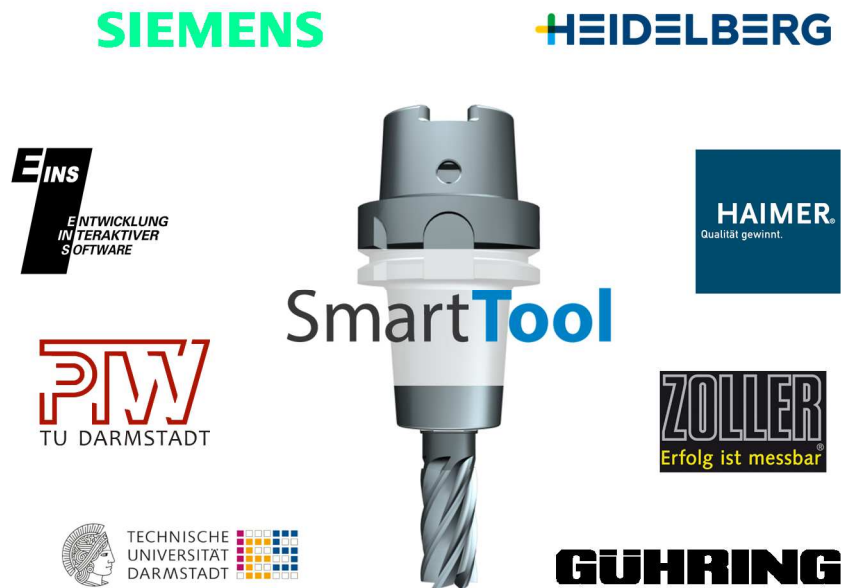


---

# Intelligente Werkzeuge für die vernetzte Produktion von morgen

## SmartTool

---



---

## Abschlussbericht BMBF - Verbundprojekt

### Rahmenkonzept

### „Forschung für die Produktion von morgen“

BETREUT VOM



**PTKA**  
Projektträger Karlsruhe  
Karlsruher Institut für Technologie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

---

## **Autoren des Berichts:**

PTW (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen) der TU Darmstadt: Eva Bosch, Thomas Grosch, Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

IES (Fachgebiet für Integrierte Elektronische Systeme) der TU Darmstadt: Kim-Carolin Landfried, Dominik Großkurth, Prof. Klaus Hofmann

Heidelberger Druckmaschinen AG: Matthias Wieshollek

Siemens AG: Alexander Ebben

EINS GmbH: Dr. Jan Schloen

Haimer GmbH: Franz Ziegltrum

Gühring KG: Martin Gutmacher

E. Zoller GmbH & Co. KG: Bernd Schwennig

Dezember 2017

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ unter den Förderkennzeichen 02PJ2720 ff. gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photo-mechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © liegt bei den Autoren

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Potentiale des SmartTool in der Zerspanung</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Ziele</b> .....	<b>7</b>
<b>4 Konsortium des Verbundprojekts SmartTool</b> .....	<b>9</b>
4.1    Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen .	9
4.2    Fachgebiet Integrierte Elektronische Systeme .....	10
4.3    Heidelberger Druckmaschinen AG .....	10
4.4    Siemens AG .....	11
4.5    EINS GmbH.....	12
4.6    Gühning KG .....	12
4.7    HAIMER GmbH .....	13
4.8    E. Zoller GmbH & Co. KG .....	14
<b>5 Vorgehen</b> .....	<b>15</b>
<b>6 Ist-Analyse</b> .....	<b>17</b>
6.1    Analyse der Werkzeugdaten .....	17
6.2    Analyse der Prozesse des Werkzeugkreislaufs .....	21
<b>7 Soll-Definition</b> .....	<b>23</b>
7.1    Identifikation des Individuums .....	23
7.1.1    Anforderungen an die Kennzeichnung.....	24
7.1.2    Optische Identifikation.....	28
7.1.3    RFID Kennzeichnung.....	30
7.2    Buchen des aktuellen Lagerortes.....	33
7.2.1    Definition der Ereignisse .....	33
7.2.2    Umsetzung.....	36
7.3    Speichern und Übertragen von Daten .....	41
7.3.1    Datenübertragung an der Werkzeugmaschine .....	43
7.3.2    Umsetzung via OPC UA.....	44
7.4    Messen und Übertragen prozessinterner Größen.....	47
7.4.1    Sensorischer Werkzeughalter .....	48
7.4.2    Versuche .....	55
7.4.3    Einordnung des Konzepts zum sensorischen Werkzeughalter .....	59
7.5    IT-Infrastruktur .....	60
7.5.1    Netzwerk .....	60
7.5.2    Hardware.....	62

