

Leitfaden

Raumluftechnik in Unternehmen der spanenden Metallverarbeitung

erstellt im Rahmen des Projektes ETA-Transfer

Erstellt durch:

perpendo
Energie- und Verfahrenstechnik GmbH
Am Viadukt 3
52066 Aachen

7. August 2020

Bearbeitet durch:

Laura Frings, Michael Zens

Inhalt

1	Ausgangssituation	2
2	Vorüberlegungen.....	2
3	Anforderungen an Raumluftechnik.....	3
3.1	Allgemeine und rechtliche Anforderungen	3
3.2	Anforderungen an den notwendigen Volumenstrom	3
3.2.1	Forderung 1: Frischluftversorgung und Abfuhr von Schadstoffen	4
3.2.2	Forderung 2: Einbringung von Heiz- & Kühlleistung	6
	Benötigte Heiz- & Kühlleistung	6
	Notwendiger Volumenstrom zur Einbringung der Heiz- bzw. Kühlleistung....	8
3.2.3	Forderung 3: Bilanzausgleich Prozessabluft.....	10
3.3	Zusammenfassung Regelungsstrategie	10
3.4	Luftführung.....	11
3.5	Natürliche Lüftung	12
4	Ergebnisse der untersuchten Fallstudien.....	13
4.1	Anforderungen in den untersuchten Hallen	13
4.2	Optimierungspotenziale.....	14
4.2.1	Reduzierung Strombedarf Ventilatoren.....	14
4.2.2	Reduzierung von Heiz- und Kühlleistungen	15

1 Ausgangssituation

Das Projekt ETA-Transfer hat den Transfer von Forschungsergebnissen aus dem Projekt „ETA-Fabrik“ in die Industrieanwendung zum Ziel. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Umsetzung von Energieeffizienzpotenzialen sowie der Erstanwendung von innovativen Technologielösungen und Methoden in Produktionsbetrieben, die dem allgemeinen Maschinenbau oder der Fahrzeugindustrie zugeordnet werden können.

Um eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sind Produktionsstätten bei den beteiligten Unternehmen ausgewählt worden, die mit vergleichbaren Produktionsrandbedingungen arbeiten. Hierzu gehört ein 2-3-Schichtbetrieb in der Stückgutfertigung, bei der die vorwiegend spanenden Produktionsmaschinen einen wesentlichen Teil des Energiebedarfs verursachen und in denen die Gebäude mittels raumluftechnischer Anlagen belüftet und ggf. klimatisiert werden.

Der nachfolgende Leitfaden bezieht sich konkret auf das Thema Lüftungstechnik in diesen Produktionsstätten. Hierbei wird versucht aus der Analyse der Situation bei den projektbeteiligten Unternehmen allgemeine Erkenntnisse für die Raum- und Prozesslufttechnik für die beschriebenen Randbedingungen abzuleiten und konkrete Verbesserungsvorschläge zur Reduzierung des Energiebedarfs zu erarbeiten. Der Leitfaden beansprucht dabei nicht, die vorhandenen Einsparpotenziale in der Lüftungstechnik vollständig aufzuführen und zu erläutern. Stattdessen wird versucht ein zentrales Thema für die o.g. Unternehmensbranche, die notwendige Größe der Lüftungstechnik, näher zu beleuchten.

Bei sechs der beteiligten Partnerunternehmen ist dazu vor Ort jeweils das bestehende Lüftungs- und Prozessabluftkonzept in einer Produktionshalle analysiert worden, um zum einen mögliche individuelle Einsparpotenziale aufzuzeigen, und zum anderen allgemein übertragbare Erkenntnisse aus diesen Analysen abzuleiten. Bei den anderen beiden Projektpartnern ist die Konzeption einer neuen RLT-Anlage mit den Erkenntnissen dieser sechs Analysen unterstützt worden. Hierbei handelt es sich einmal um ein Neubauvorhaben und im anderen Fall um eine Nachrüstung.

2 Vorüberlegungen

In den o. g. sechs untersuchten Produktionsstätten kamen raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) zum Einsatz, die im Wesentlichen über eine Wärmerückgewinnung (mit unterschiedlichen Bauformen), ein Heizregister, ein Kühlregister (nicht in allen Fällen) und jeweils einen Ventilator in Zu- und Abluft verfügen. Zusätzlich sind i. d. R. Filter, Wetterschutzgitter und / oder Absperrklappen vorhanden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die schematische Darstellung einer solchen Lüftungsanlage.

Die Zu- und Abluftventilatoren in den betrachteten Anlagen waren zumeist mit einem Frequenzumrichter ausgestattet, der jeweils über ein Signal aus einem Kanaldrucksensor angesteuert wird. Mit dieser Regelungsstrategie soll i. d. R. erreicht werden, dass der geförderte Volumenstrom unabhängig vom Zustand der Filter oder der Klappenstellungen konstant bleibt. Die zeitlich variierenden thermischen Anforderungen in den Hallen werden dann jeweils über eine Regelung der Zulufttemperatur ausgeglichen.

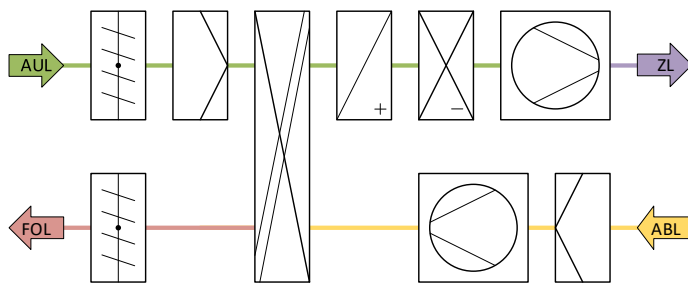


Abbildung 1: Standardaufbau einer Lüftungsanlage

Im Allgemeinen können diese Anlagen heizen und/oder kühlen aber nicht geregelt befeuchten oder entfeuchten, da es in den untersuchten Fällen i. d. R. keine Anforderungen an die Raumluftfeuchte gibt. Es handelt sich demnach um Teilklimaanlagen. Im Folgenden wird jedoch der Begriff Lüftungsanlagen verwendet.

In allen Unternehmen kamen zudem Bearbeitungszentren zur spanenden Bearbeitung zum Einsatz, die meist gekapselt sind und über eine eigene Abluft verfügen (Prozessabluft). Diese Prozessabluft wird entweder direkt über Dach abgeführt oder ist mit dem Abluftkanal der RLT-Anlagen gekoppelt.

3 Anforderungen an Raumlufttechnik

3.1 Allgemeine und rechtliche Anforderungen

Raumlufttechnische Anlagen werden in Produktionshallen der spanenden Metallverarbeitung zum einen für die Versorgung der Personen mit Frischluft und zum anderen zur Einhaltung definierter Raumkonditionen eingesetzt. In beiden Fällen sind entsprechende Regeln der Technik zu beachten.

