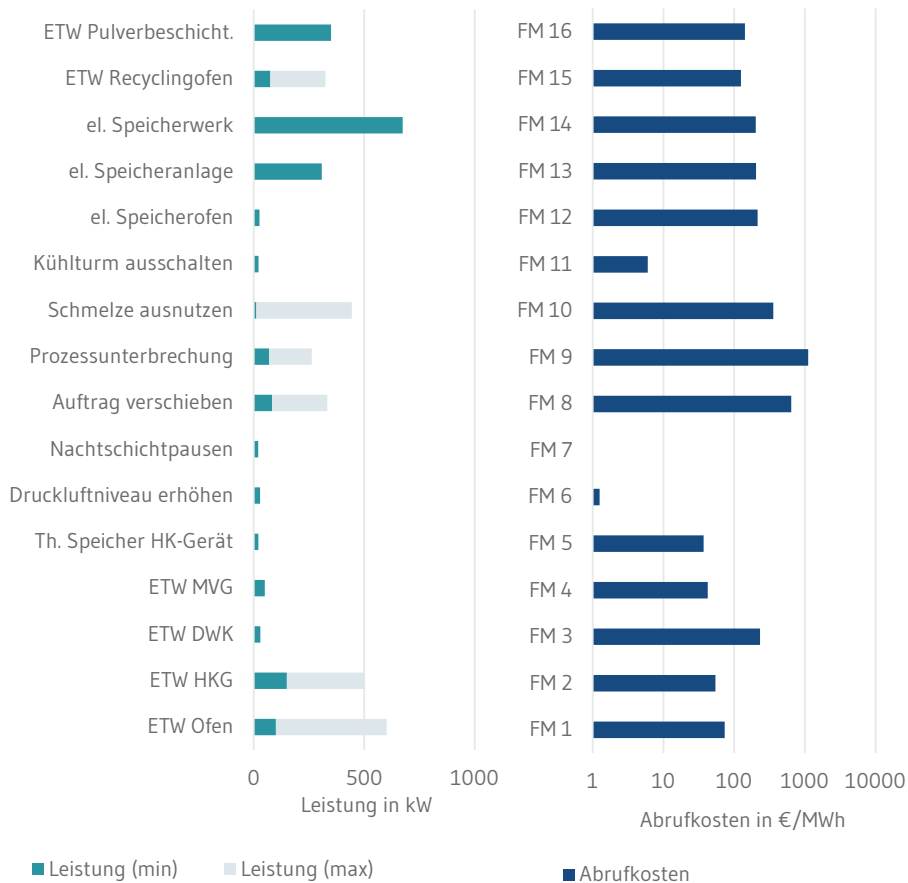


Abb. 3 Übersicht über die Abrufleistung und die Abrufkosten der Flexibilitätsmaßnahmen beim untersuchten Anwendungsfall der Torun Bark Magnesium GmbH

2.1 Schmelzofen

Der Schmelzofen ist im Druckgussverfahren für einen Großteil des Energieverbrauchs verantwortlich. Grundsätzlich kann ein solcher Ofen elektrisch oder brennstoffbeheizt betrieben werden (Stephan et al., 2005). In der technischen Umsetzung wird ein mit elektrischen Widerstandsheizelementen betriebener Schmelzofen in einer bestehenden Druckgussmaschine durch einen bivalenten Ofen ersetzt. Dieser soll im Betrieb dynamisch zwischen den Energieträgern Strom und Erdgas wechseln können.

2.2 Beschichtungsprozesses

In einer Beschichtungsanlage kann das Werkstück beschichtet werden und somit zusätzliche Kundenanforderungen wie den Schutz vor Korrosion oder Kratzern erfüllen. Im Referenzunternehmen wird dieser Prozessschritt bei einem externen Dienstleister durchgeführt. Im Rahmen eines möglichen Insourcings wurde untersucht, welche zusätzliche Energieflexibilität zur Verfügung gestellt werden kann.

Der Energiebedarf von Beschichtungsanlagen lässt sich in einen thermischen und elektrischen Anteil unterteilen, wobei elektrische Energie primär für Antriebe (z. B. Pumpen), Beleuchtung und Steuergeräte benötigt wird. Thermische Energie, welche überwiegend aus fossilen Quellen stammt, wird zur Trocknung und Konditionierung von Zuluft benötigt. Grundsätzlich sind der Energiebedarf und die Art der Energieversorgung von Beschichtungsanlagen stark produkt- und anlagenabhängig. Die Bestimmung des Energieflexibilitätpotenzials erfolgte auf Basis von Literaturwerten und flächenspezifischen Energieverbräuchen einer ähnlichen Anlage. Aufgrund des relativ geringen elektrischen Energiebedarfs vieler Einzelkomponenten (z. B. Ventilatoren, Pumpen, Beleuchtung) wurden die elektrischen Verbraucher nicht im Detail betrachtet (Mages und Sauer, 2021).

Zur Bestimmung des Energieflexibilitätpotenzials wurden der Energieträgerwechsel und die Speicherung von Energie untersucht. Das Energieflexibilitätpotenzial wurde auf Basis einer Schichtlänge von 7,5 h und einer Abrufhäufigkeit von 200 Tagen/Jahr errechnet.

2.3 Recyclingofen

In vielen Prozessschritten des Nichteisenmetalldruckgusses fällt recycelbares Material an. Dies kann beispielsweise direkt beim Druckguss-Prozess, beim Sägen, Stanzen und Schleifen oder in der CNC-Nachbehandlung auftreten (*Abbildung 4*). Dieses Material wird aktuell gesammelt und extern zum Recycling gegeben. Eine Möglichkeit, die Fertigungstiefe zu erhöhen und das Energieflexibilitätpotenzial zu steigern, bietet die Beschaffung eines eigenen Recyclingkipfens.

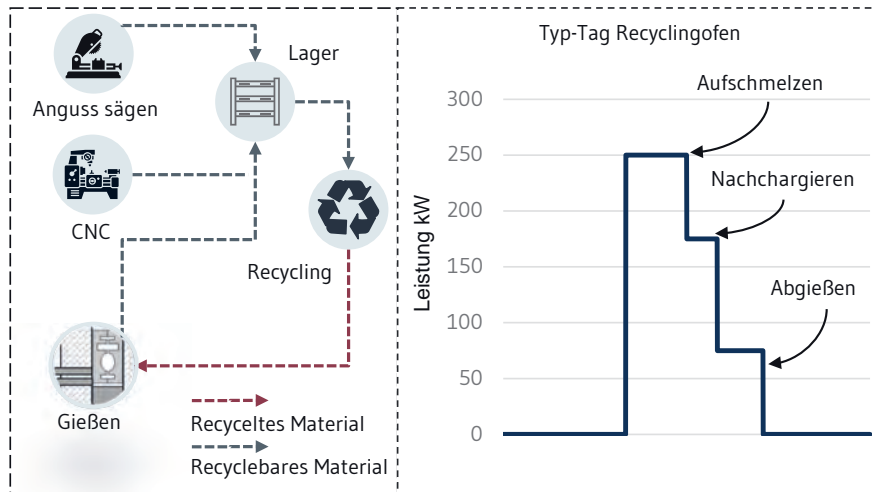


Abb. 4 Prozess (l.) und Typ-Tag mit charakteristischem elektrischem Energieverbrauchsprofil (r.)

Der hier ausgelegte bivalente Recyclingkippen hat ein Fassungsvermögen von 1.600 kg und eine elektrische Nennleistung von 250 kW bzw. eine Brennerleistung von 600 kW. Das recyclingfähige Material fällt nicht regelmäßig an, sodass es zunächst intern im Lager gesammelt werden muss. Im Batch-Verfahren wird das Material dann (je nach Aufkommen und Energieflexibilitätsbedarf) bei 680 °C Schmelzbadtemperatur und einer elektrischen Leistungsaufnahme von 250 kW eingeschmolzen. Anschließend wird bei 175 kW Material nachgeladet, sodass das Fassungsvermögen vollständig genutzt und die Effizienz erhöht wird. Das Abgießen in die Masselformen benötigt vergleichsweise wenig Energie. Hier werden 75 kW zum Warmhalten benötigt (*Abbildung 2 rechts*). Der gesamte Prozess vom Aufschmelzen bis zum Abgießen dauert etwa acht Stunden. Innerhalb eines Jahres fällt beim betrachteten Industrieanwendungsfall so viel recyclebares Material an, dass dieser Prozess ca. 65- bis 95-mal pro Jahr ausgeführt werden kann. Pro Charge kann der Energieträger unter den genannten Rahmenbedingungen und der Anlagenkonfiguration ca. 80-mal gewechselt werden.

Zur Erhöhung der Energieflexibilität stehen demnach der Energieträgerwechsel und die Verschiebung des Auftragsstarts zur Verfügung. Generell sind auch die Energieflexibilitätsmaßnahmen »Prozessparameter anpassen« und »Prozess unterbrechen« denkbar. Aufgrund der bivalenten Auslegung ist dies allerdings nicht sinnvoll, da hier auch ohne Produktionsstopp und ohne Einfluss auf die Qualität die gleiche Energieflexibilität angeboten werden kann.

Die maximal flexibilisierbare Energie pro Abruf beträgt 1.500 kWh. Der Vorteil des bivalenten Recyclingkippen ist zum einen der höchst dynamische Betrieb aufgrund des Energieträgerwechsels. Zum anderen kann durch die Verschiebung des Auftragsstarts über einen langen zeitlichen Horizont Energieflexibilität zur Verfügung gestellt werden.

2.4 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen im Nichteisenmetalldruckguss

Die aussichtsreichste Energieflexibilitätsmaßnahme im Nichteisenmetalldruckguss ist der Energieträgerwechsel, insbesondere beim Schmelzofen. Dieser soll im Hinblick auf die Energiepreisoptimierung im Tageshorizont, aber auch deutlich kurzfristiger, eine Aktivierung der Energieflexibilitätsmaßnahme ermöglichen. Der Energieträgerwechsel kann aber auch saisonale Stromangebotschwankungen ausgleichen.

Tab. 1 Übersicht ausgewählte Energieflexibilitätsmaßnahme des Nichteisenmetalldruckgusses

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Energieträgerwechsel	Torun Bark Magnesium GmbH	Metallverarbeitende Industrie

2.5 Energieflexibilitätsmaßnahmen des Nichteisenmetalldruckgusses bei der Torun Bark Magnesium GmbH

Das Unternehmen Torun Bark Magnesium GmbH (Torun Bark) wurde im Oktober 2019 als Nachfolger der C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH mit Sitz in Schörzingen gegründet. In Zusammenarbeit mit der Oskar Frech GmbH & Co. KG wurde bereits 1967 die erste Warmkammerdruckgussmaschine für Magnesium entwickelt und betrieben. Im Jahr 1986 erfolgte die Neugründung als C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH mit der Spezialisierung auf Magnesiumdruckgussteile. Zum Produktportfolio gehören neben Teilen für die Motorradindustrie auch Gehäuse für optische Instrumente und Elektrowerkzeuge. Namhafte Unternehmen wie BMW, Ducati, Carl Zeiss Sport Optics oder Festool gehören zum Kundenstamm.

Energieflexibilitätspotenziale finden sich im gesamten Produktionsprozess, insbesondere bei den Tiegelöfen. Diese werden im Schichtbetrieb kontinuierlich über das Jahr zum Aufschmelzen von Magnesiumblöcken (sogenannte Masseln) benötigt. Dieses Anlagenkonzept wird in Zusammenarbeit von Fraunhofer IPA, dem Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart, der Hindenlang GmbH und der Torun Bark Magnesium GmbH entwickelt.

Die Hindenlang GmbH ist auf die Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Montage und Inbetriebnahme von gießereitechnischen Anlagen im Bereich der Nichteisenmetalle spezialisiert. Der heutige Kundenstamm der Hindenlang GmbH reicht vom kleinen Kunstgießer bis zum großen, weltweit agierenden Automobilkonzern und dessen Zulieferern.

2.6 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

In *Tabelle 2* sind ausgewählte Flexibilitätspotenziale auf Wirtschaftszweigebeine, ihre Abrufdauer und ihre Abrufhäufigkeit dargestellt. Die Berechnungsgrundlagen und Annahmen sind in (Sauer et al., 2019) dargestellt. Abgeschätzt auf den Wirtschaftszweig Metallerzeugung und -bearbeitung in Deutschland kann die Last perspektivisch um 948 MW erhöht bzw. um 547 MW verringert werden. Nach dem Vorgehen in Zachmann und Seifermann (2021) beträgt das jährliche CO₂-Vermeidungspotenzial ca. 13.000 Kilotonnen.

Tab. 2 Energieflexibilitätspotenziale ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen des Nichteisenmetalldruckgusses auf Wirtschaftszweigebeine

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätspotenzial Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
ETW Pulverbeschichtung	289 MW Abrufdauer: max. 8 h Abrufhäufigkeit: ca. 220-mal pro Jahr
ETW Recyclingofen	150 MW Abrufdauer: max. 8 h Abrufhäufigkeit: ca. 80-mal pro Jahr
ETW Ofen	143 MW Abrufdauer: max. 16 h Abrufhäufigkeit: ca. 220-mal pro Jahr
Schmelze im Ofen ausnutzen	45 MW Abrufdauer: max. 0,23 h Abrufhäufigkeit: ca. 45-mal pro Jahr

3 Technische Umsetzung eines bivalenten Ofens

Autoren: Mages · Köse · Gerdes · Sauer · Hartmann · Dick

In diesem Kapitel werden die Konzeptionierung, die energetische Bewertung und die Ausgestaltung des Ofens dargestellt. Für einen wirtschaftlichen Einsatz muss dabei neben dem energieflexiblen Betrieb eine hohe Energieeffizienz angestrebt werden (Köse und Sauer, 2019).

3.1 Vorauswahl des Brennersystems

Bei der Brennerauswahl wurden sechs häufig eingesetzte Industriegasbrenner gegenübergestellt. Diese wurden in einem Workshop hinsichtlich der in *Tabelle 3* aufgeführten Kriterien in einer Vorauswahl miteinander verglichen. Als Ergebnis konnten der Oberflächen- und der Rekuperatorbrenner als besonders aussichtsreich identifiziert werden. Für diese wurden detaillierte Ofenkonzepte ausgearbeitet.

Tab. 3 Vorauswahl häufig eingesetzter Industriegasbrenner (Die Bewertung erfolgte mit Schulnoten; 1 = sehr gut, 6 = ungenügend.)

Brennertyp	Gebläse	Mündungsgemisch	Poren	Regenerator	Rekuperator	Oberflächen
Einbaumaß	1	2	3	6	1	1
NO _x -Werte	5	5	2	1	2	1
Flammgeschwindigkeit	3	6	1	2	2	1
Gasverbrauch	4	4	1	1	2	2
Temperaturverhalten Ofen	2	2	6	2	2	3
Fazit	3	4	2,5	2,4	2	1,6

3.2 Steuerung und Regelung

Die Gesamtsteuerung der Ofenanlage übernimmt die Temperaturregelung sowie die Auswertung und Verarbeitung der Prozessdaten. Die zentrale Baugruppe stellt eine speicherprogrammierbare Steuerung dar, mit der alle relevanten Anlagenzustände bzw. Parameter über ein Bedienpanel visualisiert werden können. Als Kommunikationsprotokoll wird auf das Profinet-Protokoll zurückgegriffen. Zusätzlich wird eine Schnittstelle nach OPC UA zur Anbindung an übergeordnete Leitstände vorbereitet.

Um den hohen prozess- und sicherheitstechnischen Anforderungen an die Temperaturführung der Magnesiumschmelze gerecht zu werden, wird eine softwaremäßige PID-Regelung in Form einer Kaskadenregelung eingesetzt. Der daraus resultierende Stellgrad des Slave-Reglers dient als Soll-Stellgrad für die Thyristoren der elektrischen Widerstandsheizelemente oder für den Gasbrenner. Je nach Beheizungsart bzw. Energieträger erfolgt eine zusätzliche Umschaltung der genutzten PID-Parametersätze, um differenzierter auf die unterschiedlichen Temperaturführungsverhalten reagieren zu können.

Die Umschaltung zwischen den beiden Energieträgern Gas und Strom kann auf drei Wegen erfolgen. Neben der manuellen Auswahl des Energieträgers über die Ofensteuerung kann die Umschaltung über ein Signal auf Hallennetzebene erfolgen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den Wechsel

nach dem Empfang eines Signals des Stromanbieters durchzuführen, welches über die Hallennetzanbindung übermittelt wird. Als Mindestdauer zwischen dem Wechsel der Energieträger wird eine minimale Abrufdauer von fünf Minuten angesetzt.

Durch den Einsatz der programmierbaren Steuerung und durch die Vorbereitung umfangreicher Schnittstellen kann das Energieflexibilitätpotenzial des Tiegelofens sowohl energie- als auch prozess-technisch deutlich gesteigert werden.

3.3 Konstruktion

Im Folgenden werden die ausgearbeiteten Ofenkonzepte mit Rekuperator-, Oberflächen- und kompaktem Gasbrenner dargestellt. Der Bauraum des Ofens wird von der vorhandenen Druckgussmaschine vorgegeben. Die zur Umrüstung ausgewählte Anlage wird normalerweise mit einem rein widerstandsbeheizten Schmelzofen betrieben. Um eine optimale Flammenausbildung zu gewährleisten, wird für brennstoffbeheizte Öfen bei gleicher Nennleistung üblicherweise ein größeres Ofenvolumen benötigt. Der vorhandene Bauraum stellt sich somit für den brennstoffbeheizten Betriebsmodus als sehr kompakt heraus, was im Aufbau des Versuchsofens zu einem Kompromiss des optimalen Brenners und dessen Positionierung im Ofen führt. In *Abbildung 5* ist das Ofenmodell mit einem Rekuperatorbrenner gezeigt.

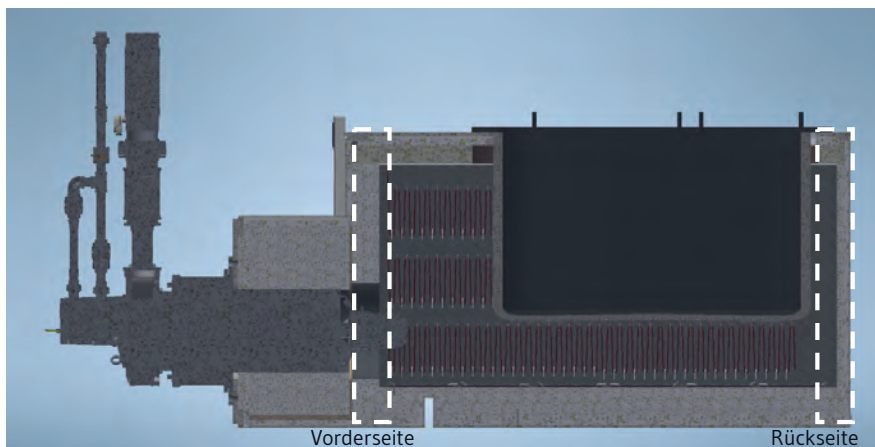


Abb. 5 Schnitt des ausgearbeiteten Ofenkonzepts mit Rekuperatorbrenner

Oberhalb einer Ofentemperatur von 850 °C stellt sich eine flammlose Verbrennung ein, mit der niedrige Verbrennungstemperaturen und Stickstoffoxid-Emissionen (NO_x-Emissionen) erreicht werden. Die Reaktionszone bildet sich unterhalb des Tiegels aus. Die heißen Abgase umströmen den Tiegel

und werden danach über den Brennermund dem Ofen entzogen. Durch den Abzug der Abgase über den Brennermund wird die Verbrennungsluft über den eingebauten Rekuperator vorgewärmt (Wünning und Wünning, 1997).

In *Abbildung 6* ist das ausgearbeitete Ofenmodell mit einem Oberflächenbrenner zu sehen. Die Vorteile des Konzepts liegen in den niedrigen NO_x -Emissionen und den sehr niedrigen Flammgeschwindigkeiten. Der Aufbau mit dem Oberflächenbrenner ist wesentlich kompakter als der Aufbau mit Rekuperatorbrenner.

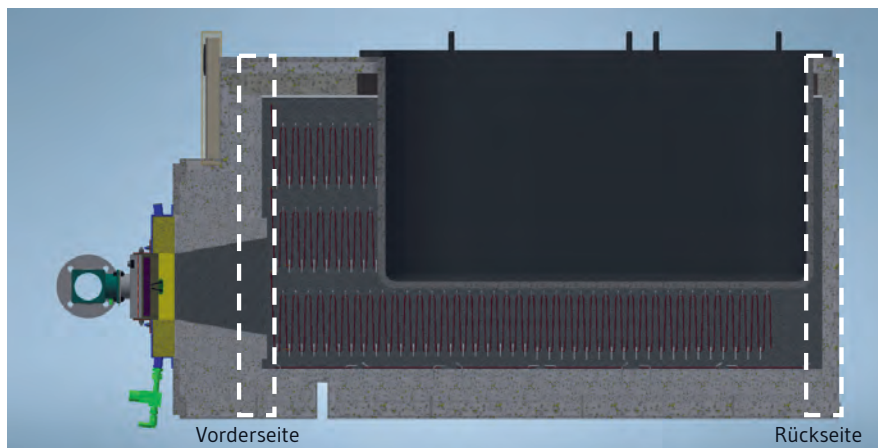


Abb. 6 Schnitt des ausgearbeiteten Ofenkonzepts mit Oberflächenbrenner

In diesem Konzept verbrennt das Gas-Luftgemisch an der Brenneroberfläche. Die heißen Abgase strömen um den Tiegel herum und werden anschließend über den Abgasstutzen am Ofengehäuse an den Abgaskamin übergeben. Bedingt durch die niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten ist von einem niedrigeren konvektiven Wärmeübergang und einer geringeren Abrasion am Tiegel als beim sogenannten FLOX-Brenner auszugehen.