---

---

7.5.3	Software .....	65
<b>8</b>	<b>Kosten-Nutzen-Bewertung.....</b>	<b>80</b>
8.1	Kostenbewertung.....	80
8.2	Nutzenbewertung.....	81
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>89</b>
9.1	Ergebnisse des Verbundprojekts.....	89
9.2	Ergebnisverwertung und Ausblick.....	91
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>92</b>

---

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

ADC	Automatic Data Capture
AI	Application Identifier
ANSI	American National Standards Institute
APS	Advanced Planning & Scheduling
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BLE	Bluetooth Low Energie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing/Computergestützte Erstellung von Bearbeitungsprogrammen
CBV	Core Business Vocabulary
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPS	Cyber-Physisches System
CPU	Central Processing Unit
CRM	Customer Relationship Management
CSR	Certificate Signing Request
CSV	Comma-Separated Values
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DI	Data Identifier
DMC	Data Matrix Code
DNC	Distributed Numerical Control
EPCIS	Electronic Product Code Information Services
ERP	Enterprise-Resource-Planning
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

---

FEM	Finite Elemente Methode
FOSSTRAK	Free and Open Source Software for Track and Trace
GS1	Global Standards 1
GTMS	Gühring Tool Management System
GWZ	Gesamtwerkzeug
HDM	Heidelberger Druckmaschinen AG
HF	Hochfrequenz
HDMI	High Definition Multimedia Interface
HM	Hartmetall
HSK	Hohlschaftkegel
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ICP	Inductively Coupled Plasma
ID	Identität
IDE	Integrated Development Environment
IES	Institut für Integrierte Elektronische Systeme
IM	Instandhaltungsmanagement
ISM	Industrial, Scientific and Medical Band
IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnik
KMP	Kraftmessplattform
LF	Niederfrequenzbereich
MAC	Media-Access-Control
MES	Manufacturing Execution System
M2M	Machine-to-Machine
NC	Numerical Control

---

NSCA	Nagios Service Check Acceptor
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PDM	Produktdatenmanagement
PTKA	Projektträger Karlsruhe
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
QR	Quick Response
QS	Qualitätssicherung
RAM	Random Access Memory
RC	Robot Control
RFID	Radio Frequency Identification
SB	Sicherheitsbestand
SBC	Single-Board Computer
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCM	Supply Chain Management
SIM	Ablaufsimulation
SK	Steilkegel
SOAP	Simple Object Access Protocol
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STC	SmartToolCenter
TCP	Transmission Control Protocol
TID	Tag ID
TMS	Tool Management System
UHF	Ultrahochfrequenzbereich
USB	Universal Serial Bus
VLAN	Virtual Local Area Network

---

VR	Virtuelle Realität
WBZ	Wiederbeschaffungszeit
WFM	Workflowmanagement-System
WZ	Werkzeug
WZM	Werkzeugmaschine
WZV	Werkzeugverwaltung
XML	Extensible Markup Language