Die Energie Einspar-Verordnung (EnEV) stellt darüber hinaus bei einem Einbau und einer Erneuerung von solchen Lüftungsanlagen eine Reihe von rechtlichen Anforderungen. Diese Anforderungen betreffen Anlagen mit einer Nenn-Kälteleistung ab 12 kW und / oder einem Volumenstrom ab 4.000 m³/h. Folgende Anforderungen werden von der EnEV gestellt:

1. Die auf das Fördervolumen bezogene elektrische Leistung der Ventilatoren darf den Grenzwert der Kategorie SFP 4 nach DIN EN 13779 nicht überschreiten (=> Begrenzung des Druckverlustes).
2. Übersteigt die Lieferrate der Anlagen 9 m³/m²/h müssen Einrichtungen zur selbsttätigen Regelung des Volumenstromes in Abhängigkeit der thermischen und stofflichen Lasten vorhanden sein (=> variabler Volumenstrom).
3. Eine Wärmerückgewinnung (WRG) muss vorhanden sein, die mindestens der Klassifizierung H3 nach DIN EN 13053 entspricht (=> Mindestwirkungsgrad der WRG)
4. Die Wärmeaufnahme von Kälteverteilungs- bzw. Kaltwasserleitungen und Armaturen ist nach Anlage 5 zu begrenzen (=> Mindestdämmung der Zuleitungen).

3.2 Anforderungen an den notwendigen Volumenstrom

Ein wesentlicher Punkt bei der Auslegung von Lüftungsanlagen ist die Bestimmung des notwendigen Volumenstroms, den die Lüftungsanlage liefern soll. Die Höhe dieses Volumenstroms ist dabei maßgeblich für den Energiebedarf der Lüftungstechnik verantwortlich, denn hierdurch wird nicht nur der

elektrische Bedarf für den Ventilatorantrieb bestimmt, sondern auch der Energiebedarf in den Heiz- und Kühlregistern, der zur thermischen Konditionierung der Luft benötigt wird.

Um diesen minimal notwendigen Volumenstrom zu ermitteln, ist es erforderlich, alle der nachfolgend beschriebenen 3 technischen Haupt-Anforderungen zu ermitteln und entsprechend zu berücksichtigen. Dabei ist zu beachten, dass diese einzelnen Anforderungen üblicherweise sowohl zeitlich als auch von der Größenordnung nicht konstant sind. Für den energieoptimalen Betrieb der Anlagen ist daher eine Regelungsstrategie erforderlich, die zu jedem Zeitpunkt den jeweils minimalen Volumenstrom zur Einhaltung aller unten erläuterten Anforderungen gewährleisten kann.

Zu diesem Zweck ist die meist vorhandene aktuelle Regelungsstrategie mit einem konstanten Volumenstrom über ein Druckeingangssignal durch geeignete Teilstrategien je Anforderung zu ersetzen. Diese notwendigen Teilstrategien werden nachfolgend in der jeweiligen Beschreibung der Anforderungen mit erläutert.

3.2.1 Forderung 1: Frischluftversorgung und Abfuhr von Schadstoffen

Eine Hauptaufgabe von Lüftungsanlagen ist die Versorgung der im versorgten Bereich arbeitenden Personen mit Frischluft und die Abfuhr von Schadstoffen, um eine definierte Raumluftqualität sicherzustellen. Für die Bestimmung des notwendigen Frischluft-Volumenstromes ist die Verwendung von Pauschalwerten nach den DIN EN 16798 möglich, auch wenn diese primär für den Komfortbereich und nicht direkt für industrielle Anwendungen gedacht ist. Die Pauschalwerte werden für 4 Kategorien angegeben, welche sich auf die Erwartungen und den Anteil möglicherweise unzufriedener Personen beziehen. Die Einordnung in eine dieser Kategorien erfolgt durch den Bauherrn des entsprechenden Gebäudes (keine gesetzlichen Vorgaben).

Die resultierende Auslegungslüftungsrate setzt sich dabei aus einem personenbezogenen Anteil und einem flächenbezogenen Anteil zusammen. Die Werte sind in den beiden nachfolgenden Tabellen zusammengefasst (siehe Tabelle 1 und

Tabelle 2).

Tabelle 1: Auslegungs-Lüftungsrate zur Verdünnung von menschlichen Emissionen (biologischen Ausdünstungen) für unterschiedliche Kategorien

Kategorie	Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener	Luftvolumenstrom je Person [l/s]
I	15	10
II	20	7
III	30	4
IV	40	2,5

Quelle: DIN EN 16798, Tab. B2.1.2-1

Tabelle 2: Auslegungs-Lüftungsrate zur Verdünnung von Emissionen von unterschiedlichen Gebäuden

Kategorie	sehr schadstoffarmes Gebäude [l/(sm ²)]	schadstoffarmes Gebäude [l/(sm ²)]	nicht schadstoffarmes Gebäude [l/(sm ²)]
I	0,5	1	2
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6
Mindestwert aus Gesundheitsschutz	4 l/s je Person	4 l/s je Person	4 l/s je Person

Quelle: DIN EN 16798, Tab. B2.1.2-2

Da in Produktionshallen üblicherweise die Anzahl an Personen gegenüber der Hallenfläche vernachlässigbar klein ist, wird nachfolgend beispielhaft nur der flächenbezogene Wert für die Kategorie I und ein „Nicht schadstoffarmes Gebäude“ verwendet, also der konservativste Fall mit den höchsten Anforderungen. Die Lüftungsrate beträgt demnach 2 l/s/m² bzw. 7,2 m³/m²/h.

Für die Luftqualität gibt es darüber hinaus verschiedene Kriterien. Hierzu gehören der CO₂-Gehalt, die VOC-Konzentration (volatile organic compounds) und die Partikelkonzentration in der Luft. Messungen der Partikelkonzentration an 4 der untersuchten Standorte haben gezeigt, dass mit den jeweiligen Lüftungsrate in allen Fällen die Erfordernisse an die Luftqualität zumindest für diesen Parameter bei weitem überschritten wurden.

Dabei wurde ein mobiles Partikelzählgerät vom Typ PCE-PCO 2 eingesetzt, mit dem jeweils über einen Zeitraum von 30 Minuten alle 5 Sekunden Luftproben in der ungestörten Raumluftumgebung erfasst wurden. Die Messergebnisse der Partikelkonzentration für die beiden relevanten Größenklassen (GK) bis 2,5 und bis 10 µm sind in Abbildung 2 dargestellt. Zudem ist der jeweils empfohlene Staubgrenzwert der „Technischen Regeln für Gefahrstoffe“ (TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte, Ausgabe Januar 2006, Bundesarbeitsblatt Heft 1/2006) als waagerechte Linie eingetragen.