In *Abbildung 7* ist das Ofenmodell mit kompaktem Gasbrenner dargestellt. Die erarbeitete Lösung ist innerhalb und außerhalb des Ofens deutlich kompakter als beim FLOX-Brenner, was eine größere Freiheit der Brennerpositionierung ermöglicht. Zudem wird durch die konventionelle Verbrennung das benötigte Ofenvolumen reduziert. In Kauf genommen wird dabei ein geringerer Wirkungsgrad, eine inhomogenere Temperaturverteilung im Ofen und höhere NO_x -Emissionen. Über einen separaten Wärmeübertrager, der an die Abgasführung gekoppelt ist, wird die Verbrennungsluft für den Gasbrenner vorgewärmt, dem Brenner zugeführt und so die Energieeffizienz erhöht.

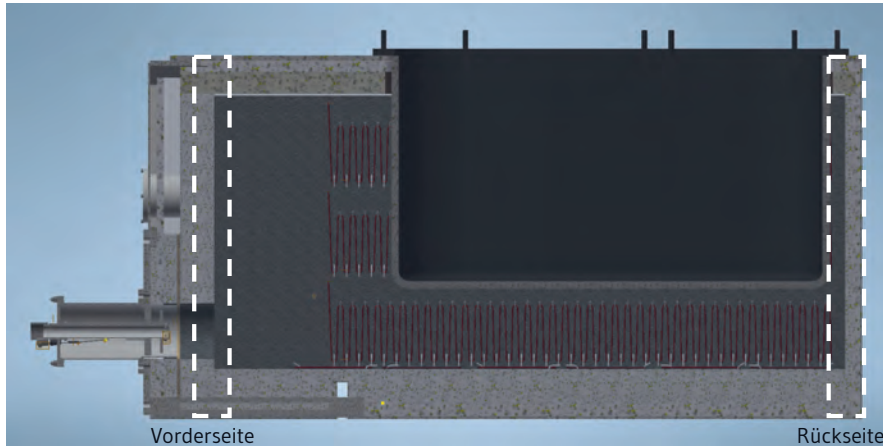


Abb. 7 Schnitt des ausgearbeiteten Ofenkonzepts mit kompaktem Gasbrenner

Der elektrische Betrieb erfolgt in allen drei Konzepten über mehrere indirekte Widerstandsheizelemente an den Seiten- und Bodenflächen des Ofens. Diese sind mäanderförmig angebracht (Abbildungen 5, 6 und 7), sodass eine möglichst große Fläche für die Beheizung zur Verfügung steht und eine gleichmäßige Wärmeverteilung im Tiegel gewährleistet wird. Aufgrund von Bauraumrestriktionen muss der Tiegel sehr nah an der Rückseite positioniert werden. Deshalb können auf der Ofenrückseite keine Heizelemente installiert werden.

3.4 Numerische Simulation

Für die Auslegung des bivalenten Ofens wurde eine numerische Simulation der Schmelztiegelbeheizung durchgeführt. Die Position des Tiegels, die Nutzung von verschiedenen Brennern sowie die Beheizung mit Strom wurden hinsichtlich Temperaturverhalten im Ofen, Effizienz sowie dem Einstrahlverhalten in den Tiegel bewertet. Hierfür wurden mehrere Parameterstudien durchgeführt.

3.4.1 Elektrische Beheizung des Ofens

Der elektrische Betrieb des bivalenten Ofens erfolgt über mehrere indirekte Widerstandsheizelemente. Aufgrund der Komplexität der Simulation müssen jedoch Annahmen getroffen werden, welche die Rechenzeit bei geeigneter Genauigkeit reduzieren sollen. Grundsätzlich kann Wärme über die Mechanismen Konduktion (Wärmeleitung), Konvektion und Wärmestrahlung übertragen werden. Aufgrund der räumlichen Trennung der Heizelemente zum Tiegel tritt keine Konduktion auf und der Einfluss der Konvektion auf den Gesamtwärmeeintrag kann in Anbetracht seines geringen Beitrags vernachlässigt werden. Damit identifiziert sich die Wärmestrahlung als Hauptwärmeübertragungsmechanismus und die Simulation kann auf diesen reduziert werden.

Für die Simulation des elektrischen Ofenbetriebs werden die Tiegelposition und die Nutzung einer Rückwandheizung betrachtet. Die Parametervariation ist in *Abbildung 8* zu sehen.

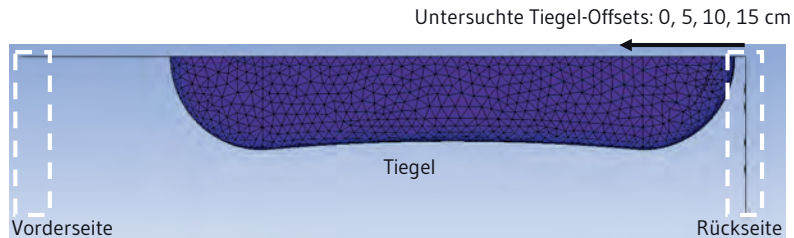


Abb. 8 Übersicht auf den Tiegel mit Rückseite des Ofens, Symmetrieebene und untersuchte Tiegel-Offsets der Parameterstudie

Die Variation der Tiegelposition wurde in vier Szenarien durchgeführt, bei denen der Abstand zur Rückseite des Ofens ansteigt. Die daraus resultierenden Verteilungsfunktionen der in den Tiegel eingehenden Strahlungsleistungen sind in *Abbildung 9* dargestellt.

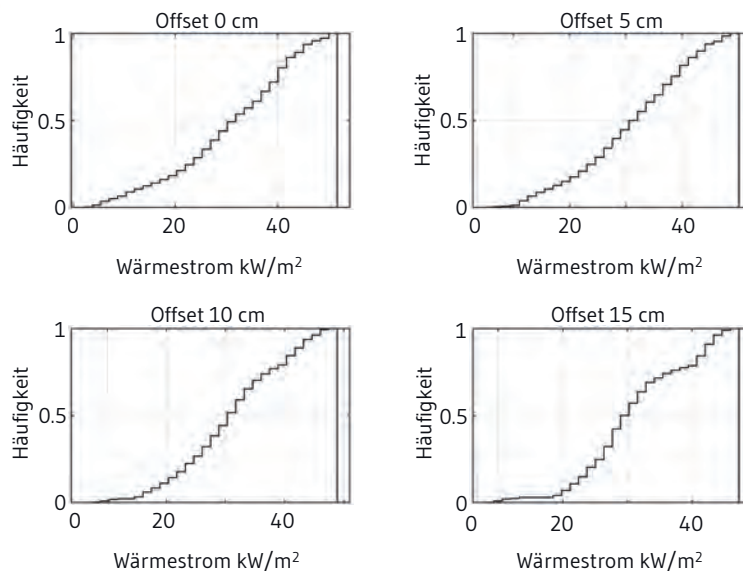


Abb. 9 Kumulierte Häufigkeiten der in den Tiegel eintreffenden Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Tiegel-Offsets

Wie erkennbar ist, wird die Streuung mit steigendem Offset des Tiegels geringer. Daraus lässt sich ein gleichmäßigerer Wärmeeintrag in den Tiegel ableiten, wobei in allen Fällen Regionen mit geringer Einstrahlung existieren. Diese befinden sich hauptsächlich auf der Rückseite des Tiegels, während sich die besonders stark angestrahlten Bereiche auf der Tiegelvorderseite befinden. Dabei bleiben die mittlere Einstrahlung und damit die Gesamtheizleistung in allen Szenarien fast gleich, sodass mit steigendem Abstand die Intensität der Hotspots am Tiegel zurückgeht.

Die schwache Einstrahlung auf der Tiegelrückseite ist durch das Fehlen von Heizelementen an der Ofenrückseite bedingt. Der Einfluss der Rückwandheizung auf die Verteilungsfunktion der eingehenden Strahlungsleistung ist in *Abbildung 10* visualisiert.

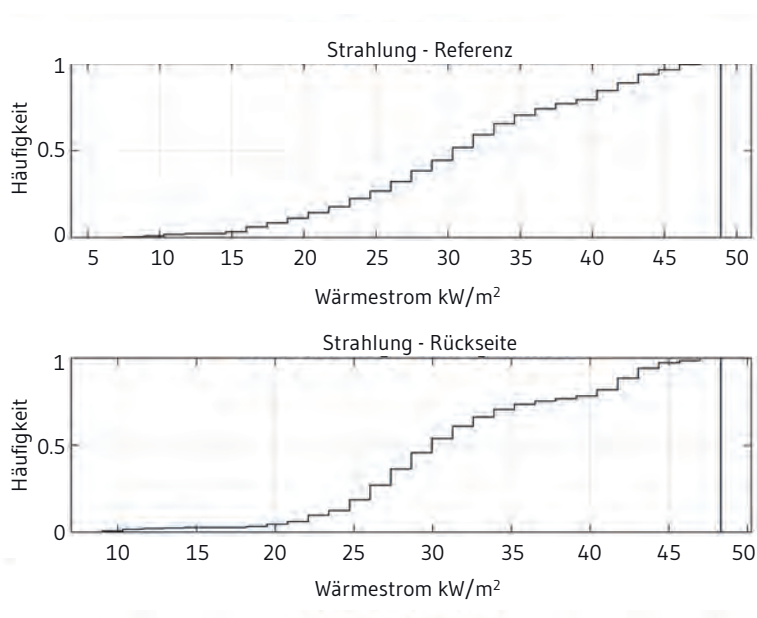


Abb. 10 Kumulierte Häufigkeit der in den Tiegel eintreffenden Wärmestrahlung mit und ohne Rückwandheizung

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Rückwandheizung eine gleichmäßigere Ausstrahlung des Tiegels ermöglicht. Durch die Vergrößerung der Heizfläche wird eine geringere Strahlung der einzelnen Heizflächen möglich, sodass die Intensität der Hotspots verringert wird.

Daraus kann gefolgert werden, dass der gleichmäßigste Wärmeeintrag in den Tiegel durch eine zusätzliche Rückwandheizung erreicht wird, was durch die Anpassung weiterer Parameter nochmals verbessert werden kann. So trägt ein Verschiebung des Tiegels um 15 Zentimeter zu einer verbesserten Ausstrahlung bei. Eine lokale Reduktion der Heizleistung am Boden und eine Anhebung der Leistung am oberen Seitenheizelement kann das Einstrahlprofil weiter glätten.

3.4.2 Gasbeheizter Fall

Für die Auswahl des Brenners im bivalenten Ofen werden die radiativen und konvektiven Wärmeeinträge sowie die Hotspot-Bildung eines Oberflächen- und FLOX-Brenners in einer Parameterstudie verglichen. Die Verteilungsfunktionen der in den Tiegel eingetragenen Wärmemenge sind in *Abbildung 11* zu sehen.

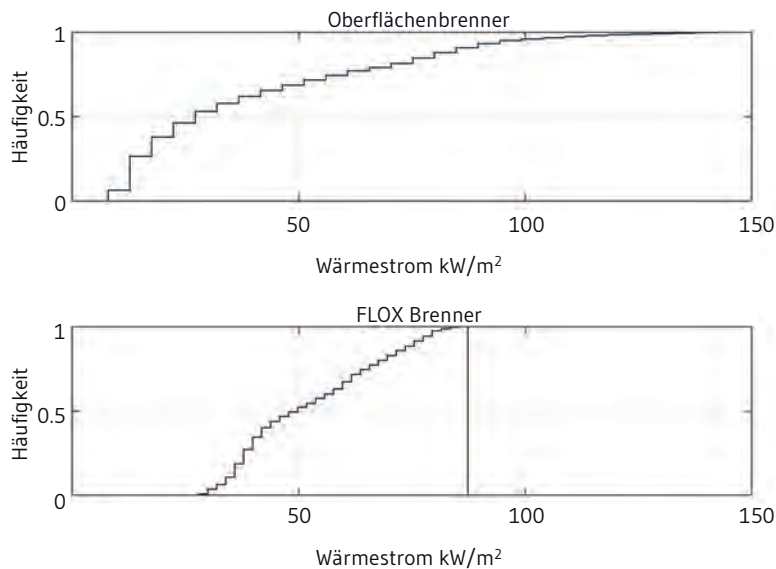


Abb. 11 Kumulierte Häufigkeiten der in den Tiegel eintreffenden Wärmestrahlung bei Oberflächen- und FLOX-Brenner

Wie den Diagrammen entnommen werden kann, treten im FLOX-Betrieb geringere maximale und weniger niedrige Wärmeströme auf. Durch die höhere Turbulenz des FLOX-Betriebs wird eine homogenere Temperaturverteilung im Ofen erreicht. Dies führt für den FLOX-Brenner verglichen mit dem Oberflächenbrenner zu einer deutlich gleichmäßigeren und höheren Wärmeeinstrahlung in den Tiegel. Damit ist prinzipiell das Ofenkonzept mit FLOX-Brenner thermisch zu empfehlen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Oberflächenbrenner den Tiegel sehr inhomogen aufheizt, was zu starken, thermisch induzierten Spannungen im Material führt. Dies kann die Standzeit des Tiegels erheblich mindern.

Zur Identifikation der idealen Position des FLOX-Brenners wurde eine Parameterstudie durchgeführt. In *Abbildung 12* sind die Szenarien visualisiert.

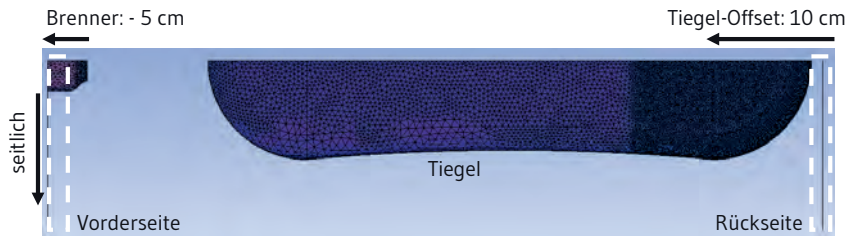


Abb. 12 Untersicht auf den Tiegel mit untersuchten Varianten

In *Abbildung 13* ist für die vier Szenarien die Verteilung des Wärmestroms in den Tiegel gezeigt. Alle Szenarien weisen einen annähernd gleichen Wärmeeintrag in den Tiegel auf. Der gleichmäßigste Wärmeeintrag wird bei einer seitlichen Position des Brenners erreicht. Die Ergebnisse deuten an, dass eine mittige Positionierung des Brenners die Rezirkulation des Abgases und somit Vermischung des Brennstoffmassenstroms stört, was zu einem ungleichmäßigeren Wärmeeintrag in den Tiegel führt.

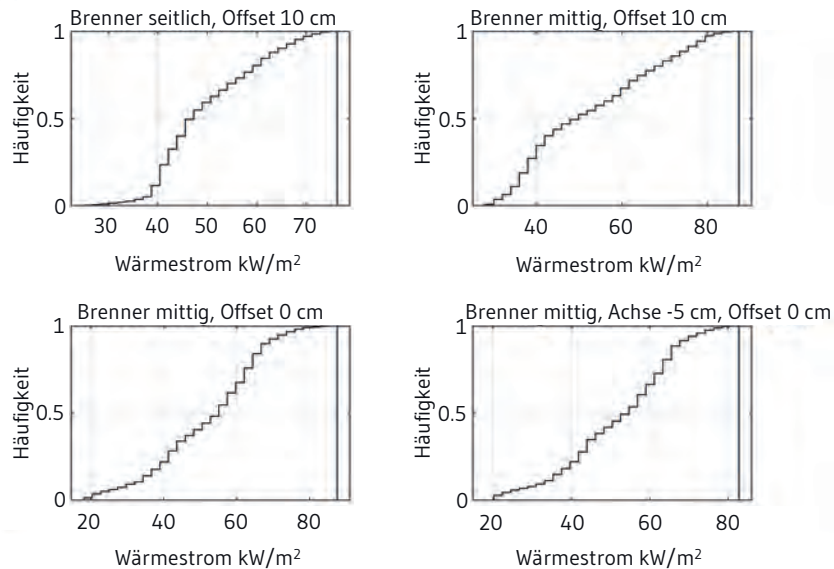


Abb. 13 Kumulierte Häufigkeiten der in den Tiegel eintreffenden Wärmestrahlung im gasbeheizten Fall für die vier verschiedenen Szenarien

Auf Basis der Simulationsergebnisse ist eine seitliche Positionierung des Brenners mit einem Tiegelverschub von 10 Zentimetern zu empfehlen. Des Weiteren sollte der Brenner möglichst nah an der Einlasswand platziert werden, damit ein möglichst langer ungestörter Mischungsweg erreicht wird.

Aufgrund von Bauraumrestriktionen kann weder eine seitliche Positionierung des Brenners noch eine Verlängerung des Ofens mit mittiger Brennerposition und damit kein störungsfreier Mischungsweg für Brennstoff und Oxidator mit gleichmäßiger Temperaturverteilung realisiert werden. Die Ergebnisse der numerischen Simulation zeigen, dass ohne die genannten Anpassungen Hotspots im Bereich der Heizelemente und des Tiegels nicht ausgeschlossen werden können.

4 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahme

Autoren: Mages · Köse · Sauer

Verschiedene Parameter können die Höhe der Energiekosteneinsparung durch eine bivalente Energieversorgung beeinflussen. In einer Simulation wurden die in *Tabelle 4* gezeigten Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Energiekosteneinsparung untersucht, und das Ergebnis wurde qualitativ in eine Matrix übertragen (*Abbildung 14*). Dafür wurden die Parameter über eine große Spannbreite variiert. Unter anderem sind die Betriebszeiten (Prozessstart des Ofens) von Mitternacht bis sieben

Uhr verschoben worden. Ebenso wurden die zwei gewöhnlichen Schließtage (Samstag und Sonntag) auf andere Wochentage verschoben und der Einfluss dieser Energieflexibilitätsmaßnahme auf die Energiekosten ausgewertet.

Tab. 4 Analytierte Parameter bei den Simulationsexperimenten

	Parameter	Parametervariation ggü. 2018
 Energiepreisparameter	Strompreisvolatilität	80 bis 130%
	Strompreisreduzierung	–8 bis 0 ct/kWh
	Gaspreisaufschlag	0 bis 3 ct/kWh
 Prozessparameter	Auslastung	80 bis 120%
	Betriebszeiten	Acht Zeiten
	Schließtage	Alle Wochentage

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis der Parametervariation qualitativ aufgetragen in einer Matrix. Auf der y-Achse ist aufgetragen, wie gut ein Parameter vorhergesagt werden kann. Die x-Achse verzeichnet die monetäre Einsparung in Relation zu den anderen Parametern. Insgesamt kann damit die Relevanz der Parameter hinsichtlich Vorhersagbarkeit und Einfluss auf die Nutzung des bivalenten Konzepts bewertet werden.

Parameter sind umso relevanter, je weiter sie im Quadranten unten rechts eingeordnet sind. Diese Parameter haben zum einen großen Einfluss auf die Fragestellung, die der Szenarioentwicklung zugrunde liegt, sind allerdings zum anderen in ihrer zukünftigen Entwicklung schwer einzuschätzen. Basierend auf den Energiepreisen aus dem Jahr 2018 besitzt der Gaspreis den größten Einfluss auf das bivalente Konzept. Eine Veränderung des Erdgaspreises hat somit einen größeren Einfluss auf die Gesamtenergiekosten als eine Anpassung des Strompreises.

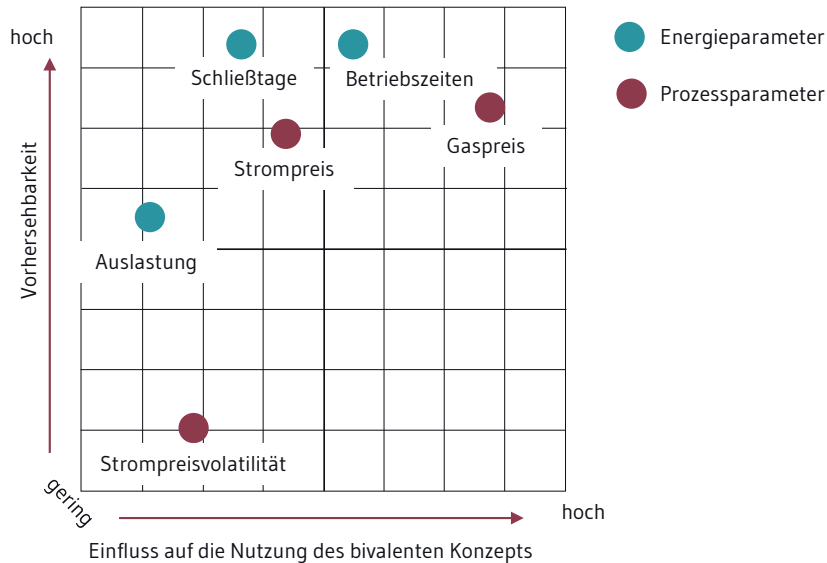


Abb. 14 Einflussparameter auf bivalentes Konzept

Abschließend kann eine starke Abhängigkeit von einer Vielzahl an Parametern auf den ökonomischen Nutzen des bivalenten Konzepts festgestellt werden. Im Best-Case-Szenario konnten gegenüber einem monovalenten Betrieb Kostenvorteile von bis zu zehn Prozent erzielt werden.