---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Der physische Strom und der Informationsfluss des Werkzeugkreislaufs .....	2
Abbildung 2: IT-Systeme in Unternehmen mit zerspanender Fertigung [WECK03] .....	4
Abbildung 3: Klassifizierung der Werkzeugdaten in Anlehnung an [MUMM98] .....	17
Abbildung 4. Ausschnitt Vorgangskettendiagramm Werkzeugeinsatzplanung.....	22
Abbildung 5: Elementare Funktionsbausteine des SmartTool .....	23
Abbildung 6: Genereller Aufbau einer Message [ISO06] .....	25
Abbildung 7: Aufbau eines Codes nach ASC MH 10 (37S) (Programm BarCode-Generator)....	26
Abbildung 8: Aufbau eines Codes nach ASC MH 10 (25P+1T+S) (Programm BarCode-Generator).....	26
Abbildung 9: Screenshot des Einlesens des DMC mit dem Cognex Dataman 8600.....	30
Abbildung 10: RFID-Transponder Dot In XS [XERA17] .....	32
Abbildung 11: Einbau des RFID-Transponders im Werkzeugspannfutter .....	32
Abbildung 12: Auswerteeinheit, Antenne und Benutzeroberfläche des RFID-Systems Balluff GmbH.....	33
Abbildung 13: Lesestation im Werkzeugkreislauf.....	36
Abbildung 14: Auslagerung.....	37
Abbildung 15: Screenshot der Montagearbeitsplatz-App .....	38
Abbildung 16: Einstell- und Messgerät.....	38
Abbildung 17: Aufbau Portallösung mit Werkzeugwagen.....	39
Abbildung 18: Software Portallösung.....	40
Abbildung 19: Datenübertragung im Werkzeugkreislauf .....	41
Abbildung 20: Auszug aus Vorgangskettendiagrammen zur Gesamtwerkzeugaufbereitung (links) und zum Werkzeugeinsatz (rechts).....	42
Abbildung 21: Konzept des SmartTool-Beladevorgangs an der WZM physisch und digital.....	45

Abbildung 22: Auszug aus dem "Sinumerik 840D sl NC-Variable und Nahtstellensignale"- Listenhandbuch zur NC-Variable „edgeData“ [SIEM13] .....	46
Abbildung 23: Funktionsflächen an einem Werkzeughalter mit HSK-Schnittstelle .....	48
Abbildung 24: Einbauraum in einer Werkzeugaufnahme mit HSK-Schnittstelle.....	49
Abbildung 25: Einbauraum in einer Werkzeugaufnahme mit SK-Schnittstelle .....	50
Abbildung 26: HSK-A 63 Aufnahme .....	50
Abbildung 27: Blick in das Innere der Werkzeugaufnahme und auf den Schraubdeckel, der die Elektronik schützt.....	52
Abbildung 28: Sicht auf störkonturfreie Antenne (weiß) .....	53
Abbildung 29: Blick auf das geöffnete Batteriefach .....	55
Abbildung 30: Versuchsaufbau Anregung des SmartTool durch Shaker (links) und Anregungsrichtungen (rechts) .....	56
Abbildung 31: Spektrum des SmartTool in den acht gemessenen Richtungen bei 500 Hz Anregung.....	57
Abbildung 32: Vergleich der Messdaten zwischen Kraftmessdose (blau) und SmartTool-Sensor (rot) .....	57
Abbildung 33: Vergleich der Messsysteme KMP und SPIKE mit dem SmartTool-Spannfutter ...	59
Abbildung 34: Board Odroid C2.....	63
Abbildung 35: DMC-Lesegerät .....	64
Abbildung 36: RFID-Auswerteeinheit .....	64
Abbildung 37: BLE LogiLink.....	64
Abbildung 38: Allgemeine Netzwerktopologie (vereinfacht) .....	65
Abbildung 39: Architektur des FOSSTRAK-EPCIS-Systems [FOSS17] .....	66
Abbildung 40: EPCIS-Stammdatenverwaltung .....	67
Abbildung 41: Liste aller Gesamtwerkzeugstammdaten .....	67
Abbildung 42: Einzelansicht Stammdaten Gesamtwerkzeug.....	68

---

---

Abbildung 43: Zeitstrahl aller zu einem Individuum erfassten Events im Track&Trace Prozess	68
Abbildung 44: Übersichtsseite Komponentenverwaltung .....	69
Abbildung 45: Detailansicht eines Komponentenstammdatensatzes mit Individuenliste .....	69
Abbildung 46: Dashboard des STCs .....	70
Abbildung 47: Graph: Anzahl der aktiven Elemente im Unternehmen.....	71
Abbildung 48: Liste der seit mehr als 7 Tagen inaktiven Werkzeuge .....	71
Abbildung 49: Zuletzt erfasste/veränderte Elemente.....	72
Abbildung 50: Übersicht über die 100 zuletzt erfassten Events.....	72
Abbildung 51: Event-Statistiken.....	73
Abbildung 52: Beschleunigungswerte des sensorischen Werkzeugspannfutters; Darstellung in Android-App.....	74
Abbildung 53: Protokoll und OPC UA Security [GAPP06] .....	75
Abbildung 54: OPC UA Architektur [GAPP17] .....	75
Abbildung 55: SmartTool-Infrastruktur beim Projektpartner HDM.....	79
Abbildung 56: Simulationsmodell in PlantSimulation .....	87
Abbildung 57: Demonstrator (PTW) .....	90
Abbildung 58: Demonstrator (AMB) .....	90