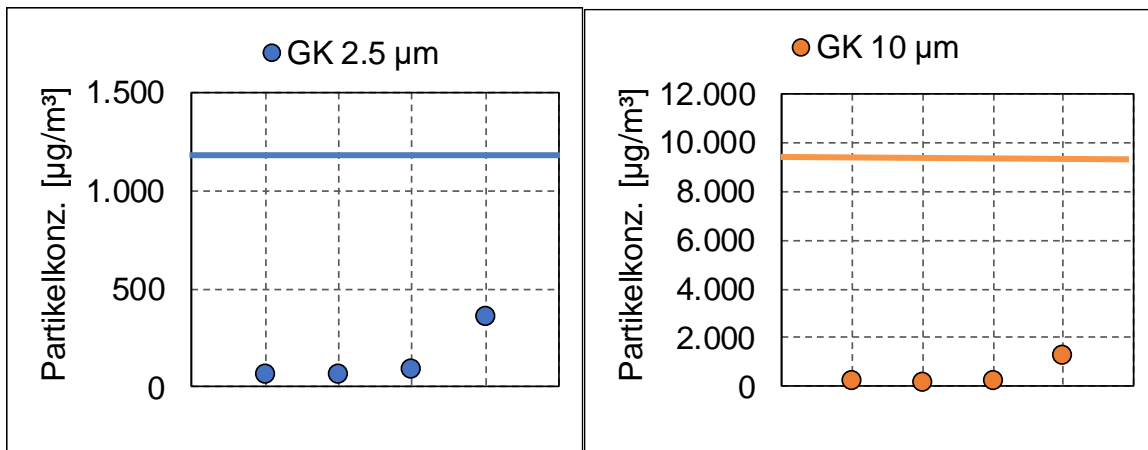


Abbildung 2: Messungen der Partikelkonzentration an 4 Standorten für 2 Größenklassen (GK)

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Frischluftverteilung innerhalb der Halle zusätzlich einen Einfluss auf Raumluftqualität hat und hier lokale Unterschiede auftreten können. Damit ist die Schadstoffkonzentration an den einzelnen Arbeitsplätzen von der Luftführung der RLT-Anlagen und der Ausgestaltung der Prozessabluft abhängig (siehe auch Kapitel 3.4 Luftführung).

Um mit dem Volumenstrom der Lüftungsanlage den Frischluftbedarf und die Abfuhr von Schadstoffen zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen, kann die Luftqualität als Regelungsgröße verwendet werden. In der Praxis werden dazu meist nicht die Partikelkonzentrationen, sondern sogenannte Mischgas-Sensoren eingesetzt, die neben der CO₂-Konzentration auch die Konzentration verschiedener VOC erfassen können. Aus den Messwerten wird dazu eine Güte der Luftqualität abgeleitet, die als Eingangssignal für die Frequenzrichter der Ventilatoren verwendet werden kann.

3.2.2 Forderung 2: Einbringung von Heiz- & Kühlleistung

Die zweite Hauptaufgabe von Lüftungsanlagen ist die Beheizung bzw. Kühlung der versorgten Bereiche auf eine geforderte Temperatur oder einen geforderten Temperaturbereich. Um die notwendige Luftmenge zu ermitteln, die hierfür benötigt wird, ist es zunächst notwendig, die maximal geforderte Heiz- und Kühlleistung zu bestimmen.

Benötigte Heiz- & Kühlleistung

Die notwendige Heiz- und Kühlleistung wurde anhand eines Gebäudesimulationsmodells einer Produktionshalle mit einer Grundfläche von 2.000 m² und durchschnittlichen Eigenschaften wie Fensteranteile der Außenwand, Höhe der Halle, Anzahl der Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA), etc. bestimmt.

Diese Heiz- und Kühlleistung wurde anschließend in Abhängigkeit der inneren Lasten innerhalb der Produktionszeit (3-Schicht-Betrieb, Montag bis Freitag) und für drei verschiedene Baualterklassen des Gebäudes variiert (Bestandsgebäude 1969-1978, Bestandsgebäude ab 1995 und Neubau). Bei den Berechnungen wurde zudem eine Solltemperatur für die Halle zwischen 20°C (Heizfall) und 26°C (Kühlfall) angenommen.

Abbildung 4 zeigt die ermittelten inneren Wärmelasten an den untersuchten 6 Standorten. Dabei wird deutlich, dass trotz der laut Aufgabenstellung vergleichbaren Nutzung der Hallen, erhebliche Unterschiede bei den inneren Wärmelasten auftreten können.

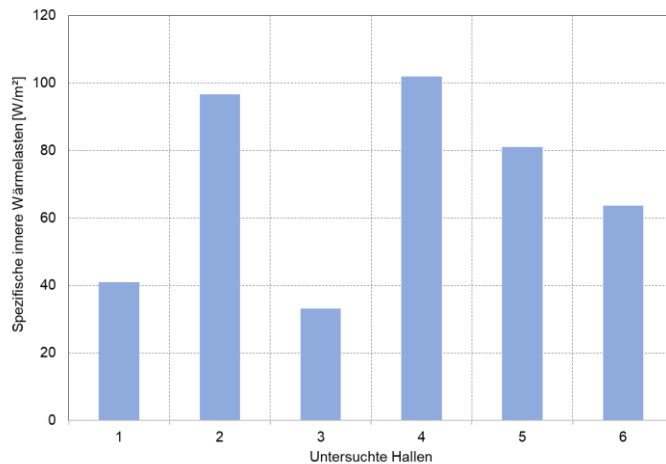


Abbildung 3: Spezifische innere Wärmelasten durch Maschinen, Beleuchtung und Personen in den untersuchten Hallen.

Die Abbildung 4 stellt die ermittelte erforderliche maximale Heizleistung in Abhängigkeit der inneren Lasten und der Baualtersklasse des Gebäudes dar.

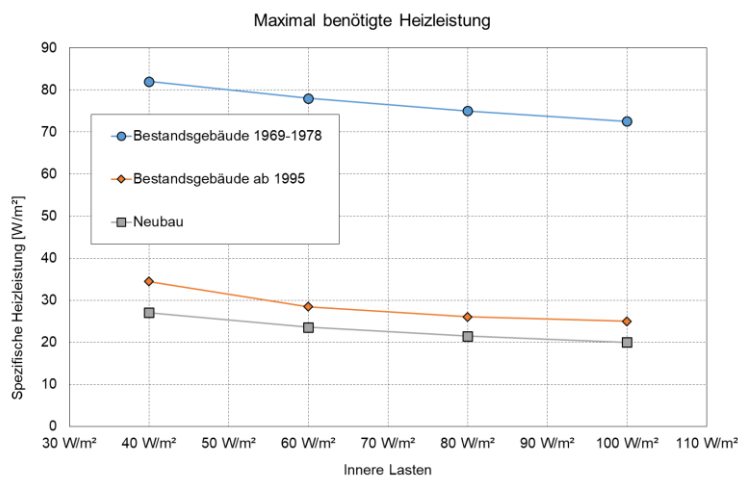


Abbildung 4: Benötigte maximale spezifische Heizleistung in Abhängigkeit der inneren Wärmelasten

Darin ist zu erkennen, dass die Heizleistung nur in geringem Maße von den inneren Lasten während der Produktionszeit abhängt, da die maximale Heizleistung i. d. R. außerhalb der Produktionszeit benötigt wird. Darüber hinaus wird jedoch der große Einfluss des Baustandards deutlich.