5 Literatur

DIERINGER, H., J. BOHLEN und D. QUITTER, 2017. Magnesiumlegierungen im Leichtbau [online]. 2017 [Zugriff am: 22. Juli 2021]. Verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/magnesiumlegierungen-im-leichtbau-a-552075/>

GUMINSKI, A., T. HÜBNER, E. ROUYRRE, S.V. ROON, M. SCHIMMEL, C. ACHELNIK, J.M. RHIEMEIER, U. FAHL und I. BAILEY, 2019. Energiewende in der Industrie: Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. ffE: München.

KÖSE, E. und A. SAUER, 2019. Impacts of Energy Flexibility on Energy Efficiency of Hybrid and Bivalent Facilities. *Procedia Manufacturing*, 39, 1297–1306. ISSN 2351-9789.

MAGES, A. und A. SAUER, 2021. Energieflexibilitätspotenzial von Beschichtungsanlagen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(9), 608–612. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*.

SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 9783839614792.

STEPHAN, W., K. ZITZMANN, G. PRÖBSTLE und J. KAPISCHKE, 2005. Effiziente Energieverwendung in der Industrie–Teilprojekt Metallschmelzbetriebe – Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg.

VAN HUYEN VU, T., 2011. Leichtbau durch den Einsatz von Magnesium [online] [Zugriff am: 22. Juli 2021]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/24442511-Leichtbau-durch-den-einsatz-von-magnesium.html>

ZACHMANN, B. und S. SEIFERMANN, 2021. CO₂-Vermeidungspotential beim Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen industrieller Nachfrageflexibilität.





C.10

Bivalente Wärmebehandlung in der
Massivumformung

Management Summary

In Deutschland werden 13 TWh elektrische Energie für die Metallverarbeitung eingesetzt. Ein Viertel davon wird für die Umformung von Metallwerkstücken verbraucht. Dazu gehört die Massivumformung von Stahl und Aluminium. Massivumgeformte Bauteile aus Aluminiumlegierungen kommen in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz, bei denen eine hohe Festigkeit bei geringem Gewicht entscheidend ist. Um die hohe Festigkeit der Aluminiumlegierung zu erreichen, ist eine Wärmebehandlung notwendig. Ein Teilprozess ist das Warmauslagern nach der Umformung. Bisher erfolgt das Warmauslagern in elektrisch beheizten Durchlauföfen. Zur Bereitstellung von kurz- bis mittelfristiger Energieflexibilität wurde der bivalente Betrieb eines Auslagerungs-ofens durch die Einbringung von zusätzlicher Heißluft aus einem Blockheizkraftwerk erforscht. Die neue bivalente Wärmebehandlungstechnologie wurde zunächst simulativ untersucht und im Weiteren in einer industriellen Pilotanlage der Hirschvogel Group erfolgreich erprobt.

Autoren

Beier-Möbius, Menia
menia.beier-moebius@iwu.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und
Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88, 91126 Chemnitz

Gschwill, Sebastian
sebastian.gschwill@hirschvogel.com
Hirschvogel Automotive
Dr.-Manfred-Hirschvogel-Straße 6, 86920 Denklingen

Ihlenfeldt, Steffen
steffen.ihlenfeldt@iwu.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und
Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88, 91126 Chemnitz

Strehle, Hanns-Martin
hanns-martin.strehle@iwu.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und
Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88, 91126 Chemnitz

1 Grundlagen und Potenziale in der Massivumformung

Autoren: Beier-Möbius · Strehle · Ihlenfeldt · Gschwill

1.1 Wärmebehandlung in der Massivumformung

Die Wärmebehandlung von Schmiedebauteilen ist ein zentraler Prozess zur Steigerung der Festigkeit nach der Umformung. Es können dadurch gezielt die Bauteileigenschaften beeinflusst werden, indem die Mikrostruktur des Werkstoffs verändert wird. Dieser Aushärtungsvorgang besteht aus den drei Stufen Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern (kalt und/oder warm) (Doege und Behrens, 2010). Diese Wärmebehandlungsprozesse erfordern neben dem Prozess zur Erwärmung der Vorform den zweitgrößten Energieeinsatz in der Massivumformung (Ade, 2017). Im Weiteren wird das Warmauslagern von massivumgeformten Aluminiumbauteilen näher betrachtet. Diese gehärteten Bauteile kommen in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz, bei denen eine hohe Festigkeit bei geringem Gewicht entscheidend ist. Insbesondere für den exportstarken Fahrzeugbau, die Luftfahrt und den Maschinenbau werden Schmiedeteile aus Aluminium gefertigt. In *Abbildung 1* ist ein typisches wärmebehandeltes Bauteil dargestellt.



Abb. 1 Wärmebehandeltes Aluminium-Schmiedebauteil (Radträger)

1.2 Energieflexibilitätsmaßnahmen bei Hirschvogel Group

Die Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Massivumformung wurden am Beispiel der Herstellung von Fahrzeugbauteilen an den Standorten Denklingen und Marksuhl der Hirschvogel Group untersucht.

Die Hirschvogel Group zählt zu den weltweit größten Herstellern von massiv umgeformten Bauteilen aus Stahl und Aluminium. Rund 5.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter stellen weltweit Umformteile und Komponenten für die Automobilindustrie und ihre Systemlieferanten her. Hirschvogel verfügt über jahrzehntelange Forschungserfahrung und modernste Fertigungseinrichtungen zur Entwicklung und Produktion von komplexen Komponenten und Baugruppen. Die Energie- und Ressourceneffizienz der Produktionsstandorte besitzt einen besonderen Stellenwert im Unternehmen. Im Rahmen des Energie- und Umweltmanagements nach DIN EN ISO 50001 und 14001 werden diese systematisch verbessert.

Es wurden fünf grundlegende Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) nach VDI 5207 (Blatt 1:2020) bestimmt (*Tabelle 1*).

Tab. 1 Energieflexibilitätsmaßnahmen bei der Hirschvogel Group

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Energiebivalenter Betrieb bei der Wärmebehandlung (thermisch/elektrisch)	Hirschvogel Group	Herstellung von Metallerzeugnissen
Produktionsauftrag unterbrechen	Hirschvogel Group	Herstellung von Metallerzeugnissen
Auftragsreihenfolge an den Umformanlagen ändern	Hirschvogel Group	Herstellung von Metallerzeugnissen
Energiebezug durch Kraft-Wärme-Kopplung anpassen	Hirschvogel Group	Herstellung von Metallerzeugnissen
Elektrochemische Energiespeicherung am Netzanschlusspunkt	Hirschvogel Group	Herstellung von Metallerzeugnissen

- Bei der ersten Energieflexibilitätsmaßnahme handelt es sich um den bivalenten Betrieb eines Wärmehandlungssofens für Aluminiumschmiedeteile, der bisher ausschließlich elektrisch betrieben wurde. Durch Integration einer zusätzlichen Wärmequelle kann die elektrische Leistung dynamisch um einen signifikanten Wert abgesenkt werden.
- Die zweite und dritte Energieflexibilitätsmaßnahme umfassen den lastflexiblen Betrieb eines größeren Pools an Umformanlagen am Standort. Es wird in eine kurzzeitige Auftragsunterbrechung (15 Minuten bis eine Stunde) und eine längerfristige Umplanung der Aufträge (8 bis 24 Stunden) unterschieden. Bei der Auftragsunterbrechung wurde eine Vollabschaltung des gesamten Lastpools betrachtet. Die Änderung der Auftragsreihenfolge beinhaltet hingegen eine Absenkung der Leistung um bis zu 25 Prozent pro Maschine. Die beiden EFM entsprechen den Minimal- und Maximalwerten des aktiv gemanagten Lastpools. Ein Betrieb innerhalb dieses Bereichs ist möglich.
- In der vierten Energieflexibilitätsmaßnahme wurde die Erhöhung des elektrischen Eigenversorgungsgrads durch den Betrieb von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen untersucht.
- Bei der fünften Energieflexibilitätsmaßnahme handelt es sich um den Einsatz eines stationären Lithium-Ionen-Batteriespeichersystems zur Spitzenlastsenkung und Flexibilitätsvermarktung (preisgesteuertes Laden und Entladen).

Für die fünf Energieflexibilitätsmaßnahmen wurden die Energieflexibilitätspotenziale auf Werksebene bestimmt. Bei der ersten und vierten EFM ist keine Nachholzeit vorhanden, da es sich um Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Infrastruktur handelt, die keine Auswirkung auf das Produktionsvolumen haben. Die Aktivierungsdauer bei EFM 5 wurde vernachlässigt, da diese bei einem Batteriespeichersystem im (Milli-)Sekundenbereich liegt. Die bestimmte elektrische Leistung entspricht dem Maximalwert des Abrufs bei der angegebenen Abrufdauer unter konstanten Bedingungen.

1.3 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

Es wurde eine Abschätzung der Energieflexibilitätspotenziale für den Wirtschaftszweig 25.5 »Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen« in Deutschland durchgeführt. Grundlage bildeten die ermittelten Energieflexibilitätsmaßnahmen und -potenziale der Hirschvogel Group. Die Skalierung auf den Wirtschaftszweig erfolgte durch Bildung unterschiedlicher Kennwerte. Aufgrund der starken Spreizung der Unternehmensgröße im Wirtschaftszweig wurde eine Gewichtung der Unternehmen in fünf Klassen nach Anzahl der Beschäftigten und der jährlichen Produktionsmenge durchgeführt. Es wurden Betriebe mit mindestens 50 Beschäftigten berücksichtigt. Ausgehend von den maßnahmenspezifischen Daten der Hirschvogel Group konnten die Energieflexibilitätspotenziale der Klassen und des Wirtschaftszweigs abgeschätzt werden. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 2* dargestellt.

Tab. 2 Abschätzung der Energieflexibilitätspotenziale in der Massivumformung Deutschlands für die betrachteten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätspotenzial Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Energiebivalenter Betrieb bei der Wärmebehandlung (thermisch/elektrisch)	Leistung: 45 MW Abrufdauer: 16 h Abrufhäufigkeit: 240-mal pro Jahr
Produktionsauftrag unterbrechen	Leistung: 565 MW Abrufdauer: 15 min Abrufhäufigkeit: 240-mal pro Jahr
Auftragsreihenfolge an den Umformanlagen ändern	Leistung: 113 MW Abrufdauer: 24 h Abrufhäufigkeit: 120-mal pro Jahr
Energiebezug durch Kraft-Wärme-Kopplung anpassen	Leistung: 151 MW Abrufdauer: 10 h Abrufhäufigkeit: 480-mal pro Jahr

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätspotenzial Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Elektrochemische Energiespeicherung am Netzanschlusspunkt	Leistung: 30 MW Abrufdauer: 1 h Abrufhäufigkeit: 2.880-mal pro Jahr

2 Technische Umsetzung der bivalenten Wärmebehandlung in der Massivumformung

Autoren: Beier-Möbius · Strehle · Ihlenfeldt · Gschwill

2.1 Wärmebehandlungsofen

Die Warmauslagerung von Aluminiumschmiedeteile erfolgt durch Hängebahnöfen (*Abbildung 2*). In der betrachteten Anwendung der Hirschvogel Group können im Ofen Achsschenkel oder Radträger mit einem maximalen Gewicht von 7,5 kg wärmebehandelt werden. Das umgeformte Stückgut wird mit Warenträgern an einer Hängebahn in den Ofen eingebracht. An der Hängebahn durchlaufen die Warenträger bei einer vollständigen Bestückung den Ofen in ca. fünf Minuten.

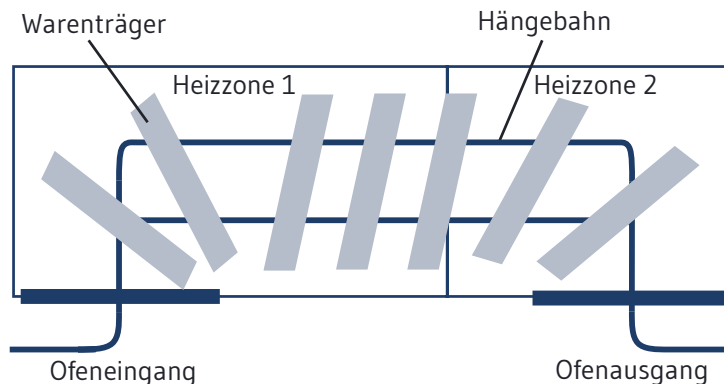


Abb. 2 Schema des AuslagerungsOfens (Draufsicht)

Der AuslagerungsOfen besteht aus zwei Heizzonen. Er wird bisher elektrisch mit fünf Heizregistern beheizt. In Heizzone 1 werden drei Heizregister mit jeweils 160 kW Leistung und in Heizzone 2 zwei Heizregister mit jeweils 50 kW Leistung verwendet. Die gesamte elektrische Heizleistung beträgt 580 kW. Im Werk wird der Ofen im Temperaturbereich zwischen 180 °C und 195 °C betrieben. Um

das Stückgut in den Ofen ein- und auszubringen, befinden sich seitlich an der vorderen Stirnseite und ebenfalls seitlich an der rückseitigen Kopfseite je eine Tür (*Abbildung 2*). Da der Ofen durch das Öffnen der Türen und das Einbringen neuer Bauteile abkühlt, wird die Heizung stetig geregelt. Im Ofen herrscht eine erzwungene Konvektion durch Ventilatoren, die an den Stirnseiten angebracht sind.

2.2 Konzept zur bivalenten Wärmeversorgung

Zur Flexibilisierung der elektrischen Leistung des Ofens wurde eine bivalente Erwärmungsstrategie verfolgt. Hierbei wird Heißluft aus der Abgaswärme zweier erdgasbetriebener Blockheizkraftwerke (BHKW) über Wärmetauscher als zusätzliche Wärmequelle in den Ofen eingebracht. Dadurch ist es möglich, die elektrische Leistung des Ofens dynamisch abzusenken.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über das Gesamtsystem. Das Abgas der BHKW wird in jeweils einen Abgaswärmetauscher geleitet, wodurch Luft auf der anderen Seite erwärmt wird. Diese Luft strömt durch ein Heißluftrohr direkt in den Ofen. Für eine stetige Konvektion wird ein Ventilator verwendet. Um die Luftzufuhr zu regeln, sind Stellklappen angebracht.

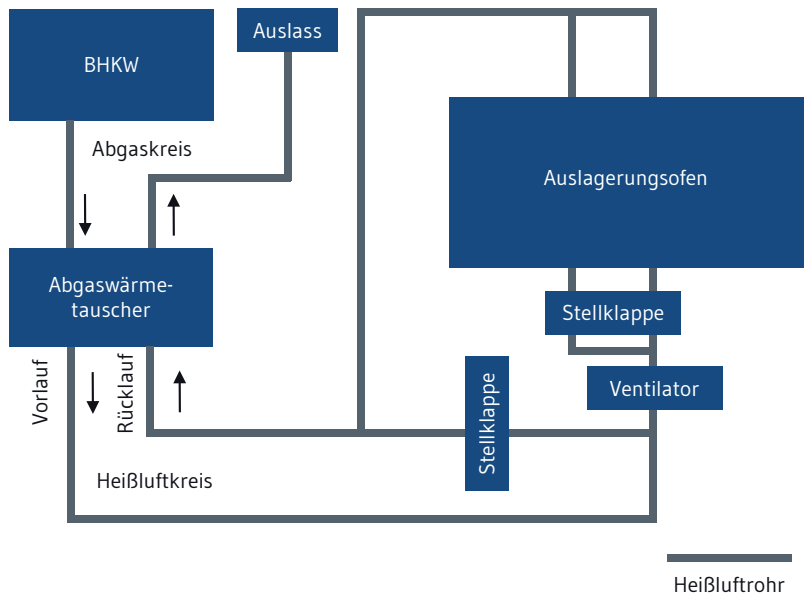


Abb. 3 Konzept des Heißluftkreislaufs der bivalenten Erwärmung

Beide BHKW werden jeweils mit einem Gasmotor betrieben, der Erdgas als Brennstoff nutzt. Die elektrische Nennleistung des Systems beträgt 524 kW und die thermische Nennleistung 750 kW. In den BHKW ist jeweils ein Abgaswärmetauscher mit einer thermischen Leistung von 100 kW integriert. Die Temperatur der Abgaswärme beträgt maximal 650 °C.

Die maximale Eintrittstemperatur der beiden Abgaswärmetauscher beträgt abgasseitig 641 °C bei einer Austrittstemperatur von 300 °C und einer Gasmenge von 902 kg/h. Heißluftseitig beträgt die Austrittstemperatur 370 °C und die Eintrittstemperatur 180 °C bei einem Betriebsvolumenstrom von 2.937 m³/h.

Die erwärmte Luft wird über ein Heißluftrohrsystem zum Ofen geführt. Hierfür wird ein zusätzlicher Ventilator verwendet. Der Ventilator erzeugt bei einer Drehzahl von 2.590/min einen Volumenstrom von 98 m³/min. Durch die zusätzliche Heißluft, die in den Ofen strömt, wird die Nutzung der elektrischen Heizregister der beiden Heizzonen reduziert, wodurch der Verbrauch der elektrischen Energie gesenkt wird.

Neben der Ofenbeheizung werden die BHKW über das Wärmeauskopplungsmodul für die Erwärmung weiterer Warmwasserkreisläufe zweier Produktionshallen am Standort genutzt.

2.3 Simulationsbasierte Untersuchung der Anlage

Im Rahmen des Projekts wurde ein Simulationsmodell für die bivalente Wärmebehandlung entwickelt. Ziel war es, dadurch die elektrischen und thermischen Leistungsflüsse sowie die Temperaturen der Betriebsmittel berechnen zu können. Auf dieser Basis wurde es möglich, unterschiedliche Lastsituation zu simulieren, die Auslegung anzupassen und die Betriebsführung zu optimieren. Außerdem lässt sich dadurch im Vorfeld eine flexible Fahrweise der Gesamtanlage betrachten und somit lassen sich die technischen sowie wirtschaftlichen Risiken begrenzen.

Um den bivalenten Wärmebehandlungsofen zu simulieren, wurde die Software MATLAB-Simulink mit der Toolbox Simscape verwendet. Die Toolbox Simscape wurde genutzt, um ein Systemsimulationsmodell der verschiedenen Komponenten aufzubauen, das auf den physikalischen Verbindungen basiert. Hierbei wurden verschiedene physikalische Bibliotheken verwendet. Die thermische Simulation des Ofens erfolgte mit der thermischen Bibliothek; die Komponenten des Wärmetauschers wurden mit der fluidtechnischen Bibliothek und die elektrischen Komponenten mit der elektrischen Bibliothek modelliert sowie simuliert. Die Komponenten wurden zusammengeführt, um das Gesamtsystem abzubilden.

Für das thermische Modell wurde der Wärmebehandlungsofen in fünf Segmente unterteilt. Segment 1 ist der erste Teil des Ofens mit der Tür, durch die die Bauteile in den Ofen eingebracht werden. Der letzte Teil des Ofens ist Segment 5 mit der Tür, durch die die Bauteile den Ofen wieder verlassen. Eine Vereinfachung der Simulation ist, dass jedes Segment über ein elektrisches Heizregister beheizt wird, dessen Werte aus dem Datenblatt stammen. Um die bivalente Erwärmung zu ermöglichen, wird die Abgaswärme des BHKW mittels Wärmetauscher in den Ofen eingebracht. Im Simulationsmodell erfolgt dies bei Segment 3.

Die elektrische Heizung wurde durch eine steuerbare Wärmequelle (Controlled Heat Flow Rate) nachgebildet. Hierbei erfolgte die Regelung über einen Zweipunktregler, der den Istwert der Temperatur innerhalb des Segments 2 mit dem Sollwert vergleicht und die Heizung ein- oder ausschaltet. Da der Ofen zwei Heizzonen besitzt, wurden die Segmente 1 bis 3 in die Heizzone 1 eingruppiert und die Segmente 4 und 5 in die Heizzone 2. Die Temperaturmessung für Heizzone 1 wurde in Segment 2 angenommen und die Temperaturmessung für Heizzone 2 in Segment 4. Die Umgebungstemperatur des gesamten Ofens wurde mittels einer Temperaturquelle vorgegeben. Die inneren Luftsegmente des Ofens sind mittels eines Wärmeübergangswiderstand (Convective Heat Transfer) verbunden. Der Wärmestrom der elektrischen Heizung wurde über einen Sensor (Heat Flow Rate Segment) erfasst.

Der innere Aufbau eines Segments ist in *Abbildung 4* dargestellt. Das thermische Modell wurde als Cauer-Netzwerk aufgebaut und besteht aus thermischen Widerständen und Massen. Die Ofenwand besteht aus drei Teilen: einer Innen- und einer Außenwand sowie einer dazwischen eingebrachten Isolierung. Deshalb sind für jeden Wandbestandteil drei thermische Massen abgebildet. An den Stahlwänden herrscht Konvektion und Konduktion (Wärmeleitung). Innerhalb der festen Isolation herrscht nur Konduktion. Der thermische Widerstand der jeweiligen Schicht ist in zwei gleich große Teile aufgeteilt, und die thermische Masse wird zwischen den beiden angebunden.