---

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Arbeitspakete im Projekt SmartTool .....	16
Tabelle 2: Einteilung der Werkzeugdaten bezüglich ihrer zeitlichen Gültig- und Beständigkeit	18
Tabelle 3: Relevante Daten .....	19
Tabelle 4: Beispiele für die Codierung von Inhalten in MH10 DI im Vergleich zu GS1 AI [ISO16] .....	25
Tabelle 5: Ereignisse im Werkzeugkreislauf .....	35
Tabelle 6: Übersicht der verwendeten NC-Variablen im Rahmen der OPC UA-Umsetzung für Hermle C32U.....	47
Tabelle 7: Überblick über Maschinenvariablen und ihre Bedeutungen und Funktionen .....	77
Tabelle 8: Matrix der Bestellsysteme.....	83
Tabelle 9: Simulativer Vergleich des Standardmodells und des intelligenten Modells.....	87

---

## 1 Einleitung

---

Um wettbewerbsfähig zu sein, müssen produzierende Unternehmen ihre Produkte kostengünstig herstellen und anbieten. Kunden fordern zunehmend individualisierte Produkte, kurze Lieferzeiten und schnelle Innovationen, was zu einer hohen Produktvarianz, kleinen bzw. flexiblen Losgrößen und kurzen Produktlebenszyklen führt. Dies steigert auch die Anforderungen an das Werkzeugmanagement, da eine hohe Werkzeugvielfalt sowie häufige Werkzeugwechsel notwendig sind. Bei zerspanenden Unternehmen haben die Werkzeugkosten, die sowohl Investitionskosten als auch mit Werkzeugen in Verbindung stehende, laufende Kosten beinhalten, einen signifikanten Anteil an den Fertigungskosten. Sie können unter Umständen sogar ein größerer Kostentreiber als die Investitionskosten für die Bearbeitungsmaschine sein.

Zentrales Hemmnis, das bisher eine Erschließung bestehender Optimierungspotentiale verhindert, ist die fehlende Informationstransparenz im Werkzeugkreislauf. Verursacht wird diese fehlende Transparenz einerseits durch einen Mangel an wirtschaftlichen Erhebungsmöglichkeiten der benötigten Informationen/Daten und andererseits durch die mangelhafte Vernetzung verschiedenster Informationssysteme, in denen werkzeugbezogene Daten erfasst und gespeichert werden.

Zur Schließung dieser Forschungslücke wurde im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) koordinierten Projekt SmartTool ein Cyber-Physisches System (CPS) entwickelt. Die Erfassung, Verarbeitung und Übertragung entsprechender Daten stellt die Basis für die zwei zentralen Funktionsblöcke dar:

- Auf der einen Seite wird ein Track&Trace-System auf Individuumsebene aufgebaut, um zu jedem Zeitpunkt aktuelle Informationen über Aufenthaltsorte, Bestände, Werkzeugkonfiguration etc. zu erhalten.
- Auf der anderen Seite ermöglichen die Integration von Sensorik und die Anbindung der Maschinensteuerung Rückschlüsse über den aktuellen Zustand, wie z. B. den Verschleiß, des Werkzeugs. Auf diese Weise wird der Werkzeugkreislauf vernetzt und eine durchgängige Transparenz geschaffen, welche die Basis für die Erschließung von Optimierungspotentialen darstellt.

## 2 Potentiale des SmartTool in der Zerspandung

Die aktuellen Entwicklungen in der Produktion erfordern eine steigende Werkzeugvielfalt und häufige Werkzeugwechsel. Dies erhöht die Anforderungen an das Werkzeugmanagement, das sich mit allen Aufgaben befasst, die in Verbindung zum Werkzeug (WZ) stehen: von der Werkzeuglagerung über die Werkzeugbereitstellung, den Werkzeugeinsatz bis zur Werkzeughentorgung. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Stationen im Werkzeugkreislauf, die eingesetzten Informationssysteme sowie die hier gespeicherten Daten.