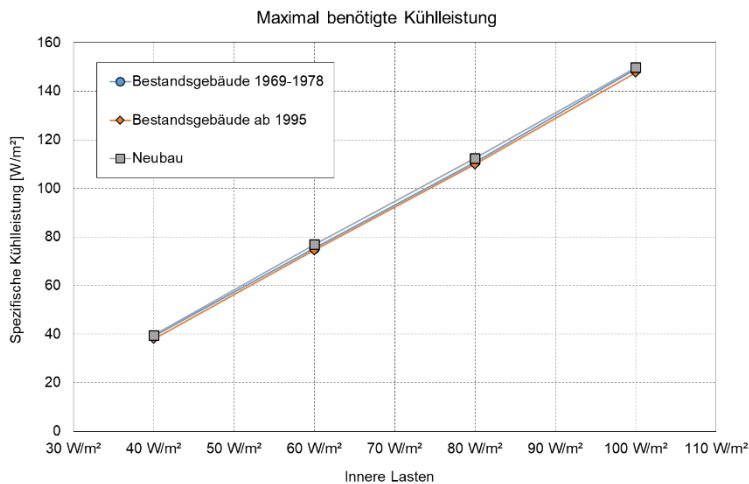


Abbildung 5: Benötigte maximale Kühlleistung (für 2.000 m² Hallenfläche) in Abhängigkeit der inneren Wärmelasten

Für die maximal benötigte Kühlleistung ist hingegen zu erkennen, dass der Einfluss der inneren Lasten deutlich ausgeprägter ist, als bei der benötigten Heizleistung. Bei der Kühlleistung ist dagegen nur ein minimaler Einfluss durch den Baustandard vorhanden.

Notwendiger Volumenstrom zur Einbringung der Heiz- bzw. Kühlleistung

Die Höhe des Volumenstroms, der für das Einbringen der geforderten Heiz- bzw. Kühlleistung benötigt wird, hängt stark von den Grenzen der Zulufttemperatur und damit von der Art der Lufteinbringung ab. Bei einer höheren maximalen Zulufttemperatur ist ein geringerer Volumenstrom notwendig, um die notwendige Heizleistung einzubringen. Andersherum verhält es sich bei der Einbringung der Kühlleistung, hier ist bei geringerer minimaler Zulufttemperatur weniger Volumenstrom notwendig.

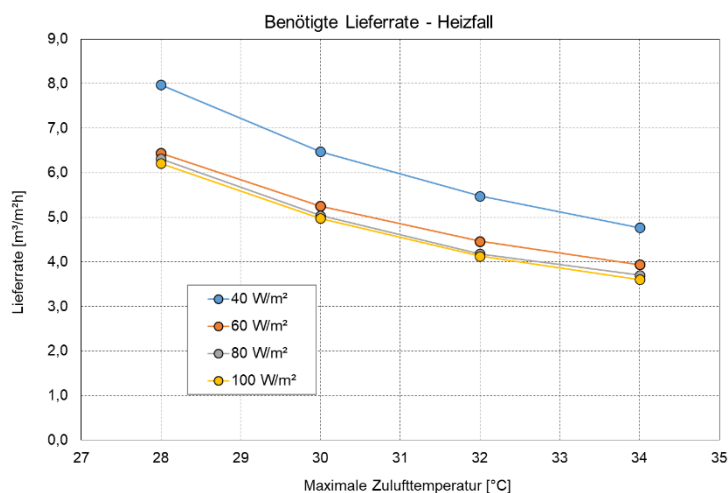


Abbildung 6: Benötigte Lieferrate im Heizfall – für Bestandsgebäude ab 1995 und innere Lasten von 60 W/m² in Abhängigkeit der maximalen Zulufttemperatur

In der Abbildung 6 ist beispielhaft für eine Anwendung die Abhängigkeit des notwendigen Volumenstromes zur Einbringung der Heizleistung von der maximalen Zulufttemperatur dargestellt. Bei einer maximalen Zulufttemperatur von 34°C wird danach ein Volumenstrom von ca. 8.000 m³/h benötigt, entspricht

einer Lieferrate von etwa $3,9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$, wohingegen bei einer maximalen Zulufttemperatur von lediglich 28°C ein Volumenstrom von ca. $13.000 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $6,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ benötigt wird.

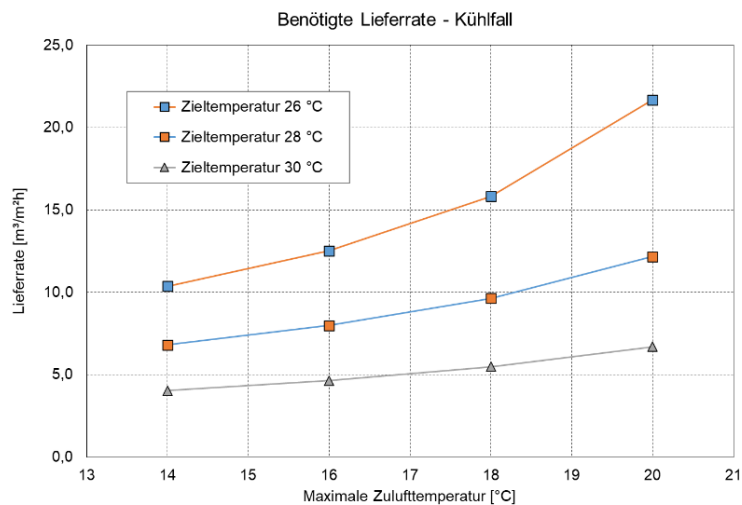


Abbildung 7: Benötigte Lieferrate im Kühlfall – für Bestandsgebäude ab 1995 und innere Lasten von $60 \text{ W}/\text{m}^2$ in Abhängigkeit der erwünschten Raumtemperatur

Analog zum benötigten Volumenstrom für den Heizfall zeigt Abbildung 7 den benötigten Volumenstrom für die Kühlung im gleichen Anwendungsfall in Abhängigkeit der minimalen Zulufttemperatur und der geforderten maximalen Raumtemperatur (26°C , 28°C und 30°C). Auch hier zeigt sich deutlich, dass die untere Grenze für die Zulufttemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die benötigte Luftmenge hat. So wird bei einer minimalen Zulufttemperatur von 14°C wegen der größeren Temperaturdifferenz zur Raumtemperatur lediglich ein Volumenstrom von ca. $21.000 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. eine Lieferrate von $10,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ zur Abfuhr der Kühllasten benötigt, wohingegen bei einer minimalen Zulufttemperatur von 20°C mehr als der doppelte Volumenstrom benötigt wird.