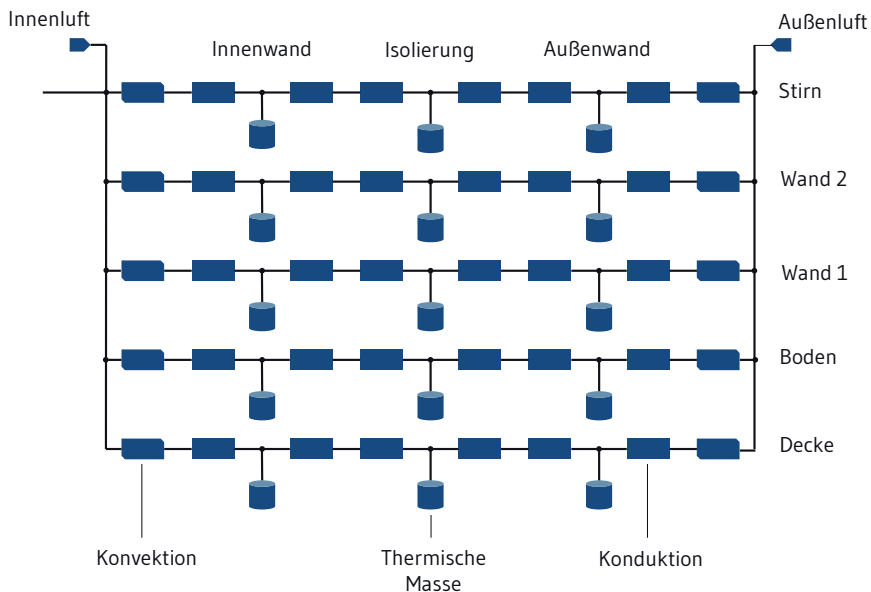


Abb. 4 Innerer Aufbau eines Ofensegments

Das thermische Netzwerk für die Luft innerhalb eines Ofensegments ist in *Abbildung 5* dargestellt. Hierbei wird die Luft in Teile bzw. thermische Massen aufgeteilt, die durch thermische Widerstände miteinander verbunden sind. Es ist ebenfalls als Cauer-Netzwerk aufgebaut.

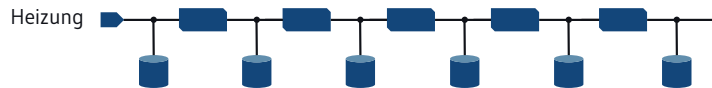


Abb. 5 Thermisches Netzwerk der Luft innerhalb eines Ofensegments

Für die Modellierung des Wärmetauschers wurde das Modell des Gaswärmetauschers aus der Simscape-Bibliothek genutzt. Das Gas strömt hierbei von einem Reservoir in ein anderes. Auf Basis der Angaben aus der Anwendung bei Hirschvogel sowie Datenblattangaben wurden Gaseigenschaften festgelegt. Der eingebaute Ventilator wird mit einer Gleichspannungsquelle gespeist und angetrieben. Die Lüftungsklappen wurden durch ein Gate abgebildet, das je nach gemessenem Temperaturwert im Ofen geregelt wird. Der Wärmeübergang in das Innere des Ofens erfolgte mittels einer Pipe. Die thermische Masse der Luft innerhalb des Ofenrohrs wird in diesem Submodell durch die thermische Masse abgebildet. In der Realität sind Ventilator und Regelventil näher am Ofen angebracht; dies wurde im Modell vereinfacht. Um den zweiten Wärmetauscher abzubilden, wurde dasselbe Modell noch einmal aufgebaut. Beide Modelle überführen die erzeugte Wärme in Segment 3.

2.4 Ergebnisse der Simulation

In *Abbildung 6* sind die Wärmeströme bei Nutzung der Abgaswärme innerhalb der Segmente 3 und 4 dargestellt. Hierbei erfolgt der bivalente Betrieb mittels der Abgaswärmetauscher, und die Ventile regeln die Zufuhr der Wärme in den Ofen. Durch die Ventilsteuerung ergibt sich der schwankende Verlauf des Wärmestroms. Da das elektrische Heizregister des Segments 3 mit einer Leistung von 160 kW heizt und das Heizregister des Segments 4 mit einer Leistung von 50 kW, ergibt sich die unterschiedliche Höhe im Maximalwert des Wärmestroms. Dadurch benötigt auch Segment 4 länger, um die Luft innerhalb des Segments zu erwärmen.

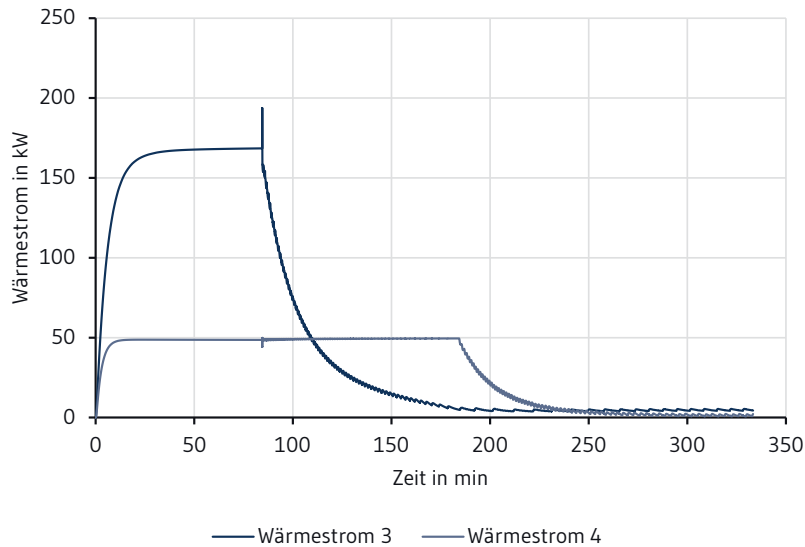


Abb. 6 Wärmestrom innerhalb des Ofens für die Segmente 3 und 4 bei Nutzung der Abgaswärme

Die Temperaturen der Ofenluft der Segmente 2, 3 und 4 sind in *Abbildung 7* dargestellt. Auch hier wird die unterschiedliche Heizleistung der elektrischen Heizregister der Segmente deutlich. Das Thermoelement zur Regelung der Heizzone 1, zu der die Segmente 2 und 3 gehören, ist innerhalb des Segment 2 für die Simulation angenommen. Dadurch ergibt sich ein Verlauf, bei dem die Temperatur in Segment 2 nach 85 Minuten die vorgegebene Temperatur von 195 °C erreicht. Infolgedessen werden die Heizregister der Zone 1 heruntergeregelt, wodurch die Luft in Segment 3 erst nach 233 Minuten den Aufheizpunkt erreicht. Für die Heizzone 2 wird das Thermoelement an der Innenwand von Segment 4 angenommen. Durch die geringere Heizleistung des Heizregisters in diesem Segment wird die vorgegebene Lufttemperatur erst nach 186 Minuten erreicht. Da das Heizregister bis zum Erreichen nicht heruntergeregelt wird, wird die Luft im Segment 4 schneller erwärmt als in Segment 3.

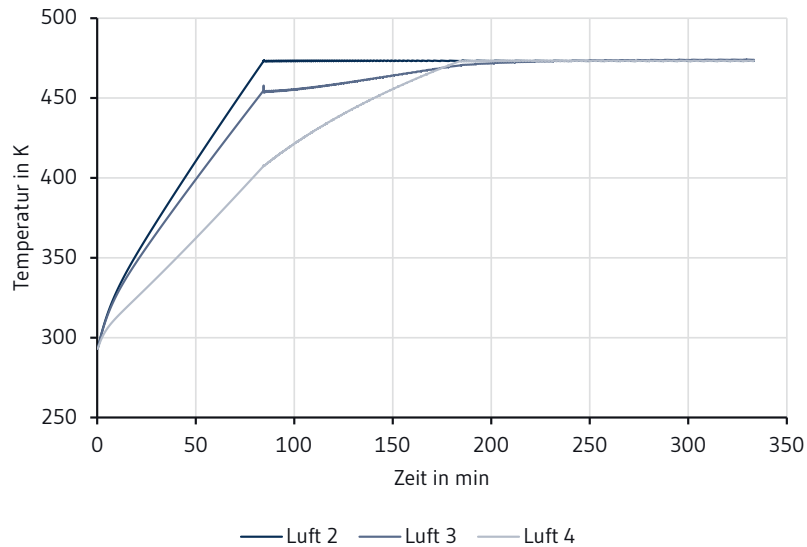


Abb. 7 Temperatur der Luft und der Ofeninnenwand für Segment 3 und Segment 4

Um die Änderung der elektrischen Heizleistung durch die Verwendung der Abgaswärme zu zeigen, ist in *Abbildung 8* der elektrische Energieverbrauch des Segment 3 mit und ohne Abgaswärmetauscher dargestellt. Hierbei ist der Aufheizvorgang des Ofens schon abgeschlossen, und der Ofen ist auf die Betriebstemperatur von 195 °C erwärmt. Es ist zu erkennen, dass die Nutzung der Abgaswärme zu einer Senkung des Energieverbrauchs führt. Nach einer Betriebsdauer im erwärmten Zustand von 120 Stunden liegt der Energieverbrauch des Segments 3 bei rein elektrischer Heizung bei 210 kWh, während bei Nutzung mit Abgaswärme der elektrische Energieverbrauch nur 128 kWh beträgt. Bei Verwendung der Abgaswärme ergibt sich somit eine Einsparung von 39 Prozent der elektrischen Energie für Segments 3 innerhalb von 66 Stunden. Der gesamte elektrische Energieverbrauch des Ofens sinkt durch die Verwendung der Abgaswärme um 37 Prozent.

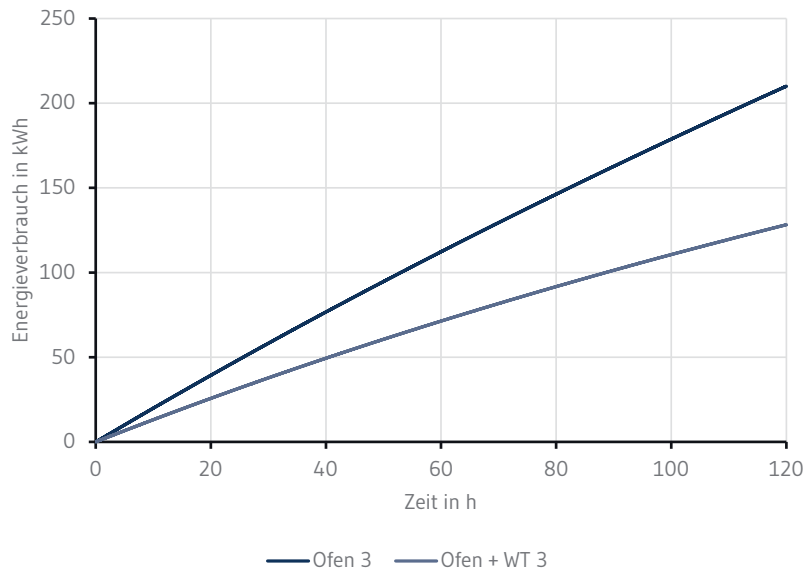


Abb. 8 Vergleich des Energieverbrauchs

Anzumerken ist, dass im Simulationsmodell derzeit noch keine Simulation der sich öffnenden Ofentüren für das Einbringen des Stückguts implementiert ist. Dadurch sinkt die Temperatur im Ofen ab, wodurch die Abgaswärme und die elektrischen Heizregister erneut die Luft innerhalb des Ofens auf den vorgegebenen Wert von 195 °C erwärmen.

2.5 Umsetzung der bivalenten Anlage

Die Umsetzung und Erprobung der bivalent betriebenen Pilotanlage am Hirschvogel-Standort in Marksuhl umfasste die folgenden Schritte:

- Konzepterstellung
- Grob- und Detailplanung
- Aufbau und Inbetriebnahme
- Probetrieb
- Serienbetrieb
- Langzeituntersuchung

Es wurde sich dabei an der VDI-Richtlinie 3985 (VDI 3985:2018) orientiert.

In *Abbildung 9* ist der Aufbau der Doppel-BHKW bei Hirschvogel in Marksuhl dargestellt. Die BHKW wurden in Container-Ausführung realisiert. Der Transport der Heißluft aus den Abgaswärmetauschern in den Wärmebehandlungsofen erfolgt über zwei 80 m lange Rohrsysteme (*Abbildung 10*). Ein Rohrsystem dient als Vorlauf und ein weiteres als Rücklauf (*Abbildung 3*). Die Heißluftrohre führen oben aus den BHKW heraus und werden über eine Rohrbrücke in das rechts abgebildete Werkhallendach eingeführt.



Abb. 9 Aufstellung des Doppel-BHKW (l.) und Aufbau BHKW-Container (r.)



Abb. 10 Doppel-BHKW in Containeraufstellung mit Heißluftverrohrung

Von dort werden die Heißluftrohre zum Wärmebehandlungssofen in die Werkhalle geleitet. Auf dieser Strecke befinden sich die Stellklappen und der Ventilator an den Heißluftrohren sowie die zwei Einleitungspunkte in den Ofen (Abbildung 11).

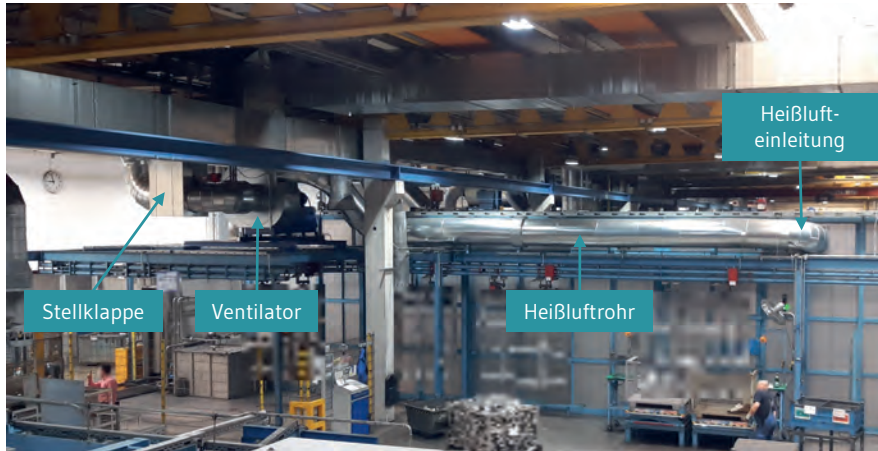


Abb. 11 Bivalenter Wärmebehandlungssofen

2.6 Fazit der technischen Umsetzung

Die Leistungsaufnahme des Wärmebehandlungssofens im vollständig elektrischen Betrieb ist charakterisiert durch eine Leistungsspitze in der Aufheizphase. Wenn der Ofen ausgekühlt ist, erreicht die Leistungsspitze einen Wert von 645 kW (Abbildung 12). Im durchlaufenden Produktivbetrieb während einer Arbeitswoche ergibt sich eine mittlere Leistungsaufnahme von 237 kW. Die ersichtlichen Schwankungen resultieren aus der unterschiedlichen Bauteilgröße und -anzahl sowie der Taktung des Ofens. Weiterhin führen kurzzeitige Produktionsunterbrechungen zu einem Absinken der Leistung.

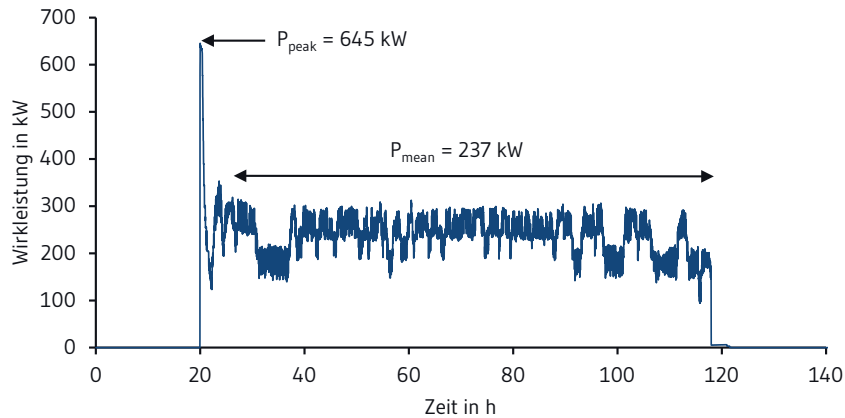


Abb. 12 Elektrischer Leistungsverlauf des Ofens (Normalbetrieb, Arbeitswoche)

Durch den bivalenten Betrieb des Ofens kann eine deutliche Senkung der elektrischen Leistungsaufnahme erzielt werden (*Abbildung 13*). Die Leistungsspitze während des Aufheizens lässt sich um 56 Prozent senken (356 kW). Im Durchlaufbetrieb wird eine Reduzierung der mittleren elektrischen Leistung von 55 Prozent erreicht (128 kW). Zusätzlich speisen die BHKW während des bivalenten Betriebs elektrische Energie aus dem Generator in das Netz des Standorts ein. Beides führt dazu, dass die Leistungsaufnahme des Standorts sowohl im Grund- als auch im Spitzenlastanteil sinkt. Es können dadurch Stromkosten und Netzentgelte eingespart werden.

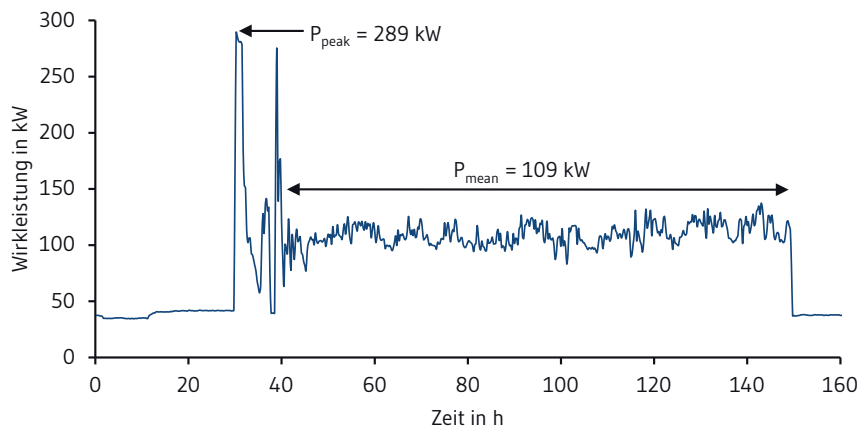


Abb. 13 Elektrischer Leistungsverlauf des Ofens (bivalenter Betrieb, Arbeitswoche)

Die entwickelte bivalente Beheizungsstrategie des Ofens lässt sich auf ähnliche Wärmehandlungsöfen übertragen. Weiterhin stellt die Ankopplung der Betriebsführung an das Lastmanagementsystem des Produktionsstandorts einen nächsten Schritt dar.

3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Beier-Möbius · Strehle · Ihlenfeldt · Gschwill

Die Wirtschaftlichkeit einer bivalenten Wärmebehandlungsanlage ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu gehören:

- Investitions- und Betriebskosten des BHKW sowie Umrüstung des Ofens
- Strom- und Brennstoffkosten
- Produktionsauslastung des Ofens
- Bedarf an Wärme- und Kälteenergie von Gebäude und Prozess
- Möglichkeiten der Wärmespeicherung
- Betriebsführung von Ofen und BHKW

Durch die Abhängigkeiten der thermischen und elektrischen Systeme und deren Komponenten ist eine Betrachtung des Gesamtsystems notwendig.

Im Anwendungsfall der Hirschvogel Group konnte eine Senkung der jährlichen elektrischen Energiekosten des bivalenten AuslagerungsOfens um 55 Prozent erreicht werden. Mit dem Betrieb des BHKW wird ein elektrischer Eigenversorgungsgrad des Standorts von 20 Prozent erreicht. Das BHKW kann bei maximaler elektrischer Leistung die Grundlast von ca. 500 kW decken. Für den Bau des BHKW mit Abgaswärmetauscher und Verrohrung entstehen Investitionskosten von ca. 700 bis 850 Euro pro Kilowattstunde. Je nach Auslegung des Gesamtsystems können Amortisationszeiten zwischen drei und fünf Jahren erzielt werden. Dies gilt unter der Annahme, dass der AuslagerungsOfen durch die Heißluft einspeisung mit BHKW nachgerüstet wird.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat zudem die Betriebsführung der Gesamtanlage. Bei einem durchlaufenden Betrieb ergibt sich eine hohe Anzahl von Vollastbetriebsstunden; dies führt zu einer hohen eigenen elektrischen und thermischen Energiebereitstellung. Im energieflexiblen Betrieb nehmen die Vollastbetriebsstunden ab.

Um einen energieflexiblen Betrieb des Ofens mit BHKW realisieren zu können, ist eine zusätzliche Entkopplung des Warmwasserkreises des BHKW durch einen Warmwasserspeicher notwendig. Des Weiteren kann die Kopplung von Gebäude- und Prozesskältekreislauf durch eine Absorptionskältemaschine eine zusätzliche Steigerung des Nutzungsgrades schaffen.

Eine dynamische Anpassung der Auslastung des BHKW ist im Anwendungsfall im Bereich von 50 bis 100 Prozent der elektrischen Nennleistung möglich. Im energieflexiblen bivalenten Betrieb können die saisonalen und tageszeitabhängigen Schwankungen des Strompreises im Day-Ahead-Markt oder im kontinuierlichen Intraday-Handel ausgenutzt werden (Kern und Roon, 2020). In den Wintermonaten ist der bivalente Betrieb des Auslagerungs-ofens durch die tendenziell höheren Strompreise anzustreben. Des Weiteren kann der zusätzlich angekoppelte Warmwasserkreislauf für die Deckung des Wärmebedarfs der Produktionshallen gespeist werden. Im Sommer ist der elektrische Betrieb des Auslagerungs-ofens aufgrund der tendenziell niedrigen Strompreise zu bevorzugen.