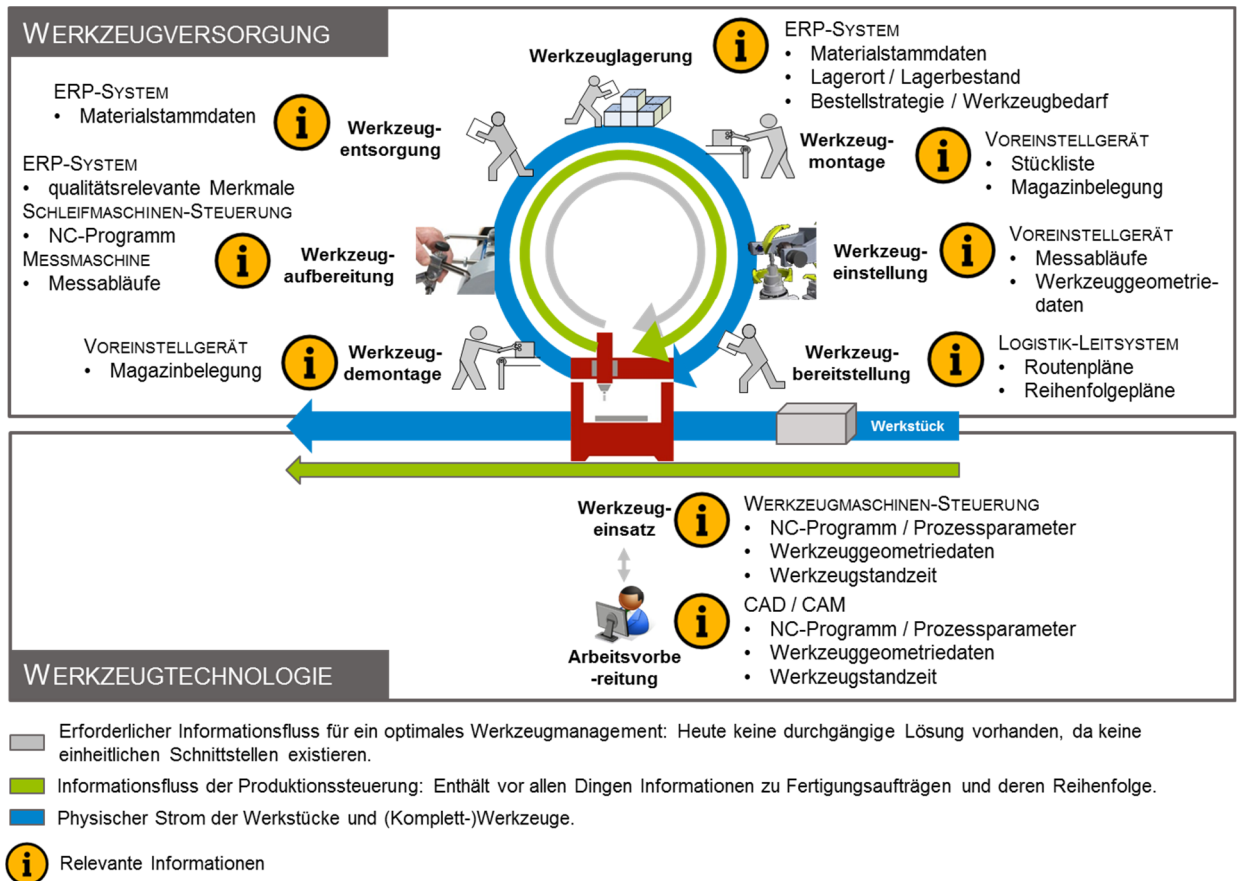


Abbildung 1: Der physische Strom und der Informationsfluss des Werkzeugkreislaufs

Typische Herausforderungen, die im Unternehmen im Zusammenhang mit dem Werkzeugkreislauf auftreten, sind

- hohe Bestände,
- Brüche in den Informationsflüssen,
- fehlendes Wissen über das Verschleißverhalten der Werkzeuge sowie
- Überforderung der beteiligten Personen aufgrund der hohen Komplexität im Werkzeugkreislauf.