Auch die Raumtemperatur, die maximal erreicht werden soll, hat erwartungsgemäß einen erheblichen Einfluss auf die benötigte Luftmenge, sodass bei einer minimalen Zulufttemperatur von 18°C bei einer Raum-Solltemperatur von 30°C ein Volumenstrom von ca. $11.000 \text{ m}^3/\text{h}$ und bei einer Raum-Solltemperatur von 26°C knapp der dreifache Volumenstrom von ca. $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$ benötigt wird.

Für die geeignete Regelungsstrategie zur Erfüllung dieser Anforderung mit dem minimalen Volumenstrom zu jedem Zeitpunkt sind zwei aufeinander aufbauende Teilstrategien erforderlich. Zunächst ist eine Zulufttemperaturkaskade zu definieren, worunter man die Definition einer Kennlinie für die Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Raumtemperatur versteht. Hierbei sollte ein möglichst großer Wertebereich zwischen der minimalen und der maximalen Zulufttemperatur gewählt werden. Die jeweiligen Grenzen ergeben sich dabei durch Behaglichkeitsanforderungen zur Vermeidung von Zugerscheinungen die, bedingt durch die Luftführung, individuell sehr unterschiedlich sein können (vgl. Kap. 3.4).

In einem zweiten Schritt wird dann der Volumenstrom in Abhängigkeit der Raumtemperatur angehoben, wenn mit den definierten Zulufttemperaturen der gewünschte Raumzustand nicht eingehalten werden kann.

3.2.3 Forderung 3: Bilanzausgleich Prozessabluft

Die letzte Anforderung an den Volumenstrom einer Lüftungsanlage resultiert daraus, dass die Luftmenge, die durch die Prozessabluft der Produktionsmaschinen aus der Halle abgeführt wird, der Halle wieder zugeführt werden muss, um ausgeglichene Druckverhältnisse zu gewährleisten. Insbesondere ein Abluftüberschuss in der Halle („Unterdruck“) ist zu vermeiden, um eine unkontrollierte Nachströmung aus angrenzenden Bereichen oder von außen über Tore, Türen, Fenster oder sonstige Öffnungen zu verhindern. Eine solche Nachströmung könnte zu unerwünschtem Staubeintrag, Zugscheinungen sowie undefinierten bzw. insbesondere im Winter unbehaglichen Raumkonditionen in Fassadennähe führen.

Die Prozessabluft wird i. d. R. durch die Abluft der Bearbeitungszentren definiert, d. h. deren Größe wird durch den Hersteller der Anlagen vorgegeben. In der überwiegenden Anzahl der untersuchten Fälle war dieser Volumenstrom konstant, d. h. nicht abhängig von der Lastsituation des Bearbeitungszentrums. Zudem waren nur in einem Fall Absperrklappen an den einzelnen Anlagen eingebaut, die zumindest manuell geschlossen werden können, wenn die jeweilige Anlage nicht benötigt wird.

Um auch für diese Anforderung eine geeignete Regelungsstrategie zur Minimierung des Volumenstroms zu erreichen, ist in den meisten Fällen eine Nachrüstung von Absperrklappen an den Bearbeitungszentren erforderlich, mit denen der Abluftkanal bei Stillstand der Maschine geschlossen werden kann. Für den Abluftventilator ist dann eine Druckregelung nötig, die einen definierten geringen Kanaldruck im Abluftkanalnetz aufrechterhält.

Der Zuluftventilator wird anschließend in Abhängigkeit der Drehzahl des Abluftventilators so gefahren, dass sich eine ausgeglichene Bilanz zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom ergibt. Alternativ kann der Zuluftventilator auch in Abhängigkeit eines Differenzdruckes zwischen dem Gebäude und der Außenluft betrieben werden, wobei diese Druckdifferenz möglichst klein sein sollte. Diese alternative Zuluftvolumenstromregelung ist häufig jedoch mit erheblichen Einregulierungsproblemen verbunden, weil oft keine geeignete Platzierung für die Drucksensoren gefunden werden kann, ohne dass das System anfängt zu schwingen.

3.3 Zusammenfassung Regelungsstrategie

In den vorherigen Kapiteln ist jeweils die Regelungsstrategie zur Erfüllung der einzelnen Anforderungen mit minimalem Volumenstrom beschrieben. Bei der Zusammenführung dieser Strategien ist zu beachten, dass alle Anforderungen jederzeit eingehalten werden sollen. Daraus ergibt sich eine gewisse Reihenfolge bzw. Priorisierung der Einzelstrategien.

So ist zuerst die Druckregelung im Abluftkanalnetz zu beachten. Wenn mit dem daraus resultierenden Volumenstrom und der definierten Zulufttemperaturkaskade eine der beiden anderen Anforderungen, entweder die Raumtemperatur oder die Luftqualität, nicht eingehalten werden können, dann ist der Zuluftvolumenstrom entsprechend zu erhöhen.

Grundsätzlich müsste dann auch wieder der Abluftvolumenstrom auf das Niveau des Zuluftvolumenstroms angehoben werden (über den eingestellten Drucksollwert hinaus), um eine ausgeglichene Bilanz zu gewährleisten. Dieser Fall ist in den untersuchten Hallen jedoch entweder gar nicht oder nur für einzelne Stunden zu aufgetreten, weil insbesondere die notwendigen Volumenströme zur Einhaltung

der thermischen Anforderungen nur für wenige Stunden im Jahr erforderlich sind. Auf eine Anhebung des Abluftvolumenstroms über den oben definierten Drucksollwert hinaus zum Ausgleich des Zuluftüberschusses kann in diesen wenigen Stunden aber verzichtet werden, ohne dass dadurch Beeinträchtigungen zu erwarten wären.