Die Schwankung des Strompreises im Tagesverlauf lässt sich durch die Anpassung der elektrischen Leistung des BHKW berücksichtigen. Dabei ist die Nutzung eines thermischen Pufferspeichers für den bedarfsgerechte Warmwasserbereitstellung und die zeitliche Entkopplung notwendig.

4 Literatur

ADE, H., 2017. Massivumformung in Deutschland – Eine energieintensive energieeffiziente Branche [online]. ISBN 978-3-928726-36-8 [Zugriff am: 5. Oktober 2021]. Verfügbar unter: http://www.massivumformung.de/fileadmin/user_upload/6_Presse_und_Medien/Veroeffentlichungen/Extra-Info/massiverFOKUS-12-2017-D_Web.pdf

DOEGE, E. und B.-A. BEHRENS, 2010. Handbuch Umformtechnik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-04248-5.

KERN, T. und S. VON ROON, 2020. Die deutschen Strompreise an der Börse EPEX Spot in 2019 [online]. Analyse des Preisniveaus und der Preisschwankungen (Preisspreads). 17. Januar 2020 [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/die-deutschen-strompreise-an-der-boerse-epex-spot-in-2019-analyse-des-preisniveaus-und-der-preisschwankungen-preisspreads/>

VDI 3985:2018, Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.





C.11

Hybride Beheizung in der Stahlindustrie

Management Summary

Die Ausrüstung einer Feuerverzinkungsanlage mittels hybrider Strahlrohre steht im Mittelpunkt dieses Kapitels. Diese neuartigen Strahlrohre können auf hybride Weise Wärme über Brenngas und Strom bereitstellen.

Die mittlere Leistung eines Strahlrohrs liegt bei 50 kW. In einer Anlage sind ca. zehn bis zwölf baugleiche Strahlrohre verbaut. Für die Umrüstung auf hybride Strahlrohre ist somit von einer Flexibilitätsperspektive von bis zu 600 kW pro Anlage auszugehen. Dabei muss ein hybrides Strahlrohr die erforderliche Wärmeleistung in jedem Beheizungsmodus des Ofens (bis zu 950 °C) zuverlässig zur Verfügung stellen. Um dies sicherzustellen, wurde beim Aufbau das bewährte Konzept für gasbeheizte Strahlrohre genutzt und um eine zusätzliche elektrische Beheizung ergänzt.

Mit dieser hybriden Lösung können Unternehmen flexibel auf volatile Energiepreise reagieren und durch die verbesserte Netzstabilität mit flexibilisiertem Energiebezug zu einer Erhöhung der Resilienz der Energieinfrastruktur beitragen.

Autoren

Mann, Markus
markus.mann@kanthal.com
Kanthal GmbH
Aschaffburger Straße 7a, 64546 Mörfelden-Walldorf

Miethe, Ralph
ralph.miethe@kanthal.com
Kanthal GmbH
Aschaffburger Str. 7a, 64546 Mörfelden-Walldorf

Peters, Michael
michael.peters2@thyssenkrupp.com
thyssenkrupp Steel AG
Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47166 Duisburg

Queck, Andreas
andreas.queck@bfi.de
VDEh-Betriebsforschungsinstitut
Sohnstraße 69, 40237 Düsseldorf

Schimmang-Esche, Annegret
annegret.schimmang-esche@iwu.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und
Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88, 91126 Chemnitz

Schneider, Julia
j.schneider@flox.com
WS Wärmeprozess-technik GmbH
Dornierstraße 14, 71272 Renningen

Stranzinger, Bernhart
bernhart.stranzinger@bfi.de
VDEh-Betriebsforschungsinstitut
Sohnstraße 69, 40237 Düsseldorf

Westerfeld, Andreas
andreas.westerfeld@thyssenkrupp.com
thyssenkrupp Steel AG
Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47166 Duisburg

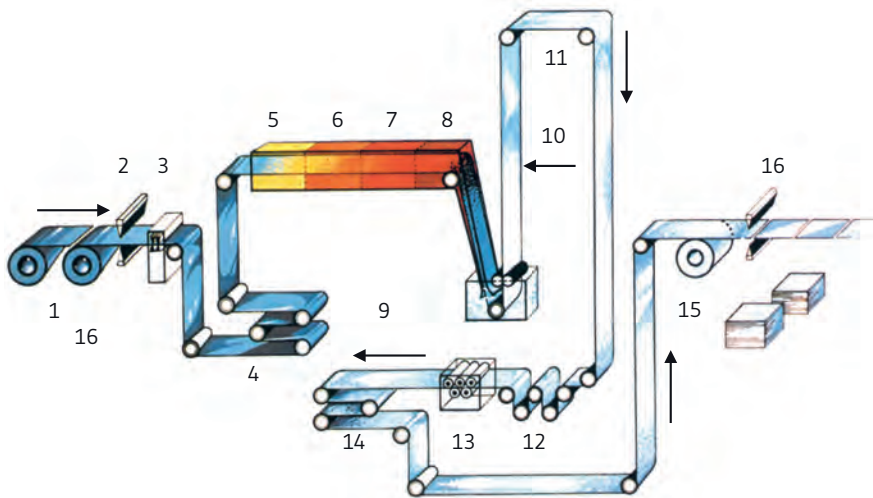
Wünning, Joachim G.
fe@flox.com
WS Wärmeprozess-technik GmbH
Dornierstraße 14, 71272 Renningen

1 Grundlagen und Potenziale einer hybriden Beheizung in der Stahlindustrie

Autoren: Queck · Stranzinger · Mann · Miethe · Schneider · Wüning · Peters · Westerfeld

1.1 Energieflexible Beheizung in der Stahlindustrie

In der Stahlindustrie wird eine Vielzahl von oftmals gasbeheizten Thermoprozessanlagen betrieben. Einen Teil davon stellen Anlagen zur Wärmebehandlung von Stahlband dar, z.B. die in *Abbildung 1* dargestellte Feuerverzinkungsanlage. Stahlband ist Teil der Produktkategorie Flachstahl, wovon allein in Deutschland im Jahr 2018 nach Angabe des Branchenverbandes 23,9 Mio. Tonnen hergestellt wurden (WV, 2021).



- | | |
|---|---|
| 1 Bandabwicklung | 11 Kühlstrecke |
| 2 Bandendenvorbereitung | 12 Richten und Strecken |
| 3 Verschweißen der Bandenden | 13 Chromatierung (Schutz gegen Weißfleckigkeit) |
| 4 Bandausgleichswagen (Bandspeicher) | 14 Bandausgleichswagen (Bandspeicher) |
| 5-8 Ofen: Vorwärmzone, Reduktionszone, Ausgleichszone | 15 Aufwickler |
| 9 Zinkband | 16 Quertailanlage |
| 10 Beeinflussung der Oberfläche (kleine Zinkblume für Lackierung) | |

Abb. 1 Schema einer Feuerverzinkungsanlage

Das Stahlband wird im Ofen der Feuerverzinkungsanlage mit gasbefeuerten Strahlrohren auf Temperaturwerte bis 1.000 °C erwärmt. Der Wärmeeintrag zum Stahlband erfolgt indirekt durch Wärmestrahlung, auch bei einer elektrischen Widerstandsbeheizung. Ein Wechsel des Energieträgers beeinflusst daher nicht das Produkt. Die Untersuchung der Kombination von elektrischer und gasbefuehrter Beheizung in einem hybriden Strahlrohr ist daher naheliegend.

Eine hybride Lösung weist eine Reihe von ökonomischen und ökologischen Vorteilen auf. Aus Sicht des Betreibers ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage auch von den Kosten für die eingesetzte Energie abhängig. Die durchschnittlichen Industriebezugskosten für Erdgas waren im Jahr 2020 noch erheblich günstiger als bei Elektroenergie (BMWi, 2020). Mit einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien bzw. dem sporadischen Überangebot, sowie durch geopolitische Veränderungen ist mit einer Veränderung des Preisverhältnisses zu rechnen. Damit wird die Nutzung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen in der Prozessindustrie weiter zunehmen. Andererseits steigt aufgrund der Einspeisung von Biogas bzw. von aus regenerativen Quellen erzeugtem Wasserstoff in das Erdgasnetz der Anteil von »grünem« Brenngas. Eine weitere Nutzung der Brenngasbefuehrung wird somit auch ökologisch vorteilhaft.

1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahme der Wärmebereitstellung eines hybriden Strahlrohrs

Zur Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahme der Wärmebereitstellung mit einem hybriden Strahlrohr wird das Vorgehen nach VDI 5207 Blatt 1 (VDI, 2020) genutzt. Auf Fertigungsleitebene ist ein angepasster Energiebezug zu verzeichnen. Es wird hierbei markt- und flexibilitätsdienlich jeweils der passende Energieträger bezogen. In der Fertigungsebene ergibt sich dadurch ein energie-bivalenter Betrieb von Anlagenkomponenten. Im betrachteten Anwendungsfall ist das der Wechsel zwischen thermischer und elektrischer Energie.

Die diskutierten Energieflexibilitäten zur Wärmebereitstellung mit einem hybriden Strahlrohr sind in *Tabelle 1* dargestellt.

Tab. 1 Energieflexibilitätsmaßnahmen und deren Umsetzungspartner

Energieflexibilitätsmaßnahme	Umsetzungspartner	Branche
Fertigungsleitebene		
Angepasster Energiebezug	thyssenkrupp Steel Europe AG	Stahlindustrie
Fertigungsebene		
Energiebivalenter Betrieb (thermisch/elektrisch)	thyssenkrupp Steel Europe AG	Stahlindustrie

1.3 Projektpartner

1.3.1 Kanthal GmbH

Kanthal ist eine weltweit agierende Marke für Produkte und Dienstleistungen im Bereich industrieller Heiztechnik und Widerstandsmaterialien. Für eine Vielzahl von Industriebranchen bietet und entwickelt Kanthal Lösungen für die elektrische Beheizung und somit einer Minimierung der CO₂-Emissionen. Im Projekt ist Kanthal für alle elektrotechnischen Belange am hybriden Strahlrohr zuständig.

1.3.2 thyssenkrupp Steel Europe AG

thyssenkrupp Steel Europe AG ist ein international agierender Konzern mit einem breiten Angebot an unterschiedlichen Produkten aus Stahl. Im Geschäftsjahr 2019/2020 erwirtschaftete das Unternehmen einen Umsatz von über 7,2 Mrd. Euro. thyssenkrupp Steel Europe ist intensiv an der Umsetzung einer klimaneutralen Stahlproduktion beteiligt. Auch die Nutzung von erneuerbaren Energien in einem hybriden Strahlrohr ist in diesem Zusammenhang zu sehen. Die industrielle Erprobung an einer Produktionsanlage bei thyssenkrupp Steel Europe wird wesentlich zur Marktreife des neuartigen Strahlrohrs beitragen. Weiterhin wird aufgrund der Vielzahl vorhandener Anlagen allein bei thyssenkrupp Steel Europe von einem großen Multiplikatoreffekt ausgegangen.

1.3.3 WS Wärmeprozessstechnik GmbH

Die WS Wärmeprozessstechnik GmbH (WS) ist ein mittelständisches Unternehmen und hat sich spezialisiert auf energiesparende und schadstoffarme Brennersysteme für Industrieöfen. Im Zuge der Energiewende, besonders der Nutzung von H₂ zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes in Deutschland, kommt einer flexiblen Brennertechnologie eine besondere Bedeutung zu. WS steuert Expertise für die Brenngasbeheizung des hybriden Strahlrohrs bei.

1.3.4 VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Das VDEh-Betriebsforschungsinstitut ist eines der europaweit führenden Institute für anwendungsnahe Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Stahltechnologie. Zur Verbesserung von Prozessen, Anlagen und Abläufen der Stahlproduktion arbeitet das VDEh-Betriebsforschungsinstitut praxisbezogen und vertrauensvoll mit seinen Kunden zusammen. Im Vordergrund steht die prozessstufenübergreifende Optimierung zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Das VDEh-Betriebsforschungsinstitut unterstützt die Partner wissenschaftlich und koordiniert die Arbeiten zum hybriden Strahlrohr.

1.4 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials

In Deutschlands Stahlindustrie sind fünfzehn Bandbehandlungsanlagen in Betrieb (Stahlinstitut VDEh, 2018). Diese Anlagen unterscheiden sich vom Bautyp: Es existieren jeweils ca. 50 Prozent Horizontal- und Vertikalanlagen. Für den im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Einsatzfall eines hybriden Mantelstrahlrohrs sind insbesondere die Horizontalanlagen geeignet, da diese Strahlrohre dort häufig zum Einsatz kommen. Zur Ermittlung der Flexibilitätsperspektive wird von einer mittleren Anzahl von ca. zehn bis zwölf Strahlrohren je Bandbehandlungsanlage ausgegangen. Ein Strahlrohr weist eine mittlere Leistung von ca. 50 kW auf. Bei einer kompletten Umrüstung auf das hybride Strahlrohr beträgt die Flexibilitätsperspektive allein bei allen Horizontalanlagen des Partners thyssenkrupp Steel Europe AG bereits zwischen 2,5 bis 3 MW. Die anderen Hersteller haben bei vergleichbaren Anlagen geschätzt weitere 1,5 bis 1,8 MW Flexibilitätsperspektive. Durch die konsequente Nutzung hybrider Mantelstrahlrohre wären in der deutschen Stahlindustrie Flexibilitätsperspektiven von 4,0 bis 4,8 MW möglich (Tabelle 2).

Tab. 2 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Technologie

Energieflexibilitätsmaßnahme	Flexibilitätsperspektive Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Angepasster Energiebezug und energiebivalenter Betrieb (Wechsel zw. Brenngasnutzung und elektrischer Energie)	4 bis 4,8 MW Abrufdauer: beliebig Abrufhäufigkeit: beliebig

2 Technische Umsetzung der hybriden Beheizung

Autoren: Queck · Stranzinger · Mann · Miethe · Schneider · Wünnig · Peters · Westerfeld

2.1 Anforderungen

In einem Produktionsbetrieb muss ein hybrides Strahlrohr die erforderliche Wärmeleistung in jedem Beheizungsmodus zuverlässig zur Verfügung stellen. Für den ausgewählten Anwendungsfall in einem Bandofen einer Feuerbeschichtungsanlage lag die bisher eingesetzte Brennerleistung eines einzelnen Strahlrohrs bei ca. 50 kW, die Ofenraumtemperatur je nach Anwendungsfall bei rund 950 °C.

In der betrachteten Ofenzone herrscht eine wasserstoffhaltige Stickstoffatmosphäre (Schutzgasatmosphäre) mit ca. fünf bis sechs Vol.-% Wasserstoff, welche besondere Anforderungen an die eingesetzten Materialien stellt. Eine weitere Anforderung an das hybride Strahlrohr war es, den Installationsaufwand für den Ofenbetreiber an der Anlage so gering wie möglich zu halten. Daher war ein weiteres Kriterium die Einfachheit des Austauschs der verschiedenen Rohrtypen. Die Außengeometrie für das Rohr war somit fest vorgegeben. Zusätzlich mussten neben den bisher bereits vorhandenen Brenngas- und Brennluftleitungen auch elektrische Zuleitungen zur Inbetriebnahme der elektrischen Beheizung angebracht werden.

2.2 Konzeptentwicklung

Die industrielle Erprobung des hybriden Strahlrohrs an einer Produktionsanlage bei tkSE wird wesentlich zur Marktreife des neuartigen Strahlrohrs beitragen. Weiterhin wird aufgrund der Vielzahl vorhandener Anlagen allein bei tkSE von einem großen Multiplikatoreffekt ausgegangen.

Aus den betrieblichen und werkstofftechnischen Anforderungen wurde ein Konzept zur Umsetzung des hybriden Strahlrohrs erarbeitet (Abbildung 2).

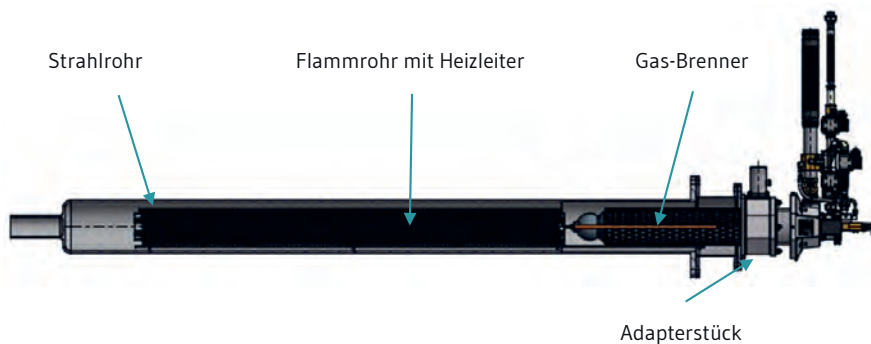


Abb. 2 Schema des hybriden Strahlrohrs

Der Aufbau orientiert sich an einem bewährten Konzept für gasbeheizte Strahlrohre, das um eine zusätzliche elektrische Beheizung erweitert wurde. Zur elektrischen Beheizung wird ein Heizdraht genutzt, der innerhalb des Strahlrohrs spiralförmig aufgewickelt ist. Er wird außen auf dem Flammrohr angebracht und zur Positionierung von keramischen Kämmen gehalten. Diese werden formschlüssig auf dem ebenfalls keramischen Flammrohr aufgebracht.

2.3 Konstruktion des Prototyps

Zur Konstruktion müssen sowohl die elektrische als auch die gasbeheizte Variante in einem Strahlrohr miteinander vereint werden. Durch die geänderte Innengeometrie wurden leichte Anpassungen der Gasbeheizung notwendig. Die Kombination mit der elektrischen Beheizung erfordert zusätzlich das Anbringen von Stromanschlüssen. Hierzu wurde ein Adapterstück im Demonstrator untergebracht. Die konsequente Beachtung vorhandener Standards machte die Kombination beider Beheizungssysteme mit geringem Aufwand möglich.

Das ausgearbeitete Konzept bildet die Basis für den mehrschrittigen Aufbau eines Demonstrators. Der erste Schritt war die Konstruktion und Auslegung eines angepassten Flammrohrs, um die elektrische Beheizung integrieren zu können. Auf das Flammrohr wurde mit entsprechenden keramischen Abstandshaltern der elektrische Heizdraht spiralförmig aufgewickelt (Abbildung 3).

Anschließend wurden das Flammrohr mit dem Heizdraht in das Strahlrohr eingebracht und der Brenner eingebaut. Als letzter Schritt erfolgte der Anschluss der Versorgungsleitungen (elektrisch sowie Brenngas und Brennluft).

Für den Ofenbetreiber sind im Inneren des Ofens keine Umbauten oder Anpassungen erforderlich. Lediglich außerhalb des Ofens sind die elektrischen Anschlussleitungen anzubringen.

2.4 Test der elektrischen Beheizung

Für den Funktionstest der elektrischen Beheizung wurde im Labor ein entsprechender Prüfaufbau umgesetzt. *Abbildung 3* zeigt den Laboraufbau der elektrischen Beheizung ohne Strahlrohr.



Abb. 3 Elektrischer Funktionstest im Labor

Das aus Siliciumcarbid-Keramik (SiSiC) gefertigte Flammrohr enthält auf der Außenseite Führungen für die keramischen Abstandshalter. In diesen Abstandshaltern ist der elektrische Heizdraht spiralförmig um das Flammrohr geführt. Dadurch wird ein Kontakt zwischen (elektrisch leitfähigem) Flammrohr und Heizdraht verhindert. Um Anpassungen der Länge des hybriden Strahlrohrs zu erlauben, wurde das Flammrohr in einzelne Segmente unterteilt. Außerdem wurde ein Thermoelement zur Überwachung und Regelung der Heizdrahttemperatur entlang des keramischen Flammrohrs verlegt.

Die elektrischen Funktionstests verliefen erfolgreich: Es konnte eine Leistung von rund 46 kW erfolgreich eingebracht werden. Bei der Erprobung traten keine lokalen Überhitzungen oder Störungen auf.

2.5 Komplettmontage

Die elektrische Beheizung mit den Flammrohren wurde mit weiteren Komponenten wie einer Montagehilfe, einem Adapter und dem Abgasführungsrohr in das metallische Strahlrohr eingebaut. Das teilweise montierte hybride Strahlrohr ist in *Abbildung 4* dargestellt.

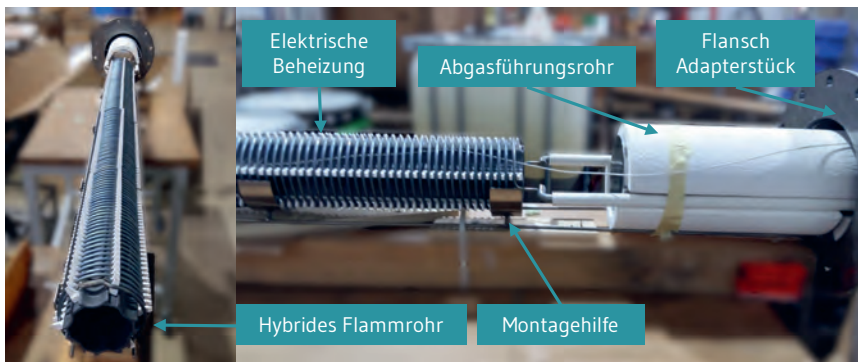


Abb. 4 Teilmontiertes hybrides Strahlrohr

Mit dem Einbau des Gasbrenners und dem Einbringen des gesamten Aufbaus in das Mantelstrahlrohr ist die Montage abgeschlossen. *Abbildung 5* zeigt den kompletten Aufbau des Demonstrators.