---

Meist gibt es in Unternehmen keine eigene Position für einen „Werkzeugmanager“. Stattdessen sind die Aufgaben im Zusammenhang mit dem Werkzeugwesen über verschiedene Funktionen verteilt. Diese Aspekte werden im Folgenden näher beleuchtet.

### **Hohe Bestände**

In Unternehmen existieren meist keine Echtzeitinformationen zum Aufenthaltsort der Werkzeuge im Werkzeugkreislauf. Ohne Informationen über den Aufenthaltsort

- können benötigte Werkzeuge häufig nicht gefunden werden,
- ist die tatsächlich vorhandene Anzahl an Werkzeugen nicht bekannt und
- können „Lagerhüter“ nur durch aufwändige manuelle Abfragen im Enterprise-Resource-Planning (ERP) System identifiziert werden.

Zur Reduktion der Bestände ist eine transparente Informationsbasis erforderlich. Aktuelle Ansätze zur Steigerung der Informationstransparenz greifen entweder nur punktuell bei bestimmten Datensätzen an, wie der verbesserten Bereitstellung von Computer-Aided Design (CAD)-Daten für die Arbeitsvorbereitung [MARC10a], oder der Bildung einer Cloud für Werkzeugstammdaten [MARC11b]. Alternativ kann ein umfassendes Tool Management System eingeführt werden. Allerdings ist hierfür oftmals ein Wechsel bestehender Informationstechnik (IT)-Systeme erforderlich, welcher mit einem hohen Aufwand verbunden ist [TDMS12, HOBO11].

### **Bruch der Informationsflüsse**

Trotz der fortschreitenden vertikalen Integration von IT-Systemen entsteht durch verschiedenartige Schnittstellen der vielfältigen Systeme, wie sie in Abbildung 2 dargestellt sind, ein Bruch in den Informationsflüssen [WECK03]. Ein vollständig vernetzter Werkzeugkreislauf mit einer durchgängig transparenten Informationsbasis erfordert die Einrichtung von Kommunikationsschnittstellen zwischen den verschiedenen Informationssystemen. Aktuell steht nur eine begrenzte Anzahl an Schnittstellen zur Verfügung. So müssen beispielsweise Werkzeuggeometriedaten, die für die unterschiedlichsten Funktionen im Werkzeugkreislauf benötigt werden (wie zum Erstellen der Numerical Control (NC)-Programme in der Arbeitsvorbereitung, zur Einstellung der Werkzeuge in der Betriebsmittelbereitstellung oder zur Bearbeitung),

- in der Maschinensteuerung manuell eingegeben,
- über speziell angepasste Distributed Numerical Control (DNC)-Server,
- den sogenannten „Balluff-Chip“ oder
- proprietäre Systeme der Steuerungshersteller übertragen werden.

Dies erhöht zum einen den erforderlichen Aufwand und zum anderen birgt dieses Vorgehen die Gefahr nicht konsistenter Datensätze in verschiedenen Informationssystemen. Des Weiteren sind für die unterschiedlichen Einsatzzwecke die Werkzeuggeometriedaten bezüglich verschiedener Referenzkoordinatensysteme zu transformieren, was die Komplexität und somit die Fehleranfälligkeit weiter erhöht.