3.4 Luftführung

Bei der Luftführung in Industriehallen ist zwischen 2 Grenzfällen zu unterscheiden:

- Bei der sogenannten turbulenten Mischlüftung wird die Zuluft mit einem hohen Impuls in den Raum eingebracht, damit sich die Zuluft sehr schnell und bereits in der Nähe des Luftauslasses mit der Raumluft vermischt. Übliche Bauformen von Luftauslässen, die einer turbulenten Mischlüftung am Nächsten kommen sind die Drallauslässe. Hierbei sind Zulufttemperaturen möglich, die bis zu 12 K unter der Raumtemperatur liegen, ohne dass dies zu wesentlichen Zugerscheinungen führt. Eine reine Mischlüftung arbeitet nach dem Verdünnungsprinzip, d. h. die Raumluft wird soweit durchmischt, dass überall nahezu gleiche Raumluftzustände und -qualitäten im Raum zu erwarten sind.
- Bei der sogenannten Schichtlüftung (im Komfortbereich auch Quelllüftung genannt) wird die Zuluft mit einem sehr geringen Impuls über großflächige, möglichst bodennahe Luftauslässe in den Raum eingebracht und im Bereich der Hallendecke abgesaugt, um eine gerichtete, möglichst laminare Strömung von unten nach oben zu gewährleisten. Dadurch wird in Bodennähe ein sogenanntes Mikroklima erzeugt, d. h. in der Nähe der Zuluftauslässe stellt sich eine lokale Raumtemperatur ein, die in der Nähe der Zulufttemperatur liegt. Aus diesem Grund kann die minimale Zulufttemperatur auch nur etwa 3-4 K unter Raumtemperatur eingebracht werden, da sonst lokale Behaglichkeitseinbußen befürchtet werden müssen.

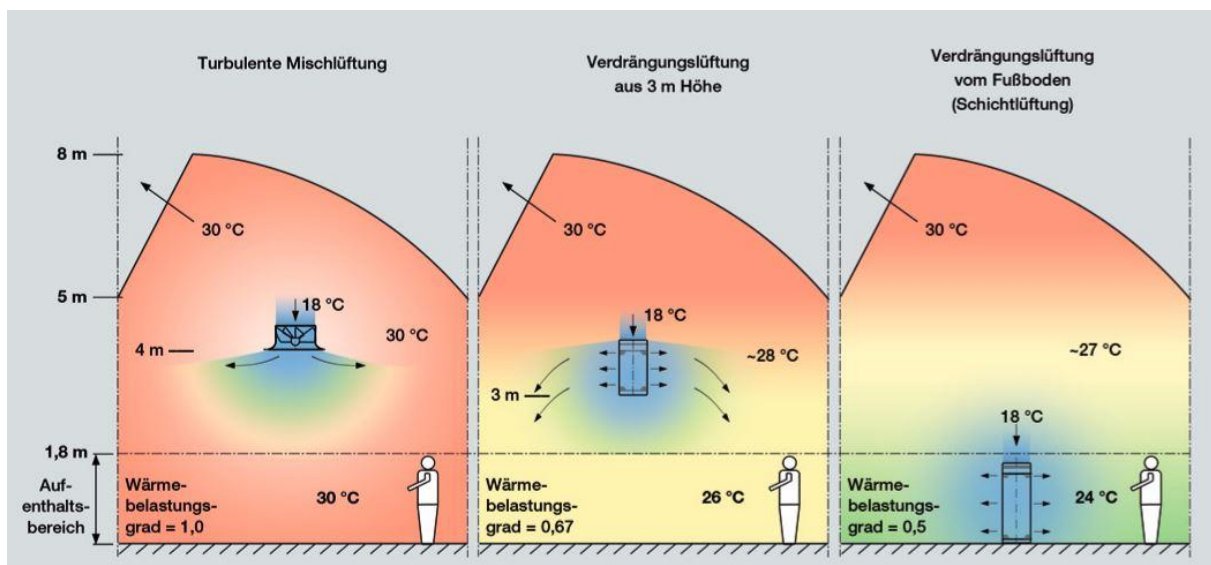


Abbildung 8: Darstellung der Temperaturverteilung in einer Halle für verschiedene Lüftungsarten (Quelle: www.krantz.de)

Da bei der Schichtlüftung in der Nähe der Zuluftauslässe nahezu Frischluftzustände herrschen, kann die Luftmenge stark reduziert werden, wenn es gelingt die Arbeitsplätze in der Nähe der Zuluftauslässe zu platzieren. Dem wirkt entgegen, dass je Zuluftmenge wegen der geringeren Temperaturdifferenz nur eine geringe Kühlleistung eingebracht werden kann. Schicht- oder Quelllüftungen können daher nur dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn die Anordnung der Arbeitsplätze und damit die Luftführung weitestgehend unverändert bleiben kann und nur geringe Kühlleistungen erbracht werden müssen.

Umgekehrt ist es daher sinnvoller im Falle von hohen inneren Wärmelasten oder häufiger wechselnden Anordnungen von Maschinen und Arbeitsplätze eine turbulente Mischlüftung einzusetzen.

3.5 Natürliche Lüftung

Eine Möglichkeit die aktive Kühlung durch eine Lüftungsanlage zu unterstützen, ist der Einsatz von natürlicher Lüftung über Fenster und RWA. Insbesondere die Öffnung der RWA kann dabei automatisiert und in den Regelkreis der Lüftungsanlage eingebunden werden, sodass im Kühlfall bei entsprechenden äußeren Bedingungen Außenluft in den Raum gelangen kann und eine zusätzliche Kühlwirkung erbringt.

Abbildung 9 stellt den Volumenstrom dar, welcher durch die geöffneten RWA in die betrachtete Halle von 2.000 m² eindringt, in Abhängigkeit der Außentemperatur für ein Bestandsgebäude ab 1995 mit einer inneren Last von 60 W/m² und einer minimalen Zulufttemperatur von 18°C. Für den Öffnungsquerschnitt der RWA ist dabei ein Flächenanteil an der Hallenfläche von 2 % angesetzt worden. Das entspricht einer üblichen Mindestgröße, wie sie in den Landesbauordnungen der Bundesländer festgelegt sind.