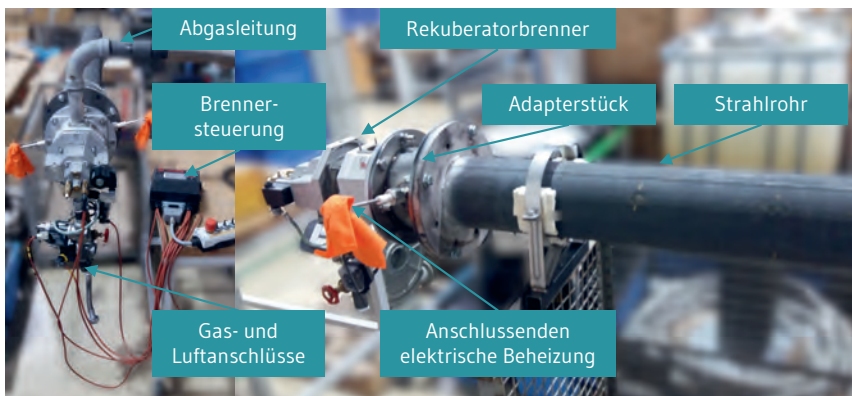


Abb. 5 Hybrides Strahlrohr mit Rekuperatorbrenner und Steuerung am Prüfstand

2.6 Test der Gasbeheizung

Die Überprüfung der Funktion der Gasbeheizung fand im Prüfstand statt. Das hybride Strahlrohr wurde hierzu mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet (Abgasanalyse sowie mehrere Temperaturmessstellen auf der Rohraußenseite). Die Gasbeheizung wurde mit drei unterschiedlichen Leistungsstufen des Brenners (30, 40 und 49 kW) erfolgreich getestet. *Abbildung 6* zeigt die Temperaturmessstellen am hybriden Strahlrohr.

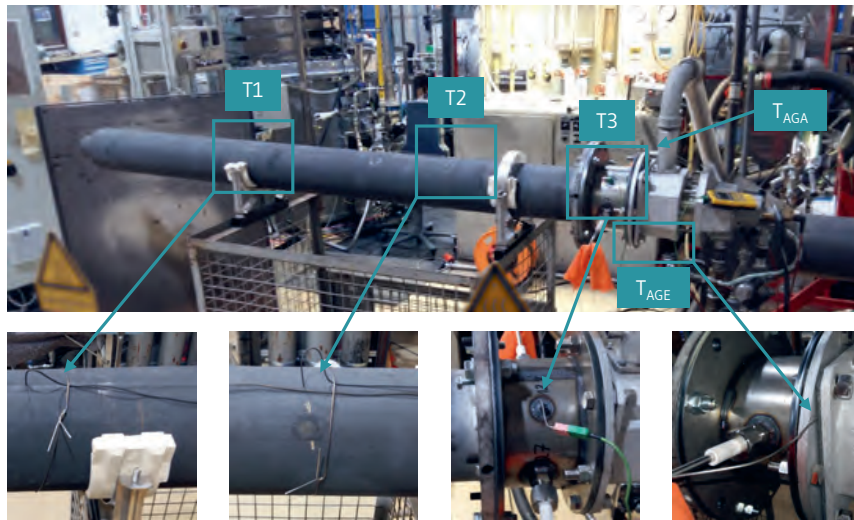


Abb. 6 Hybrides Strahlrohr mit Temperaturmesstechnik

Zur Ermittlung der Temperaturwerte wurden Thermoelemente des Typs K eingesetzt. Folgende Temperaturmessstellen wurden für die Untersuchungen festgelegt:

- T_1 : Rohrtemperatur stirnseitig
- T_2 : Rohrtemperatur brennerseitig
- T_3 : Hybridflamrohr im Strahlrohrinneren
- T_{AGE} : Abgaseintrittstemperatur (vor Rekuperator)
- T_{AGA} : Abgasaustrittstemperatur (nach Rekuperator)

Der im Abgasvolumenstrom gemessene O_2 -Gehalt lag jeweils unter 3 Vol.-%. Der erzielte feuerungstechnische Wirkungsgrad lag zwischen 83 und 85 Prozent. Die gemessenen Temperaturwerte der Prüfstanduntersuchungen sind in *Tabelle 3* aufgeführt.

Tab. 3 Messergebnisse

Leistung in kW	30	40	49
T_{AGA} in °C	335	387	419
T_{AGE} in °C	570	623	668
T_1 in °C	363	406	446
T_2 in °C	303	334	356
T_3 in °C	624	693	750

2.7 Betriebsnahe Untersuchungen

In der halbertechnischen Versuchsanlage des BFI wurde das hybride Strahlrohr mit beiden Wärmequellen untersucht. *Abbildung 7* zeigt das in der Brennkammer eingebaute hybride Strahlrohr und die Steuerungstechnik für die elektrische Beheizung und die Gasbeheizung.

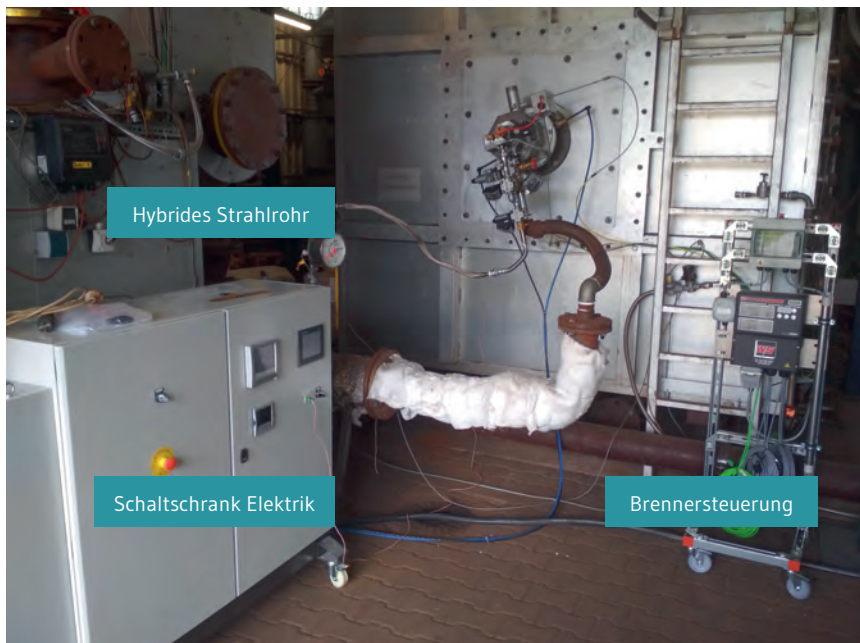


Abb. 7 Hybrides Strahlrohr in der BFI-Versuchsanlage

Das Strahlrohr wurde im Inneren der Brennkammer abgestützt, um eine sichere Auflage zu schaffen sowie ein Durchbiegen zu vermeiden. Zur Bewertung der Temperaturgleichmäßigkeit beider Wärmequellen wurden auf der Außenwand des Strahlrohrs fünf Thermoelemente an unterschiedlichen Positionen befestigt (Abbildung 8).

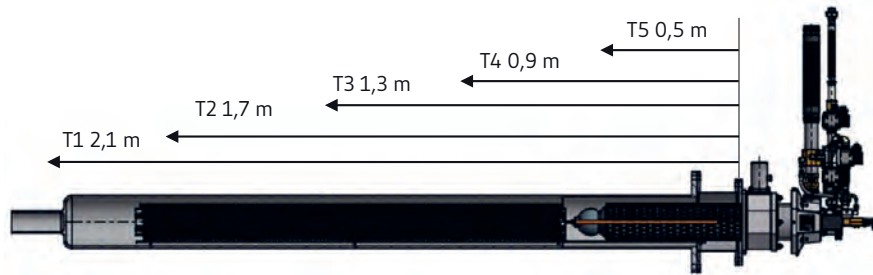


Abb. 8 Positionierung der Thermoelemente

Beide Wärmequellen wurden abwechselnd eingeschaltet. Sowohl während des Gasbetriebs als auch während des elektrischen Betriebs wurde ein stationärer Zustand erreicht. Das heißt, dass die abgegebene Wärmeleistung konstant geregelt wurde und die gemessenen Strahlrohrtemperaturwerte im gleichen Bereich blieben. In *Abbildung 9* ist der gemessene Temperaturverlauf für die jeweiligen Beheizungsarten aufgezeichnet.

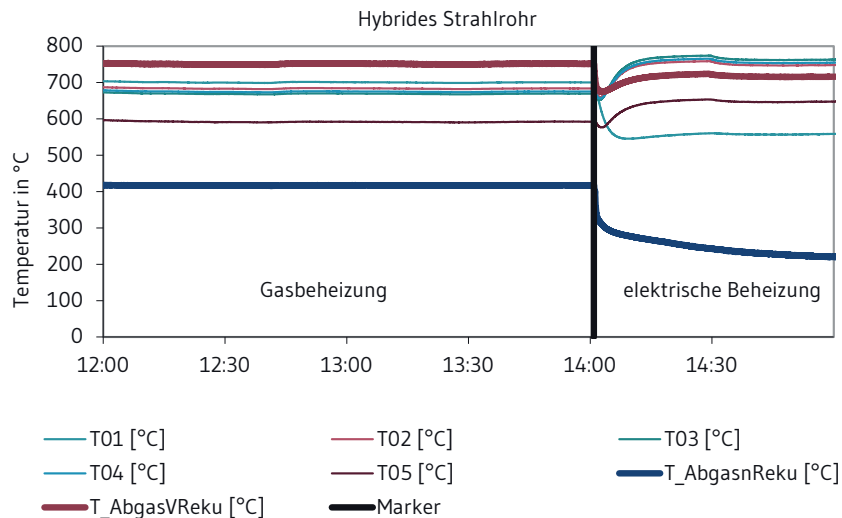


Abb. 9 Gemessener Temperaturverlauf bei der betriebsnahen Erprobung

Die erzielte Temperaturgleichmäßigkeit auf der Strahlrohroberfläche ist bei beiden Beheizungsarten sehr gut. Bei der Gasbeheizung lag Messstelle T05 außerhalb des direkt beheizten Bereichs; bei der elektrischen Beheizung war dies bei T01 und T05 der Fall.

Die betriebsnahe Erprobung wurde erfolgreich abgeschlossen. Kleinere Optimierungspotenziale zur Verbesserung des Prototyps und der Montage werden gegenwärtig umgesetzt. Für die industrielle Erprobung im Produktionsbetrieb sind die technischen Voraussetzungen damit gegeben.

3 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen

Autoren: Queck · Stranzinger · Mann · Miethe · Schneider · Wüning · Peters · Westerfeld

Um das hybride Strahlrohr erfolgreich im industriellen Umfeld einsetzen zu können, sind neben den technischen Parametern auch wirtschaftliche Parameter relevant. Bezugnehmend auf VDI 5207 Blatt 2 (VDI, 2021) ist dies unter anderem die flexible Reaktion auf volatile Energiepreise. Wenn für die Industrie ein wirtschaftlich optimierter Energiebezug möglich ist, ist die Nutzung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energiequellen interessant. Darüber hinaus stellt die hybride Lösung auch eine Flexibilität für den Energiebezug dar, was insbesondere dem Netzbetreiber ermöglicht, die Elektroenergienetze zu stabilisieren. Die Verfügbarkeit einer Power-to-Heat-Lösung wie dem hybriden Strahlrohr ermöglicht es, die Nutzung der erneuerbaren Energien zu maximieren. Ein weiterer Vorteil ist die Erhöhung der Resilienz der Energieinfrastruktur durch die verbesserte Netzstabilität mit flexibilisiertem Energiebezug.

Um eine energieflexible Betriebsweise im Unternehmen zu ermöglichen, sind aufgrund des gewählten Ansatzes (Nutzung des hybriden Strahlrohrs ohne Umbau der Produktionsanlage) seitens des Anlagenbetreibers lediglich Installationsmaßnahmen zur Bereitstellung der elektrischen Anschlüsse erforderlich. Zusätzlich sind je nach vorhandener betrieblicher Infrastruktur noch Anbindungen an Flexibilitätsmaßnahmen des Netzbetreibers notwendig. Die bereitzustellende Informations- und Kommunikationstechnologie muss neben der netzdienlichen Flexibilisierung des Energiebezugs auch den aktuellen Energiebezug des Werks berücksichtigen. Auch auf Unternehmensebene muss der Energiebezug sich zur Vermeidung von preislichen Nachteilen innerhalb bestimmter Grenzen bewegen.

Die Wirtschaftlichkeit der dem hybriden Strahlrohr zugehörigen Energieflexibilitätsmaßnahme »Energiebivalenter Betrieb« kann noch nicht beziffert werden, da gegenwärtig nur ein Demonstrator existiert. Erst bei einer Serienfertigung können die Kosten für die Herstellung eines hybriden Strahlrohrs ermittelt werden.

Die durchschnittlichen Industriebezugskosten für Erdgas sind gegenwärtig erheblich günstiger als bei Elektroenergie (BMWi, 2020). Beispielsweise betrug im Jahre 2019 der Industrie-Preis für Erdgas in Deutschland 2,59 Cent/kWh, bei Elektrizität lagen die durchschnittlichen Kosten bei 15,83 Cent/kWh. Mit einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien bzw. dem sporadischen Überangebot ist mit einer Veränderung des Preisverhältnisses zu rechnen. Damit wird die Nutzung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen in der Prozessindustrie weiter zunehmen. Andererseits steigt

aufgrund der Einspeisung von Biogas bzw. aus regenerativen Quellen erzeugtem Wasserstoff in das Erdgasnetz der Anteil von »grünem« Brenngas. Eine weitere Nutzung der Brenngasbefuerung wird somit auch ökologisch vorteilhaft. Bei den Kosten für den Brenngasbezug sind zusätzliche Kosten für z. B. CO₂-Zertifikate und gegebenenfalls Schadstoffvermeidungskosten (z. B. für Entstickungsanlagen) zu berücksichtigen. Bei den durch elektrischen Betrieb bedingten Kosten können durch Vermarktung der Flexibilität gegebenenfalls Erlöse erzielt werden, die ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Die Investitionskosten des hybriden Stahlrohrs können noch nicht beziffert werden, da gegenwärtig nur ein Demonstrator existiert. Aufgrund der hohen Anzahl von Anlagen allein in der Stahlindustrie, die z. T. ähnliche Strahlrohre nutzen, ist jedoch mit hohen Stückzahlen und dementsprechend verringerten Herstellungskosten zu rechnen. Beispielsweise gibt es neben den 15 Feuerverzinkungsanlagen mit 6,7 Mio. Tonnen Jahreskapazität noch kontinuierliche Glühlinien (2,4 Mio. t/a), elektrolytische Beschichtungsanlagen (2,9 Mio. t/a) und organische Beschichtungsanlagen (1,3 Mio. t/a) (Stahlinstitut VDEh, 2018).

4 Literatur

BUNDESNETZAGENTUR FÜR ELEKTRIZITÄT, GAS, TELEKOMMUNIKATION, POST UND EISENBAHNEN, 2020: Monitoringbericht [online]. *Ausfallarbeit durch Einspeisemanagementmaßnahmen*. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen [Zugriff am 15.10.2021]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2020.pdf

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWi), 2020: *Internationaler Energiepreisvergleich für Industrie, Erdgas und Elektrizität* [online]. Tabellen 29 und 29a der Gesamtausgabe Energiedaten. Berlin: BMWi [Zugriff am 15.10.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/Energiepreise-und-Energiekosten/energiedaten-energiepreise-4-xls.xlsx>

QUECK, A.; STRANZINGER, B.; MANN, M.; MIETHE, R.; SCHNEIDER, J.; WÜNNING, J.; PETERS, M.; WESTERFELD, A., 2021: *Hybride Beheizung in der Stahlindustrie*. In: 3. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium. Aachen, 07. und 08.10.2021. S. 149–154, SCL Verlag GmbH Aachen, ISBN: 978-3-96463-021-6

STAHLINSTITUT VDEH, 2018: *Hot Dip Metal Coating Lines Germany*. In: Datenbank Plantfacts. 01.10.2018.

VDI 5207, Blatt 1: *Energieflexible Fabrik – Grundlagen*. 2020.

VDI 5207, Blatt 2: *Energieflexible Fabrik – Identifikation und technische Bewertung*. 2021.

WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL (WV), 2021: *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2020 | 2021*. Düsseldorf.





C.12

Energieträgerübergreifende hybride
Energiespeicher

Management Summary

Für den Wirtschaftszweig C.29 (Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen) hat sich die Energieflexibilitätsmaßnahme »Energiespeicherung« als besonders potenzialträchtig herausgestellt. Die hohen Investitionskosten für die Integration von monoenergetischen Energiespeichern stehen dem potenziellen Erlös aus der Energieflexibilisierung gegenüber. Aus diesem Grund wurde die Umsetzung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern untersucht. Die Kombination mehrerer Energiespeicher zu einem hybriden Energiespeichersystem unter Nutzung der jeweiligen Vorteile unterschiedlicher Technologien bietet – im Vergleich zu monoenergetischen Energiespeichersystemen – ein hohes technisches und wirtschaftliches Potenzial. Ein großer Vorteil ist die Energieflexibilisierung von kritischen Produktionsprozessen, bei denen organisatorische Energieflexibilitätsmaßnahmen nicht angewendet werden können. Konkret wurden die Anwendungsfälle Peak-Shaving, atypische Netznutzung, Effizienzsteigerung, Eigenverbrauchsoptimierung und die Nutzung dynamischer Strompreise untersucht. Dabei erweist sich die Kombination aus elektrochemischen Lithium-Ionen-Speichern und thermischen Kältespeichern als die wirtschaftlichste Möglichkeit, um Energiekosten zu reduzieren.

Autoren

Emde, Alexander
alexander.emde@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Sauer, Alexander
alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

1 Grundlagen und Potenziale von Energiespeichertechnologien in der Automobilindustrie

Autoren: Emde · Sauer

1.1 Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung und wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher in der Automobilindustrie beschrieben. *Tabelle 1* gibt einen Überblick über vielversprechende Energieflexibilitätsmaßnahmen in dieser Branche.

Tab. 1 Übersicht ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesskältebereitstellung

Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM)	Umsetzungspartner	Branche
Hybride (energieträgerübergreifende) Energiespeicherung	Mercedes-Benz	Automobilindustrie
Thermische Kältespeicherung	Mercedes-Benz	Automobilindustrie
Thermische Wärmespeicherung	Mercedes-Benz	Automobilindustrie
Elektrochemische Energiespeicherung	Mercedes-Benz	Automobilindustrie

1.2 Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung bei Mercedes-Benz

Die Mercedes-Benz AG mit Hauptsitz in Stuttgart zählt zu den weltweit führenden Herstellern von Premium-Pkw über alle Segmente, von Kompaktwagen über Limousinen bis hin zu SUVs. Das Unternehmen hat seit der Erfindung des Automobils durch Carl Benz und Gottlieb Daimler im Jahr 1886 den Anspruch, Pionier in Fahrzeugtechnik, -qualität und -sicherheit für die gesamte Automobilbranche zu sein. Wo die Marktbedingungen es zulassen, will der deutsche Automobilhersteller bereits ab 2030 ausschließlich batterieelektrische Fahrzeuge verkaufen.

Als zentraler Bestandteil der Nachhaltigkeitsstrategie hat die Mercedes-Benz AG klare Ziele zur Verbesserung des Klimaschutzes, der Luftqualität und des Ressourcenverbrauchs gesetzt. So soll beispielsweise im Rahmen der *Ambition 2039* die gesamte Neuwagenflotte der Mercedes-Benz AG bis 2039 CO₂-neutral produziert werden. Außerdem soll der Energieverbrauch pro Fahrzeug von 2013/2014 bis 2030 um 43 Prozent reduziert werden.

Eines der Hauptpotenziale zur Erhöhung der Energieflexibilität eines Automobilwerks besteht in der Nutzung vorhandener oder der Integration neuer Energiespeicher. Diese ermöglichen die Entkopplung von energetischen Erzeugern und Verbrauchern und erlauben damit die Verschiebung von Lastspitzen, ohne den Produktionsprozess negativ zu beeinflussen. Weitere Chancen der Nutzung von Energiespeichern liegen sowohl in der Erhöhung des Wirkungsgrads einzelner Energiewandlungs-

technologien, einer möglichen Teilnahme an Energiemärkten (z. B. Regelenergiemarkt, Spotmarkt), der Bereitstellung von Netzdienstleistungen (beispielsweise über die atypische Netznutzung) und der Erhöhung der Eigenverbrauchsquote von Eigenerzeugungsanlagen.

1.3 Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials

Zur Ermittlung der Energieflexibilitätpotenziale in Deutschland wurden die auf Standortebene quantifizierten Potenziale der Energiespeicherung für den gesamten Wirtschaftszweig abgeschätzt. Als Faktor für die Hochrechnung dient hierbei der Anteil des elektrischen Energiebedarfs des betrachteten Unternehmens am Gesamtenergiebedarf des Wirtschaftszweigs. Um eine valide Hochrechnung zu gewährleisten, wurde eine maßnahmenspezifische Hochrechnung durchgeführt. Die im Folgenden genannten kumulierten Flexibilitätpotenziale ergeben sich aus den in *Tabelle 2* gelisteten maßnahmenspezifischen Potenzialen.