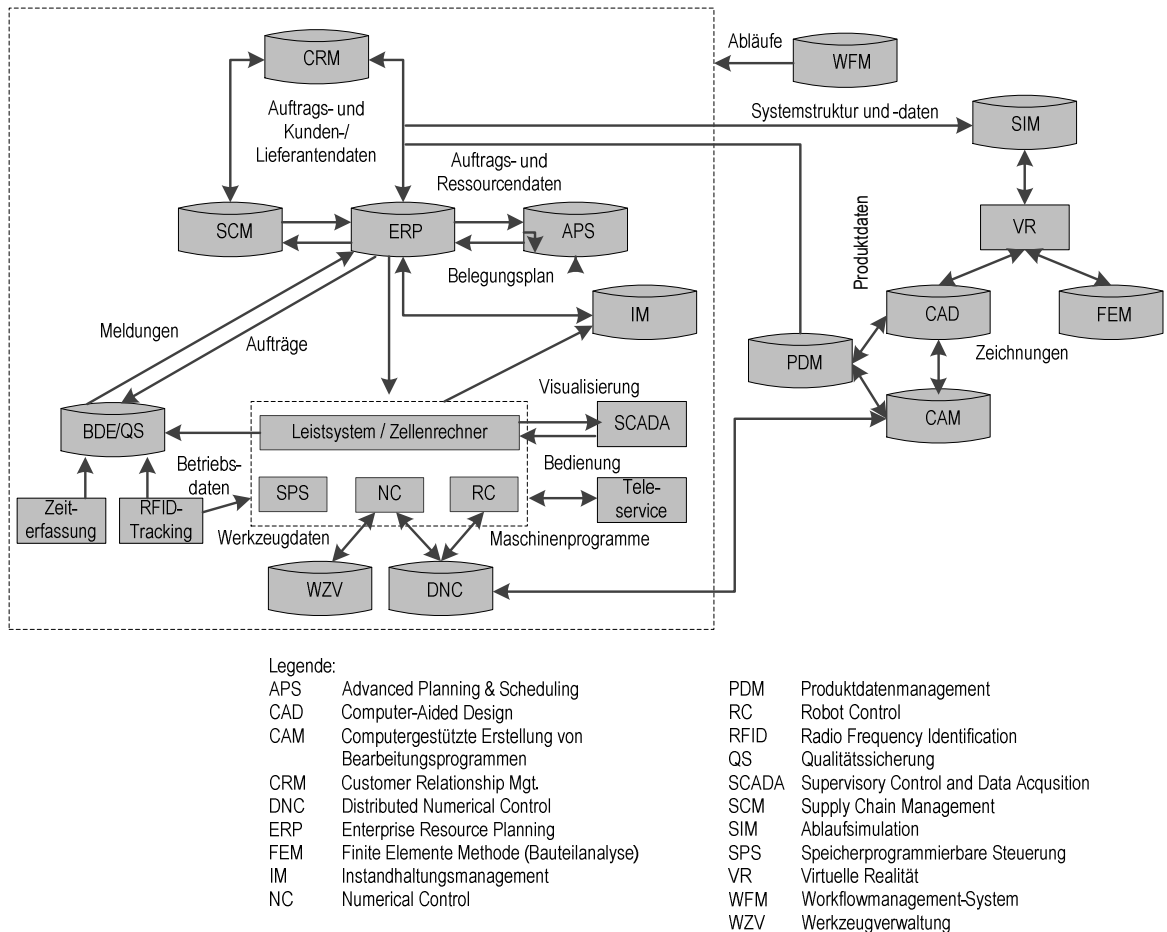


Abbildung 2: IT-Systeme in Unternehmen mit zerspanender Fertigung [WECK03]

### Tatsächliches Verschleißverhalten unbekannt

Das tatsächliche Verschleißverhalten und somit die verfügbare Reststandzeit sind meist unbekannt. Durch die Auswertung von Daten, die während des Bearbeitungsprozesses aufgenommen wurden, können Rückschlüsse auf das Verschleißverhalten und schließlich auf die verfügbare Reststandzeit gezogen werden. Zudem können Erkenntnisse bzgl. der Qualität des Zerspanprozesses und des Zustands der Werkzeugmaschine gewonnen werden.

Mittels entsprechend geeigneter und positionierter Sensoren, die möglichst nahe der Zerspanstelle angeordnet werden sollten, können u. a. die Zerspankraftkomponenten oder das Drehmoment gemessen werden. Mit unterschiedlichen Ansätzen wurde in der Vergangenheit versucht,