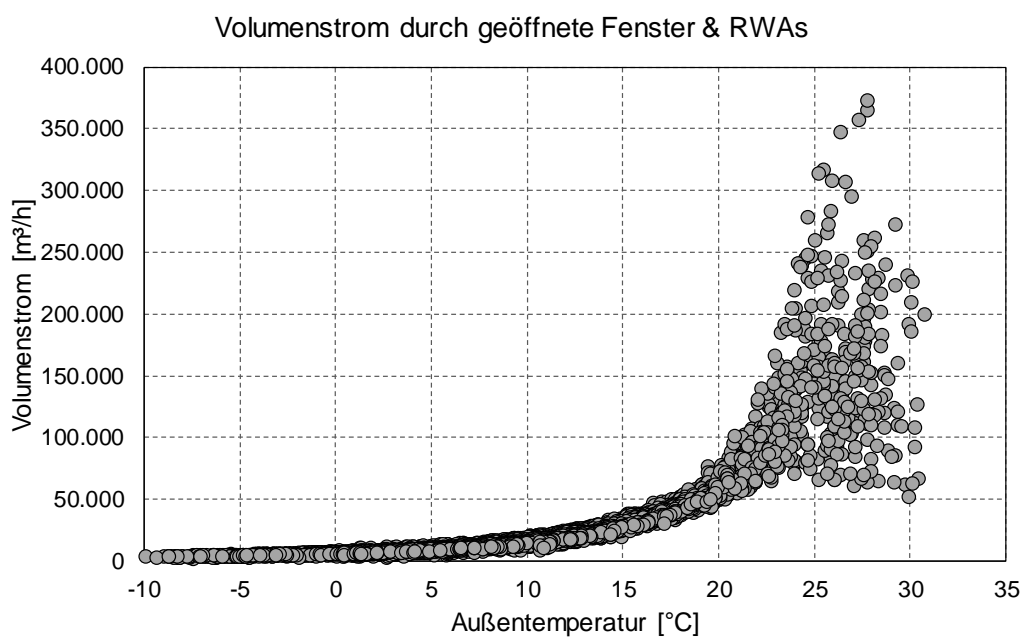


Abbildung 9: Volumenstrom durch geöffnete Fenster & RWAs

Ohne die unterstützende Wirkung der RWA liegt der Volumenstrom, der für die Einbringung der Kühlleistung notwendig ist, bei etwa 32.000 m³/h. Die Abbildung 9 zeigt deutlich, dass der erreichbare Volumenstrom durch die RWA gerade bei höheren Außentemperaturen deutlich über diesem Wert liegt und damit sehr hohe Lieferrate erreicht werden können.

Im konkreten Fall einer Industriehalle von 2.000 m² und inneren Wärmelasten von 60 W/m² können durch die unterstützende Kühlung über die RWA sowohl Kältebedarf für das Kälteregister der Lüftungsanlage als auch Ventilatorstrom eingespart werden. Konkret können etwa 21 % des Kältebedarfes und etwa 28 % des Ventilatorstromes eingespart werden, wenn das Öffnen der RWA in die Temperaturregelung mit eingebunden werden.

Die maximalen Kühlleistungen und dem entsprechend auch der maximale Volumenstrom der RLT-Anlage wird durch den Einsatz einer natürlichen Lüftung jedoch nicht beeinflusst, da bei sehr hohen Außentemperaturen die RWA sinnvollerweise wieder geschlossen werden sollten.

4 Ergebnisse der untersuchten Fallstudien

4.1 Anforderungen in den untersuchten Hallen

Bei dem Betrieb von Lüftungsanlagen ist in der Regel der Volumenstrom der kostenbestimmende Faktor, da dies neben erhöhtem Strombedarf für den Ventilator auch zu einem höheren Aufwand in der Luftkonditionierung führt. Dem entsprechend sollte es das primäre Ziel einer energieeffizienten Betriebsweise sein, den Volumenstrom auf den minimal erforderlichen Wert zu reduzieren.

Hierzu ist es notwendig, die jeweils höchsten Anforderungen an den Volumenstrom aus den vorgenannten Forderungen zu kennen. In den untersuchten Fällen ergaben sich große Unterschiede sowohl im Gebäudebestand (Baujahr, Ausführung etc.) als auch in den vorhandenen Lüftungsanlagen (Komplexität, Regelung, Zustand etc.). Jedoch hat sich bei nahezu allen Untersuchungen gezeigt, dass der Volumenstrom ein zentraler Ansatzpunkt für Optimierungspotenziale und damit möglicher Einsparungen ist.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der notwendigen Lieferraten für die bereits dargestellten Anforderungen an den Volumenstrom sind in Abbildung 10 dargestellt.

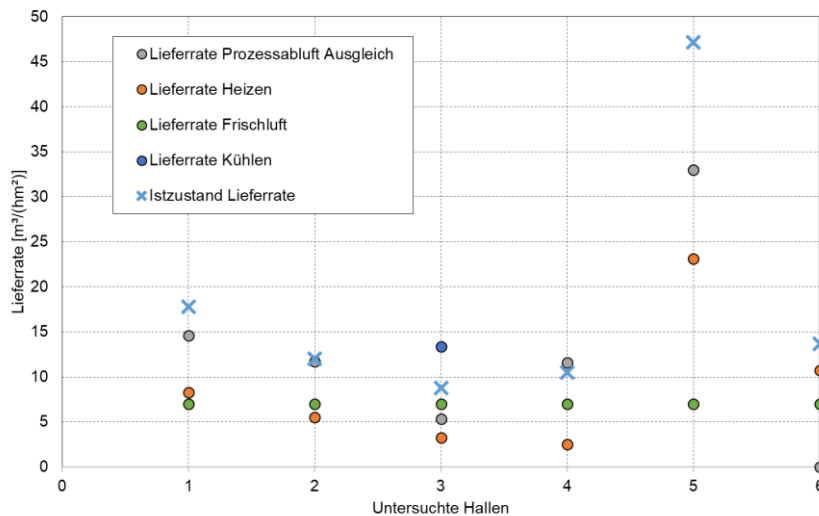


Abbildung 10: Notwendige Lieferraten für Bilanzausgleich, Heizen / Kühlen und Frischluft

Prinzipiell ist zu erkennen, dass nur in einem Fall eine aktive Kühlung der Halle über die Lüftungsanlage vorhanden ist (Halle 3). Dort stellt auch der notwendige Volumenstrom zur Einbringung der Kühlleistung die höchste Anforderung an den Volumenstrom. In vier von sechs Fällen ist es der Bilanzausgleich der Prozessabluft, der die höchste Anforderung an den Volumenstrom stellt, sodass die Prozessabluft den minimal möglichen Zuluft-Volumenstrom bestimmt. In einem Fall (Halle 6) ist die Prozessabluft nur in Form von gefilterter Umluft vorhanden, sodass dadurch kein notwendiger Zuluft-Volumenstrom für den Ausgleich der Prozessabluft resultiert. Hier resultiert die höchste Anforderung aus der Beheizung der Halle.

Wenn die maximalen Anforderungen mit dem jeweiligen Ist-Zustand verglichen werden, so wird deutlich, dass in den Hallen 1, 5 und 6 eine Auslegung der Lüftungsanlagen gewählt wurde, die zum Teil deutlich über den maximalen Anforderungen liegt. In den anderen Hallen scheint für die Auslegung eine korrekte oder gar zu geringe Zuluftmenge gewählt worden zu sein.

Diese Betrachtung gilt jedoch nur für die jeweils maximalen Anforderungen, die bei einer Auslegung der Anlagen zu berücksichtigen sind. Bei allen der betrachteten Anforderungen ist jedoch im Betrieb zumindest zeitweise mit deutlich geringeren Werten zu rechnen. Dadurch ergeben sich auch in den Fällen 2, 3 und 4 Energieeinsparpotenziale über das Jahr. Diese Einsparpotenziale können jedoch nur beziffert werden, wenn die genaue Betriebsweise der Maschinen und gleichzeitig der jeweilige Lastverlauf des Heiz- und Kühlbedarfs bekannt ist.