Im deutschen Wirtschaftszweig der Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen wurde für die Kombination von 26 unterschiedlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen insgesamt ein Energieflexibilitätpotenzial von 9,5 TWh/a für die maximale Lastbereitstellung und 415 TWh/a für die maximale Abrufdauer ermittelt, (Sauer et al., 2019). Dabei ist ein Leistungsanteil von 50 Prozent auf die Kategorie der Energiespeicherung zurückzuführen. Diese Zahlen wurden anhand der in *Tabelle 2* identifizierten Flexibilitätpotenziale der Mercedes-Benz AG und deren Anteil an der Automobilproduktion auf den gesamten Wirtschaftszweig hochgerechnet.

Tab. 2 Flexibilitätpotenziale ausgewählter Energieflexibilitätsmaßnahmen

Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM)	Flexibilitätpotenziale für Deutschland inkl. Abrufdauer und Abrufhäufigkeit
Thermische Kältespeicherung	50 MW Abrufdauer: max. 8 h Abrufhäufigkeit: bis zu 250-mal pro Jahr
Thermische Wärmespeicherung	165 MW Abrufdauer: max. 1,25 h Abrufhäufigkeit: bis zu 1.100-mal pro Jahr
Elektrochemische Energiespeicherung	214 MW Abrufdauer: max. 2,5 h Abrufhäufigkeit: bis zu 848-mal pro Jahr

2 Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung in der Automobilindustrie

Autoren: Emde · Sauer

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Einsatz der Flexibilitätsmaßnahme »Energie speichern« in der Automobilindustrie. Der Schwerpunkt liegt auf dem Einsatz energieträgerübergreifender hybrider Energiespeicher. Nach einer kurzen Definition wird ein methodisches Vorgehen für die technische Umsetzung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern als Energieflexibilitätsmaßnahme vorgestellt. Abschließend wird anhand eines Fallbeispiels eine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt.

Das Interesse von Industrieunternehmen an Energiespeichertechnologien steigt zunehmend. Unternehmen möchten sich damit sowohl vom öffentlichen Energienetz unabhängiger machen als auch schwankende Energiepreise ausgleichen. Die hohen Investitionskosten sind neben der Auslegung, der Betriebsführung und der Umsetzung die größten Herausforderungen von Energiespeichertechnologien und stehen dem möglichen Erlös gegenüber (Zimmermann et al., 2019; Emde et al., 2020; Emde et al., 2021).

Eine Lösung für diese Herausforderungen können hybride Energiespeicher (HES) sein (Zimmermann et al., 2019; Bocklisch, 2015; Emde et al., 2020). Sie bieten eine Reduktion der Investitionskosten, erhöhen die Systemeffizienz und haben eine höhere Lebenserwartung im Vergleich zu monoenergetischen Speicherlösungen (Bocklisch, 2015; Chong et al., 2016; Emde et al., 2020; Emde et al., 2021). Ein Energiespeicher ist eine technische Anlage zur Speicherung von Energie in Form von innerer, potenzieller oder kinetischer Energie. Die Anforderung an Energiespeicher umfasst in einem Zyklus die drei Prozesse Einspeichern (Laden), Speichern (Halten) und Ausspeichern (Entladen) (Sterner und Stadler, 2019; Kaltschmitt et al., 2014).

Energiespeicher bieten je nach eingesetzter Technologie verschiedene Vor- und Nachteile. Durch die Kombination unterschiedlicher Energiespeicher können die jeweiligen Vorteile genutzt werden, um gleichzeitig die Nachteile zu verringern. Die Kombination von unterschiedlichen Energiespeichertechnologien wird als hybride Energiespeicherung bezeichnet (Bocklisch, 2015; Zimmermann et al., 2019). In diesem Kapitel wird unter einem energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher eine Kombination aus mindestens zwei Energiespeichern verstanden (Sterner und Stadler, 2019; Bocklisch, 2015; Zimmermann et al., 2019; Emde et al., 2020).

Zur Erweiterung des Betrachtungsraums wird nicht nur der rein elektrische Energieverbrauch analysiert, sondern alle relevanten Energieverbräuche eines Industrieunternehmens, die indirekt über einen Energiewandlungsschritt mit dem elektrischen öffentlichen Netz verbunden sind. Relevante Energieverbräuche sind in diesem Zusammenhang thermischer (Kälte und Wärme), mechanischer (Druckluft), chemischer und elektrischer Energieverbrauch. Das Konzept in *Abbildung 1* bezieht sich auf eine Kombination aus verschiedenen Energiespeichertechnologien, den zugehörigen Energiewandlungstechnologien und spezifischen Energieverbräuchen.

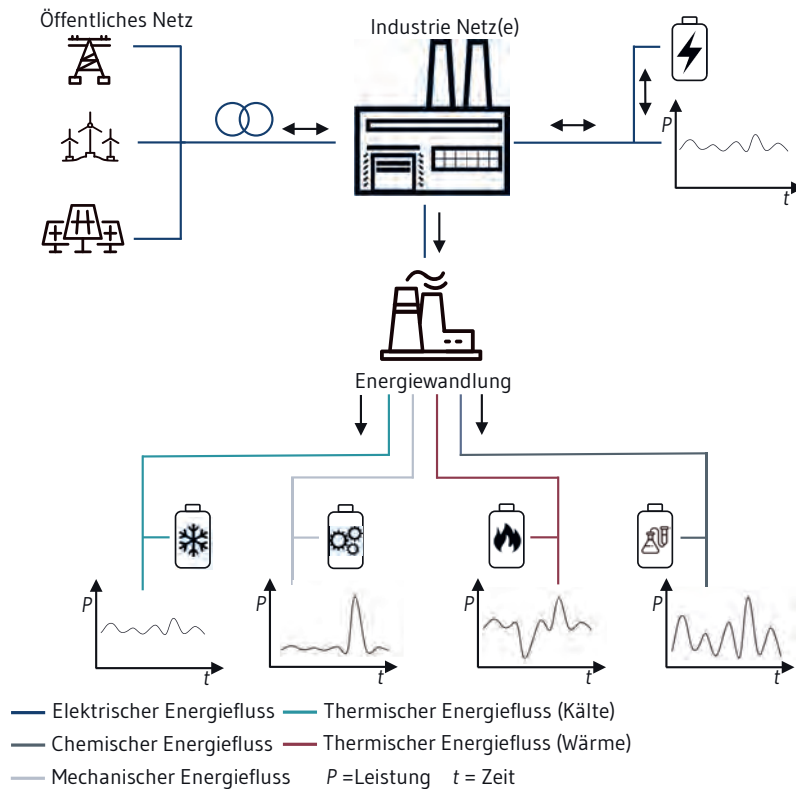


Abb. 1 Hybrides Energiespeicherkonzept (Emde et al., 2020)

3 Technische Umsetzung der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher

Für die technische Umsetzung der Flexibilitätsmaßnahmen wurden zunächst Anwendungsfälle für energieträgerübergreifende hybride Energiespeicher recherchiert. Daraufhin wurden diese Anwendungsfälle kategorisiert und für den Einsatz von Energiespeichern priorisiert. Im nächsten Schritt wurde für den realen Betrieb von hybriden Energiespeichersystemen ein Prognosetool für den zukünftigen elektrischen und thermischen Energieverbrauch entwickelt. Der letzte Schritt umfasst das methodische Vorgehen zur Auslegung von energieträgerübergreifenden, hybriden Energiespeichern. Die Schritte werden im Folgenden vorgestellt.

3.1 Anwendungsfälle für (hybride) Energiespeicher

Die Anwendungsfälle für (energieträgerübergreifenden hybride) Energiespeicher können allgemein als »Absicherung der Produktion«, »Optimierung des Energiebezugs« und »Bereitstellung von Systemdienstleistung« kategorisiert werden (Zimmermann et al., 2019). Die Kategorie »Optimierung des Energiebezugs« bietet die Möglichkeit, einen direkten wirtschaftlichen Benefit für Industrieunternehmen auszuweisen. Daher wird diese Kategorie in diesem Kapitel näher betrachtet. Im Folgenden werden die zugehörigen Anwendungsfälle beschrieben.

3.1.1 Peak-Shaving

»Reduktion der Maximalleistung des Netzbezugs« oder auch »Peak-Shaving« ist die Reduktion der maximalen Lastspitze innerhalb eines Kalenderjahrs. Dabei werden Energiespeicher leistungs- und energiespezifisch auf die zu reduzierende Lastspitze dimensioniert (Abbildung 2) (Rothacher et al., 2018; Zimmermann et al., 2019).

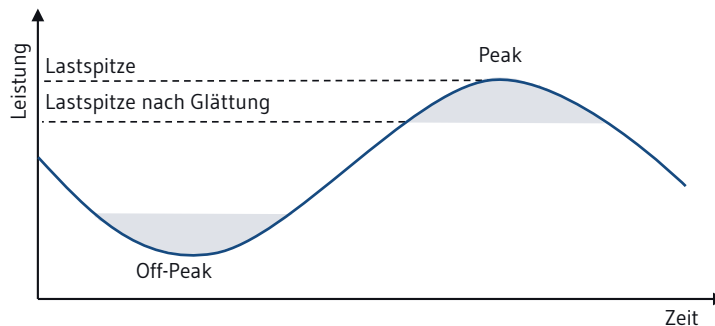


Abb. 2 Zeitliche Verschiebung von Lastspitzen (Emde et al., 2021)

3.1.2 Atypische Netznutzung

Die atypische Netznutzung richtet sich nach den Hochlastzeitfenstern des Netzbetreibers. Ziel hierbei ist es, die Leistung in Zeiten mit hohen Lasten zu reduzieren, um so eine Entlastung des öffentlichen Netzes zu unterstützen (Abbildung 3) (Zimmermann et al., 2019; Rothacher et al., 2018).

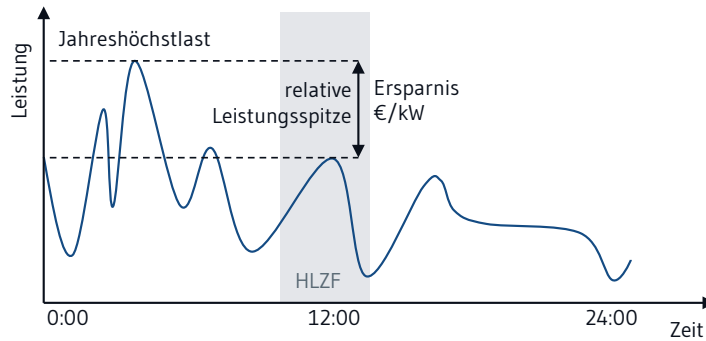


Abb. 3 Hochlastzeitfenster und mögliche Ersparnis (Emde et al. 2021)

3.1.3 Eigenverbrauchsoptimierung von erneuerbaren Energieanlagen

Die Eigenverbrauchsquote von beispielsweise einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) lässt sich durch einen Energiespeicher steigern (Köhler et al., 2018). Dabei wird überschüssiger PV-Strom in einem Energiespeicher zwischengespeichert, um diesen zu einem späteren Zeitpunkt selbst zu verbrauchen und somit den eigenen Strombezug aus dem Netz zu verringern (Abbildung 4).

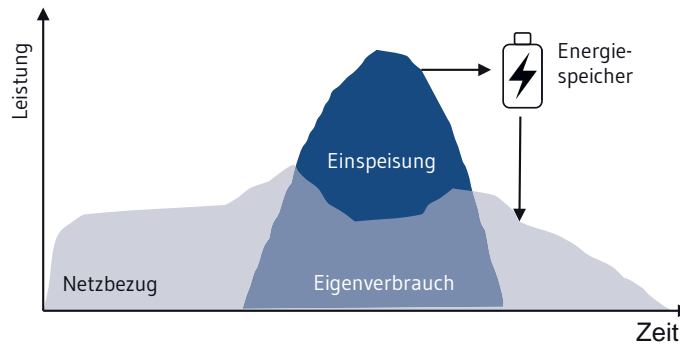


Abb. 4 Eigenverbrauchsoptimierung mittels Energiespeicherung (Emde et al., 2021)

3.1.4 Effizienzsteigerung von Energiewandlungstechnologien

Ein Energiespeicher löst die direkte Verbindung von Erzeugern und Verbrauchern und ermöglicht so eine zeitliche Entkopplung. Durch diese zeitliche Verschiebung ist es möglich, Erzeugeranlagen in ihren optimalen Betriebspunkten zu betreiben, Energie einzusparen und damit die Effizienz zu steigern (*Abbildung 5*) (März und Öchsner, 2019).

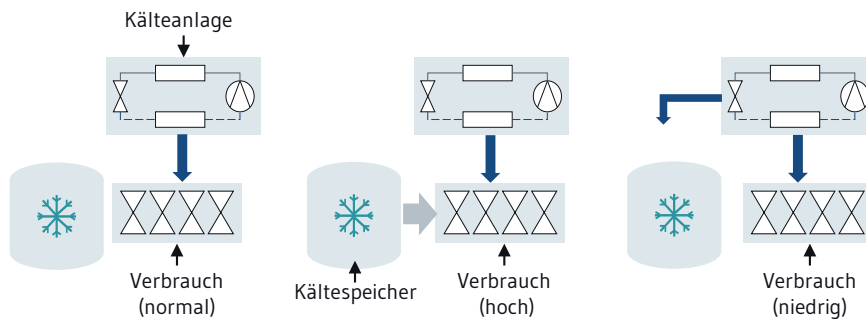


Abb. 5 Effizienzsteigerung von Energiewandlungsanlagen mithilfe eines Kältespeichers (Emde et al. 2021)

3.1.5 Nutzung dynamischer Strompreise (Handel an der Strombörse)

Preisschwankungen der Strommärkte können durch die Einbindung von Energiespeichern genutzt werden. Ziel dieses Verfahrens ist es, bei niedrigen Strompreisen Energie zu speichern und bei hohen Strompreisen den Energiespeicher zu entladen und diese Energie zu nutzen (*Abbildung 6*) (Zimmermann et al., 2019; Kanngießer, 2013).

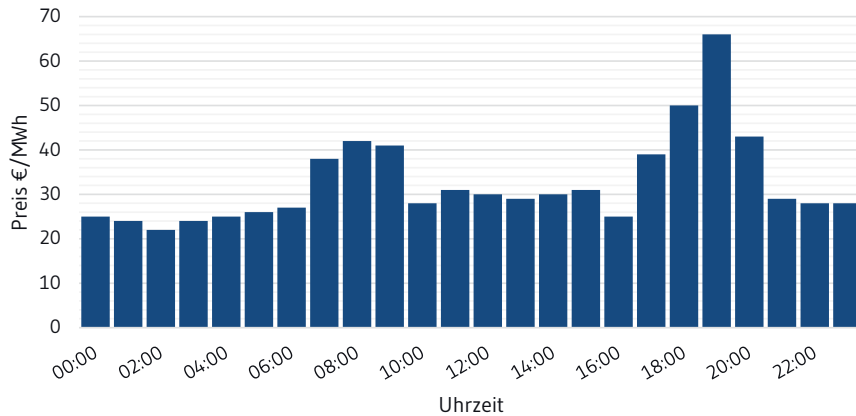


Abb. 6 Day-Ahead-Preisschwankung des Strommarkts (Emde et al., 2021)

3.2 Prognosetool für thermische und elektrische Energieverbräuche zum Betrieb hybrider Energiespeichersysteme

Um den Betrieb von energieträgerübergreifenden (hybriden) Energiespeichern in realen Systemen ermöglichen zu können, wurde ein Prognosetool entwickelt, das zukünftige thermische und elektrische Verbrauchslasten anhand von betriebsinternen und betriebsexternen Einflussfaktoren bzw. Parametern bestimmen kann. Für diesen Arbeitsschritt wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Die hieraus resultierenden relevanten Einflussfaktoren für die Prognose sind die Produktionsauslastung, die Anzahl der produzierten Teile, die Außentemperatur und historische Verbrauchsdaten.

Die elektrische Last wurde innerhalb des Tools mithilfe einer multivariaten linearen Regressionsmethode prognostiziert. Die Regressionsparameter wurden auf Grundlage von historischen Lastdaten, prognostizierten Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (Verlauf der Außentemperatur) und dem Produktionsplan gebildet. *Abbildung 7* zeigt den prognostizierten und den tatsächlichen elektrischen Lastverlauf einer Sommerwoche. Der MAPE (Mean Absolute Percentage Error, mittlerer absoluter prozentualer Fehler) liegt bei 2,6 Prozent. Das Tool kann für einen Zeitraum von einer Woche den zukünftigen Verlauf prognostizieren.

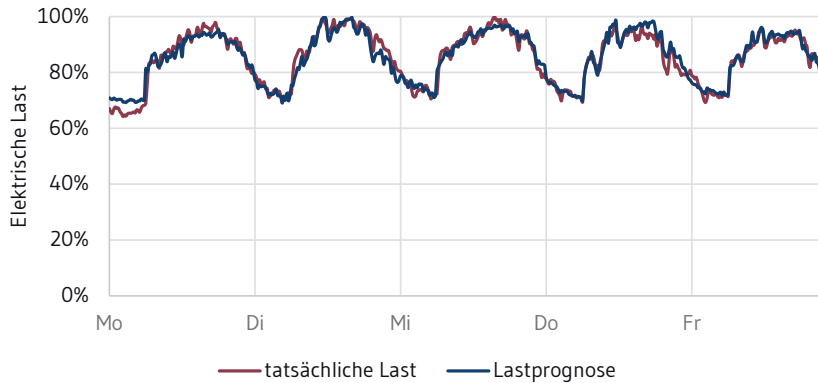


Abb. 7 Vergleich von prognostizierter und tatsächlicher elektrischer Last

Die Prognose der thermischen Last wurde innerhalb des Tools mithilfe einer univariaten linearen Regressionsmethode umgesetzt. Die Regressionsparameter wurden auf Grundlage von historischen Lastdaten, prognostizierten Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (Verlauf der Außentemperatur) und dem Produktionsplan gebildet. *Abbildung 8* zeigt den prognostizierten und den tatsächlichen thermischen Lastverlauf einer Woche. Der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) liegt bei 8,8 Prozent.

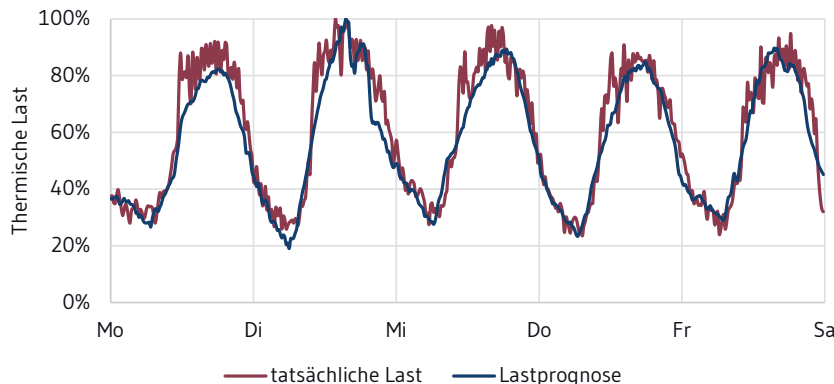


Abb. 8 Vergleich von prognostizierter und tatsächlicher thermischer Last

Wie aus den *Abbildungen 7 und 8* ersichtlich, ist es möglich, die thermische und elektrische Last für energieintensive Unternehmen bzw. ein Automobilwerk zu prognostizieren. Legt man einen Prognosehorizont von einer Woche zugrunde, liegt der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) zwischen drei und neun Prozent.

Das entwickelte Prognosetool für thermische und elektrische Lasten wurde in das Last- und Flexibilitätsmanagementsystem integriert. Auf Basis dieses Tools können der Betrieb von hybriden Energiespeichersystemen und damit optimierte Be- und Entladestrategien ermöglicht werden.

3.3 Auslegung und Bewertung eines hybriden Energiespeichers im Automobilwerk

In *Abbildung 9* ist das methodische Vorgehen für die Auslegung und Bewertung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern dargestellt. Dieses Vorgehen wurde auf Basis der Planungsschritte und Planungsaktivitäten nach Müller et al. (2009) erarbeitet.



Abb. 9 Vorgehen für die Bewertung von hybriden Energiespeichersystemen (in Anlehnung an Emde et al., 2021)

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Vorgehens anhand des Anwendungsfalls »Peak-Shaving« beschrieben.

1. Die **Referenz** bildet den Start des Vorgehens. In diesem Schritt wird durch die Ermittlung von unternehmensspezifischen Parametern (wie Anbindung an das öffentliche Netz, vorhandene Energieträger und Energiewandlungstechnologien) die Basis des weiteren Vorgehens gelegt. Informationen darüber, welche Energieträger erzeugt bzw. bezogen, transportiert und genutzt werden, bilden hierbei den Kern und bestimmen den Umfang der Auslegung und Bewertung der Energiespeicher.
2. Im Schritt **Zieldefinition** wird das Vorgehen für das Unternehmen durch den Einsatz der Energiespeicherung bestimmt. Ziel ist die Reduktion der Energiekosten und damit die Anpassung der Strategien zur Energiebereitstellung. Dieses Ziel kann über die fünf vorgestellten Anwendungsfälle für Energiespeicher erreicht werden.

3. Die benötigte **Datenbasis** wird über die Schritte »Referenz« und »Zieldefinition« bestimmt. Um eine Auslegung durchführen zu können, müssen folgende beispielhafte Grundlagendaten zur Verfügung stehen:
 - Unternehmensspezifische Lastverläufe
 - Leistungskurven der relevanten Energiewandlungstechnologien
 - Energie- und Leistungspreis des Unternehmens
4. Im vierten Schritt wird eine »energieträgerübergreifende« **Lastprofilanalyse** durchgeführt. Dafür werden die Lastverläufe der einzelnen Energieträger und die dazugehörigen Leistungskurven der Energiewandlung analysiert. Der Netzbezug wird zu jedem Zeitpunkt mithilfe der Verbräuche und der Energiewandlung analysiert. Anhand dieser Analyse lassen sich die mittlere und die maximale Last, die Anteile der Energieträger und Energiewandler an den Lastspitzen und das resultierende Lastprofil am Netzanschlusspunkt ermitteln.
5. **Modellierung:** Im fünften Schritt werden in einem iterativen Prozess alle Energiespeicher und deren Kombinationen ausgelegt und wirtschaftlich bewertet. In der ersten Iterationsschleife wird die erste mögliche Leistung für die Lastspitzenreduktion untersucht. Dafür wird mithilfe einer analytischen Optimierungsmethode die Kombination und das Verhältnis der unterschiedlichen Energiespeichertechnologien bestimmt. Die Zielfunktion richtet sich nach der Maximierung des Kapitalwerts für einen Energiespeicher. Das ist für den Anwendungsfall »Peak-Shaving« die Leistung, mit der über eine Energiespeichertechnologie die Last am Netzanschlusspunkt reduziert werden kann. Damit ergibt sich eine mögliche Kosteneinsparung, die den Investitionskosten für einen Energiespeicher gegenübersteht. Die Berechnung der Kapazität lässt sich aus dem Integral der Lastspitze, die über dem Wert der Lastgrenze liegt, berechnen (*Abbildung 10*). Im Anschluss wird eine ökonomische Analyse der verschiedenen Technologien durchgeführt. Dafür werden die spezifischen Investitionskosten für die spezifischen Leistungs- und Energiekosten berechnet. Die Bewertung und der Vergleich der Energiespeicher basieren auf dem Kapitalwert. Zudem wird eine jährliche Energiepreissteigerung berücksichtigt und die Amortisationszeit berechnet.

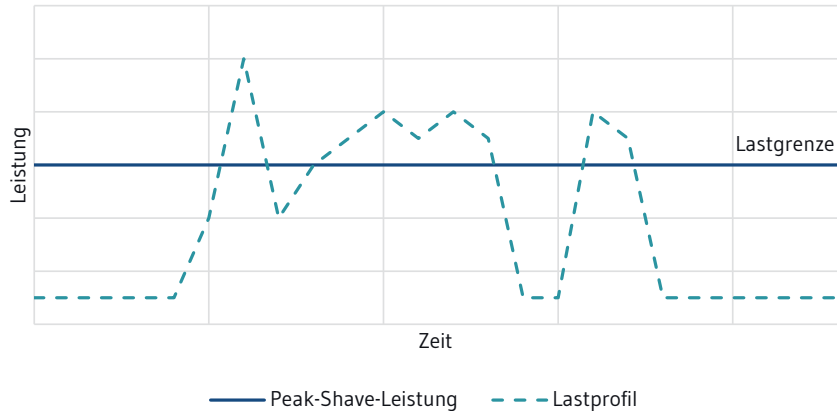


Abb. 10 Berechnung der benötigten Kapazität für Peak-Shaving (Emde et al., 2021)

Damit ist der erste Durchlauf abgeschlossen. Im Anschluss wird geprüft, ob die maximale Lastspitzenreduzierung erreicht wird. Die maximale Lastspitzenreduktion ist dem durchschnittlichen mittleren Leistungsbezug über ein Jahr gleichzusetzen. Ist dies der Fall, wird die Modellierung beendet. Ist die maximale Lastspitzenreduzierung nicht erreicht, wird eine neue Iterationsschleife mit der nächstmöglichen Lastreduktion gestartet.

6. In diesem Schritt werden alle Energiespeicherkonfigurationen hinsichtlich ihrer **Plausibilität** kontrolliert. Dafür wird das Verhältnis von Leistung zu Kapazität der Energiespeicherkonfiguration hinsichtlich Machbarkeit und Umsetzbarkeit überprüft (Sayfutdinov et al., 2018).
7. **Bewertung:** Im letzten Schritt werden alle Berechnungsergebnisse ausgewertet und hinsichtlich des maximalen Kapitalwerts priorisiert. Für die Einzeltechnologien und hybriden Energiespeicher werden die wirtschaftlichsten Energiespeicherkonfigurationen ausgegeben und miteinander verglichen.

3.4 Umsetzung des methodischen Vorgehens über ein Simulations- und Analysetool

Das vorgestellte methodische Vorgehen wurde in ein eigenständiges Simulations- und Analysetool übertragen. Durch die Komplexität der Auslegung und Bewertung mussten drei verschiedene Programme miteinander verknüpft werden (*Abbildung 11*). Für die Datenbereitstellung wird (aufgrund der Verfügbarkeit bei den Anwendern) ein Excel-Tool verwendet. Für die Datenverwaltung, Datenanalyse und der Visualisierung der Simulations- und Analyseergebnisse wird Matlab eingesetzt. Die Simulation wird mittels Simscape durchgeführt.

Die Erstellung und Simulation eines Modells wird automatisiert aus den Daten generiert und durchgeführt. Die Genauigkeit der Simulation ist abhängig von der Datengrundlage. Die Aussagekraft der Analyseergebnisse ist auch mit eingeschränkter Datenbasis gegeben, da das Analysetool die Möglichkeit bietet, fehlende oder fehlerhafte Daten simulatorisch zu bestimmen. Der Anwender muss dem Tool Informationen über das Energiesystem sowie den zeitlichen Verlauf der gemessenen Energiedaten als Excel-Datei zur Verfügung stellen (Abbildung 11). Mit den Eingabedaten und den Simulationsergebnissen wird die Analyse durchgeführt und für den Anwender visualisiert. Das Tool ermöglicht somit eine Untersuchung von komplexen industriellen Energiesystemen.

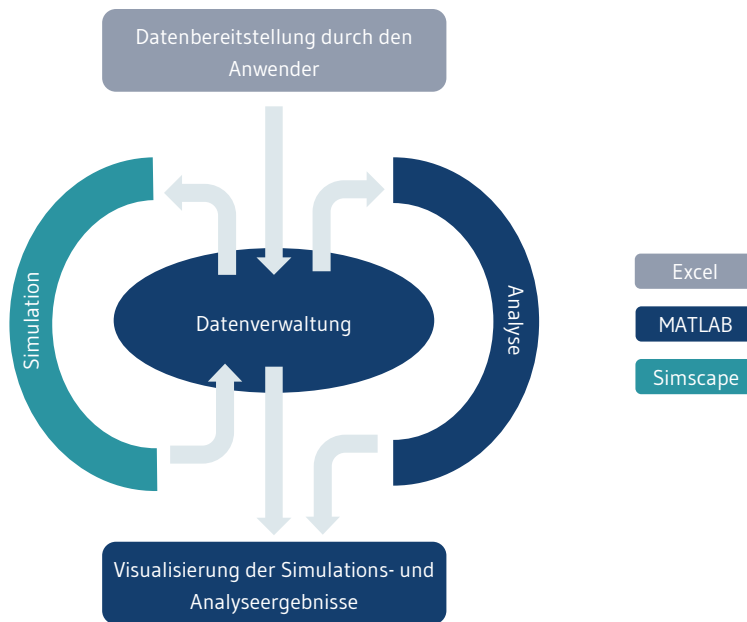


Abb. 11 Umsetzung des methodischen Vorgehens mit Excel, Matlab und Simscape

4 Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von hybriden Energiespeichern für ein Automobilwerk

Das Vorgehen wird im Folgenden am Beispiel eines Automobilunternehmens vorgestellt. Der Fokus liegt auf der wirtschaftlichen Bewertung energieträgerübergreifender hybrider Energiespeicher und dem Vergleich der Anwendungsfälle. Für den Betrachtungszeitraum der wirtschaftlichen Bewertung erfolgte eine Kalkulationsvorgabe von 15 Jahren. Der Kapitalzins beträgt drei Prozent und die jährliche Energiepreissteigerung zwei Prozent.

Abbildung 12 zeigt den exemplarischen Leistungsbezug des Automobilwerks vom öffentlichen Netz und die Lastspitze von 100 Prozent, die sich deutlich von den restlichen Lastspitzen abhebt.

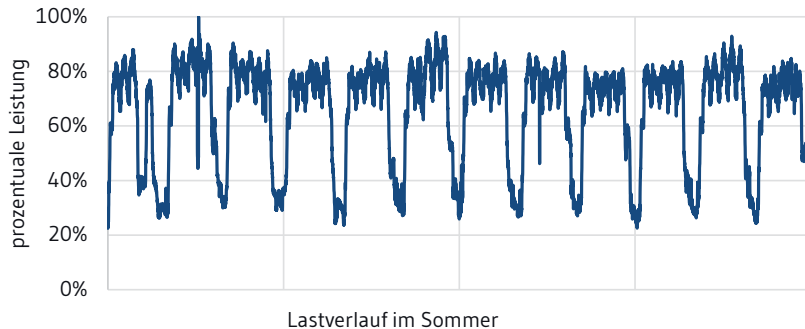


Abb. 12 Prozentualer Leistungsbezug des Automobilwerks vom öffentlichen Stromnetz

Als Auslegungsergebnis werden für jede mögliche Peak-Shaving-Leistung am Netzanschlusspunkt mehrere Kombinationen für hybride Energiespeicher (HES) ermittelt. Allerdings wird nur die Kombination betrachtet, die den höchsten Kapitalwert aufweist, beispielsweise eine Kombination aus Lithium-Ionen-Speicher und thermischem Kältespeicher. Bis zu einer Reduzierung von ca. zwei Prozent können alle Energiespeichertechnologien einen positiven Kapitalwert aufweisen. Für die Lastkappung bis ca. zwei Prozent eignen sich zudem thermische Energiespeicher. Ab dieser Grenze sind thermische Energiespeicher nur noch in Kombination mit anderen Energiespeichern wirtschaftlich einsetzbar. Durch die optimale Auslegung und Kombination der Technologien können die energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher einen größeren Peak-Shaving-Bereich zur Reduzierung der maximalen Leistung am Netzanschlusspunkt abdecken als andere Speichertechnologien. Energieträgerübergreifende HES können bis zu einer Peak-Shaving-Leistung von 16 Prozent einen positiven Kapitalwert aufweisen. Als Vergleich erreichen Lithium-Ionenspeicher einen positiven Kapitalwert bis zu einer Peak-Shaving-Leistung von acht Prozent. Im vorliegenden Anwendungsfall besitzen energieträgerübergreifende HES ab einer Peak-Shaving-Leistung von zwei Prozent zu jedem weiteren Zeitpunkt den höchsten Kapitalwert und erreichen ihren maximalen Kapitalwert bei ca. zehn Prozent Reduzierung der Spitzenlast am Netzanschlusspunkt.

Abbildung 13 stellt das Verhältnis der verschiedenen Energiespeicherkombinationen zu den fünf Anwendungsfällen und die jeweilige Amortisation in Jahren dar. Dabei wurde jeweils die Energiespeicherkombination mit dem höchsten Kapitalwert und der kürzesten Amortisation dargestellt.

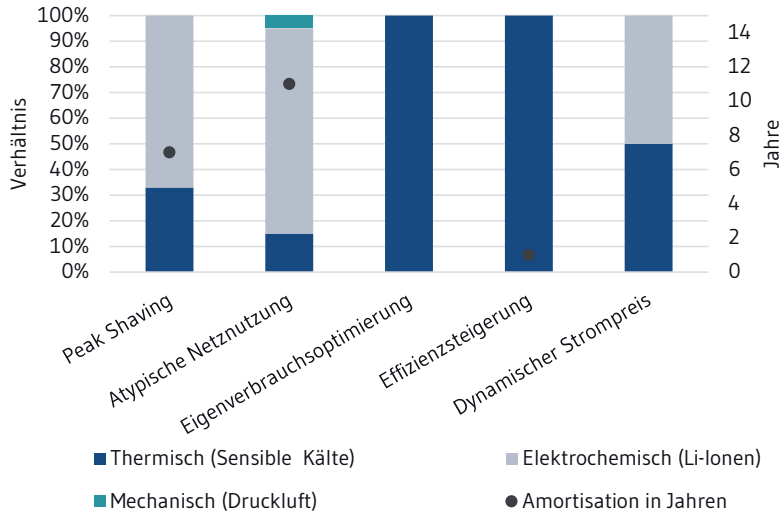


Abb. 13 Verhältnis der Energiespeicherkombinationen zu den fünf Anwendungsfällen und die jeweilige Amortisation in Jahren

- Für den Anwendungsfall »Peak-Shaving« ist das eine Kombination von einem thermischen Kältespeicher und einem elektrochemischen Lithium-Ionen-Speicher im Verhältnis 1:2. Die Amortisation liegt bei unter sieben Jahren.
- Durch die hohe Leistung, die benötigt wird, um eine atypische Netznutzung durchzuführen, wird die Kombination eines thermischen Kältespeichers, eines mechanischen Druckluftspeichers und eines elektrochemischen Lithium-Ionen-Speichers benötigt
- Für den Anwendungsfall der Eigenverbrauchsoptimierung konnte keine Energiespeichertechnologie bzw. -kombination ausgelegt werden, die wirtschaftlich ist bzw. sich innerhalb von 15 Jahren amortisiert. Dies liegt an der hohen Eigenverbrauchsquote des Unternehmens. Einen Überschuss an erneuerbaren Energien liegt lediglich bei Produktionsstillstand vor. Dieser verhältnismäßig geringe Energieüberschuss, verbunden mit wenigen Zyklen für einen Energiespeicher, lässt unter den angenommenen Randbedingungen keine wirtschaftliche Nutzung für das Unternehmen zu.
- Für den Anwendungsfall der Effizienzsteigerung von Wandlungstechnologie ist ein hybrides Energiespeichersystem nicht sinnvoll, da für diesen Anwendungsfall die Effizienzsteigerung des Druckluftsystems kaum positive wirtschaftliche Effekte erzielen lässt. Ein thermischer Kältespeicher als monoenergetisches Speichersystem würde bei verhältnismäßig geringen Investitionskosten hingegen einen hohen Kapitalwert erreichen und eine kurze Amortisationszeit erzielen.

- Der Anwendungsfall der dynamischen Strompreise wurde mithilfe des Day-Ahead-Markts berechnet. Für diesen Anwendungsfall lässt sich unter der angenommenen Kostensituation keine Technologie wirtschaftlich auslegen bzw. es existiert keine Kombination, die sich innerhalb von 15 Jahren amortisiert. Dies liegt vor allem an den Verlusten, die durch die Ein- bzw. Ausspeicherung und die Selbstentladung der Energiespeicher entstehen und einer möglichen Einsparung gegenüberstehen. Für diesen Anwendungsfall spielt zudem die Betriebsstrategie der Energiespeicher eine wichtige Rolle, die vorgibt, zu welchem Preis die Energiespeicher be- und entladen werden sollen.

4.1 Fazit und Ausblick

Der Einsatz von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern und damit die Bereitstellung von Energieflexibilität ist aus ökonomischer Perspektive für das Automobilunternehmen besonders interessant. Empfohlen wird die Kombination eines elektrochemischen Lithium-Ionen-Speichers mit einem thermischen Kältespeicher. Diese Kombination kann für den Anwendungsfall »Peak-Shaving« eingesetzt werden; zum anderen ist es möglich, zukünftig auf dynamische Strompreise reagieren zu können. Somit lassen sich zusätzliche wirtschaftliche Vorteile erzielen. Zudem kann der thermische Kältespeicher für die Effizienzsteigerung der Kompressionskältemaschinen eingesetzt werden. Um den thermischen Energiespeicher simultan für die Anwendungsfälle »Effizienzsteigerung« und »Peak-Shaving« nutzen zu können, muss der Speicher hinsichtlich Leistung und Energie doppelt so groß ausgelegt werden wie ursprünglich.

5 Literatur

BOCKLISCH, T., 2015. Hybrid Energy Storage Systems for Renewable Energy Applications [online]. Energy Procedia, 73, 103–111. ISSN 18766102 [Zugriff am: 11. März 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.egypro.2015.07.582

CHONG, L.W., Y.W. WONG, R.K. RAJKUMAR, R.K. RAJKUMAR und D. ISA, 2016. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems [online]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66, 174–189. ISSN 13640321 [Zugriff am: 16. Oktober 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.rser.2016.07.059

EMDE, A., B. KRATZER und A. SAUER, 2020. Auslegung von hybriden Energiespeichern [online]. 16. Symposium Energieinnovation der TU Graz. 16. Symposium Energieinnovation der TU Graz [Zugriff am: 25. Februar 2020]. Verfügbar unter: doi:10.3217/978-3-85125-734-2

EMDE, A., M. RITTER und A. SAUER, 2021. Methode zur Auslegung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern [online]. Bewertung von Anwendungsfällen, 2021 [Zugriff am: 17. September 2021]. Verfügbar unter: doi:10.1515/zwf-2021-0151

KALTSCHMITT, M., W. STREICHER und A. WIESE, 2014. Erneuerbare Energien. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-03248-6.

KANNGIESSER, A., 2013. Entwicklung eines generischen Modells zur Einsatzoptimierung von stationären Speicheranwendungen. Oberhausen: Karl Maria Laufen. ISBN 978-3-87468-304-3.

KÖHLER, A., Y. BARON, W. BULACH, C. HEINEMANN, M. VOGEL, S. BEHRENDT, M. DEGEL, N. KRAUSS und M. BUCHERT, 2018. Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). 2018.

MÄRZ, M. und R. ÖCHSNER, 2019. Innovative Technologien für intelligente dezentrale Energiesysteme. Stuttgart: Fraunhofer Verl. ISBN 978-3-8396-1486-0.

MÜLLER, E., J. ENGELMANN, T. LÖFFLER und J. STRAUCH, 2009. Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben [online]. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-540-89644-9

ROTHACHER, T., H. SCHWARZBURGER und T. TIMKE, 2018. Stromspeicher für Gewerbe und Industrie. Technik, Auswahl und Auslegung Mit Anmerkungen für Heimspeicher. Berlin: Beuth Verlag. ISBN 9783410257561.

SAUER, A., E. ABELE und H. U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

SAYFUTDINOV, T., C. PATSIOS, J.W. BIALEK, D.M. GREENWOOD und P.C. TAYLOR, 2018. Incorporating variable lifetime and self-discharge into optimal sizing and technology selection of energy storage systems [online]. IET Smart Grid, 1(1), 11–18. IET Smart Grid [Zugriff am: 24. Juni 2020]. Verfügbar unter: doi:10.1049/iet-stg.2018.0014

STERNER, M. und I. STADLER, 2019. Handbook of Energy Storage. Demand, Technologies, Integration. Berlin, Heidelberg: Springer.

ZIMMERMANN, F., A. EMDE, R. LARIBI, D. WANG und A. SAUER, 2019. Energiespeicher in Produktionssystemen [online] [Zugriff am: 16. Oktober 2019]. Verfügbar unter: doi:10.24406/IPA-N-552073

Impressum

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Universität Stuttgart
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970 1241
kopernikus-synergie@eep.uni-stuttgart.de
www.kopernikus-projekte.de
www.synergie-projekt.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar

ISBN (Printausgabe): 978-3-8396-1778-6

DOI (kostenlose PDF-Version): <https://doi.org/10.24406/publica-258>

Koordination: Sara Gail und Lena Hitzenberger

Gestaltung: PTW, TU Darmstadt

Druck und Weiterverarbeitung: Elanders, Waiblingen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2022

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

verlag@fraunhofer.de

www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung

der angewandten Forschung e.V.

Hansastraße 27 c

80686 München

www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Zum Inhalt

Energie aus erneuerbaren Ressourcen ist nicht immer beliebig verfügbar. Je nach Jahreszeit und Witterung variiert beispielsweise die durch Photovoltaik oder Windkraft zur Verfügung gestellte Leistung. Durch den kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien wird sich die Volatilität im Energiesystem in Zukunft immer stärker ausprägen.

Die Industrie auf die sich ändernden Versorgungsstrukturen vorzubereiten und anzupassen, ist eine große Herausforderung der nächsten Jahre. Unternehmen müssen zukünftig ihre Prozesse und Betriebsorganisation so gestalten können, dass sich der Energieverbrauch zumindest in Teilen flexibel an das volatile Energieangebot anpassen kann – ein Paradigmenwechsel weg vom kontinuierlichen und rein nachfragegetrie-

benen Energieverbrauch hin zum anpassbaren, energieflexiblen Betrieb. Neben der Entwicklung von Technologien, Konzepten und Maßnahmen zur energetischen Flexibilisierung von industriellen Prozessen liegt ein zweiter Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten auf der Entwicklung einer durchgängigen IT-Infrastruktur, mit der Unternehmen und Energieanbieter in Zukunft Energieflexibilität bestmöglich einsetzen können.

Dieses Nachschlagewerk zeigt die Herausforderungen und Rahmenbedingungen von energieflexiblen Fabriken sowie Managementsysteme und Technologien für deren Realisierung. Es baut auf den wichtigsten Ergebnissen der Forschung im Rahmen der zweiten Phase des Kopernikus-Projekts SynErgie auf.



© Fraunhofer IPA/Rainer Bez

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Universität Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA



© Björn Seitz-kontender.Fotografie

Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl

Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)



© alexlevay

Prof. Alexander Mitsos, Ph.D.

Aachener Verfahrenstechnik, RWTH Aachen University und IEK-10 (Energy Systems Engineering), Forschungszentrum Jülich



© PTW/S. Scheibner

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold,

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität Darmstadt

ISBN 978-3-8396-1778-6



9 783839 617786

© Titelbild: Schott AG

Fraunhofer Verlag