4.2 Optimierungspotenziale

4.2.1 Reduzierung Strombedarf Ventilatoren

Die Hersteller der Produktionsanlage geben in der Regel dem Betreiber einen erforderlichen Volumenstrom für die Prozessabluft vor, der dem ungünstigsten Betriebszustand der Anlagen entspricht. Abweichende Teillastanforderungen werden meist nicht benannt.

Prinzipiell gibt es im Bereich Prozessabluft daher zwei Ansätze, um die notwendigen Volumenströme zu reduzieren. Zunächst sollte bereits bei der Beschaffung von neuen Bearbeitungszentren u. a. auch

darauf geachtet werden, den Abluftvolumenstrom so gering wie möglich zu halten und beim Hersteller auch Teillastanforderungen (z. B. Rüstbetrieb etc.) abzufragen.

Der zweite Ansatzpunkt ist eine bedarfsabhängige Regelung der Prozessabluft in Abhängigkeit des Betriebes der Produktionsanlagen. In der Praxis ist ein Teil der Bearbeitungszentren zeitweise außer Betrieb oder zumindest im Rüstungsbetrieb, sodass die Prozessabluft nicht dauerhaft bei allen Maschinen abgesaugt werden muss. Hierfür sind folgende anlagentechnische Voraussetzungen nötig:

- Variabler Volumenstrom des zentralen Abluftventilators der Prozessabluft (vgl. Kap. 3.2.3)
- Verschließbare Klappen im Abluftkanal an den einzelnen Maschinen, die mit der Maschinensteuerung gekoppelt werden.
- Einsatz von Abluffiltern, die mit verschiedenen Abluftgeschwindigkeiten (=Volumenströmen) beaufschlagt werden können. Dies ist bei zentralen Elektrofaltern oft nicht gegeben, weil Elektrofalter häufig einen Mindestvolumenstrom erfordern. Bei der Auslegung ist daher zu beachten, dass der Filter nicht zu groß gewählt wird (ggf. mehrere Filter vorsehen die parallel zugeschaltet werden können).

In den untersuchten Hallen 1 und 5 hat sich ein nicht unerhebliches Einsparpotenzial dadurch ergeben, dass der geförderte Volumenstrom auf die Höhe der maximalen Anforderung reduziert werden kann, wobei eine 100 %-tiger Betrieb aller Bearbeitungszentren angesetzt wurde. Der Strombedarf der Ventilatoren konnte in diesen beiden Fällen zwischen 30 und 45 % reduziert werden.

In den anderen Hallen entspricht der gelieferte Volumenstrom in etwa den maximalen Anforderungen. Hier ergeben sich Einsparpotenziale nur dadurch, dass angenommen werden kann, dass die Bearbeitungszentren nicht alle gleichzeitig und dauerhaft in Betrieb sind. Genau quantifizieren lässt sich dieses Potenzial nicht, da die genauen Betriebszeiten der einzelnen Maschinen nicht bekannt sind. Wenn man hier jedoch einen Gleichzeitigkeitsfaktor von etwa 80 % für die Maschinen ansetzt, würde sich auch der Volumenstrom bis auf wenige Stunden im Jahr um 20 % absenken lassen, was aufgrund des überproportionalen Einflusses der Ventilatorumdrehzahl auf den Strombedarf zu einer (zusätzlichen) Stromeinsparung von etwa 45 -50 % führen würde.

Eine weitere Möglichkeit den Volumenstrom der zentralen Lüftungstechnik zu reduzieren, ist die Ausführung der Prozessabluft als reine Umluft (wie in der o. g. Halle 6), sodass die gefilterte Prozessabluft wieder der Halle zugeführt wird. In diesen Fällen würden die anderen Anforderungen die notwendige Größe des Volumenstroms bestimmen. Dies setzt jedoch voraus, dass die gefilterte Abluft keine erhebliche Schadstoff- oder Geruchsbelastung aufweist und eine ausreichende Luftqualität in der Halle sichergestellt werden kann.

4.2.2 Reduzierung von Heiz- und Kühlleistungen

Für den notwendigen Volumenstrom zur Einhaltung der thermischen Anforderungen gibt es verschiedene Einflussgrößen, wie den Baustandard, die Höhe der inneren Lasten und die jeweilige Zulufttemperatur.

Wie bereits gezeigt, hat dabei die Abfuhr von Kühllasten einen größeren Einfluss auf den Volumenstrom als die Zufuhr von Heizenergie, u. a., weil die Temperaturdifferenz zwischen Zuluft- und Raumlufttemperatur in der Regel geringer ist. Da von den untersuchten Hallen nur eine aktiv gekühlt wurde, ergeben sich durch Optimierung der Zulufttemperatur im Kühlfall nur in diesem Fall konkrete Energieeinsparungen. In allen anderen Fällen ist hiermit jedoch eine partielle Reduzierung der auftretenden sommerlichen Raumtemperaturen verbunden.

Während der Baustandard nur mit erheblichem Aufwand verändert werden kann, gibt es bei den inneren Wärmelasten verschiedene Möglichkeiten diese zu reduzieren, um auch die erforderlichen Kühlleistungen oder die auftretenden sommerlichen Temperaturen zu reduzieren.

Dies kann beispielsweise durch die Verlagerung von Anlagenteilen aus der Halle erfolgen. Hierfür sind insbesondere die dezentralen Kühleinrichtungen der Produktionsmaschinen und den zugehörigen Schaltschränken geeignet, indem zumindest deren Rückkühlung außerhalb der Halle angeordnet wird. Eine weitere Möglichkeit wäre eine zentrale KSS-Aufbereitung, um auch die Lasten der oft eingesetzten dezentralen Anlagen zu verlagern und den Kühlschmierstoff selbst zur Abfuhr von Lasten zu verwenden.

Auf den Heizwärmebedarf der Anlagen hat eine Reduzierung des Volumenstroms jedoch einen deutlich geringeren Einfluss, als beim Strombedarf. Zum einen bleibt die erforderliche Heizleistung der Halle unverändert, unabhängig davon, wie sie erbracht wird. Lediglich der Frischluftanteil, der von Außentemperatur auf Raumtemperatur zu erwärmen ist, reduziert sich im gleichen Maß wie die Absenkung des Volumenstroms. Allerdings sind fast alle der untersuchten Anlagen mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet, sodass die resultierenden Einsparungen beim Heizwärmebedarf bei üblichen Wärmerückgewinnungssystemen nur etwa 1/3 der Einsparungen beim Strombedarf entsprechen.