---

diese Prozessparameter zu ermitteln. Dabei kamen Sensorintegrationen in der Werkstückaufnahme [SPAT02] bzw. -spannung [LITW11], der Spindelwelle [IWF09, MÖLL05], im Werkzeughalter oder im Werkzeug selbst zum Einsatz [SPAT02, SCHM09, KLOC08, FRIC07, BART06, VERS04]. Laut SCHMITZ [SCHM09] bieten die Fortschritte im Bereich der Mikroelektronik, der Präzisionstechnik sowie der Beschichtungstechnologie Potentiale, miniaturisierte und dadurch im Werkzeug integrierte Sensoren technisch und wirtschaftlich herzustellen. Die immer leistungsfähigeren Systeme bestehen aus Sensoren zur Messwerterfassung und mikroelektronischen Komponenten, die die Messwerte weiterverarbeiten und an einen Zielrechner übertragen. Im Bereich der Zerspanungswerkzeuge sind bisher verschiedene berührungslose Datenübertragungsmöglichkeiten diskutiert und entwickelt worden, die jedoch eines erhöhten Bauraums bedürfen [SPAT02, SCHM09, VERS04, HUSE94, VOFE94, GEBE95, GEBE97, HASS02]. Auch autarke, mit Akkulösungen ausgestattete Werkzeugsysteme sind bereits bekannt [SCHM09].

Angeborene Systeme mit integrierter Sensorik sind häufig kostenintensiv und nicht robust. Die Hauptnachteile sind jedoch, dass durch die angebrachte Sensorik meist eine zusätzliche Störkontur am Halter erzeugt wird und dass die Telemetrie zu Einschränkungen im Bearbeitungsraum führt.

### **Überforderung der beteiligten Personen aufgrund der hohen Komplexität im Werkzeugkreislauf**

Im Werkzeugmanagement übernehmen die Beschäftigten in der Fertigung eine Vielzahl administrativer Aufgaben. So müssen sie beispielsweise entscheiden, wann ein Werkzeug in die Aufbereitung überführt werden muss oder wann es zu entsorgen ist. Weiterhin übernehmen sie zahlreiche Aufgaben im Bereich der Datenerfassung. Diese erfolgt in vielen Fällen manuell, was dazu führt, dass mehrfach redundante Daten eingegeben werden. Neben dem erhöhten Verwaltungsaufwand führt dies zu einer oft fehlerhaften Datenbasis für zukünftige Planungen.

Entwicklungen fokussieren sich daher auf Lösungen für die automatische Identifikation von Werkzeugen oder Werkzeughaltern [MARC11b, MARC11c, AURI08, AURI09]. Grundsätzlich stehen hierfür unterschiedliche Technologien zur Verfügung wie Barcode-Systeme, Optical Character Recognition oder Radio Frequency Identification (RFID) Systeme [FINK08]. In der industriellen Praxis werden zur automatischen Identifikation von Werkzeugen (auch ohne Sichtkontakt) und Speicherung der Prozessdaten teilweise RFID-Chips eingesetzt [AURI08, HEIN11, CRAI09], da diese robuster gegen Verschmutzungen sind als Barcode-Systeme [AURI09, SCHO05]. Bei den auf dem Markt verfügbaren Konzepten bestehen allerdings unterschiedliche Nachteile, z. B. dass der Chip auf einem Plastik-Clip befestigt ist, der an das Komplettwerkzeug angebracht wird. Dies

---

hat u. a. zur Folge, dass bei Baukastensystemen, bei denen Werkzeug und Halter getrennt verwaltet und verwahrt werden, nur ein Identifikationsmittel und Speichermedium zur Verfügung steht [MARC11c], während zwei benötigt werden. Allein diese Vorgehensweise birgt eine große Fehlerquelle bis hin zur Unbrauchbarkeit der Daten.

Zum Einsatz kommende Identifikationssysteme auf Werkzeug und Werkzeughalter dienen primär zur Identifikation und Speicherung von Daten. Die Identifikation zur automatischen Werkzeugbuchung wird zum Teil genutzt, um über Werkzeugschränke, die mit IT-basierten Lagerbestandsystemen ausgerüstet sind, oder mit Tool Management Softwares automatische Werkzeugbestellungen auszulösen. Diese Werkzeugbestellungen erfolgen hierbei direkt oder über ERP-Systeme [NOWY08, GRUN12]. Allerdings werden beispielsweise bei Meldebestandsverfahren Werkzeuge nicht berücksichtigt, die sich aktuell im Umlauf in der Fertigung befinden. Ein weiterer Baustein für die Informationstransparenz im Werkzeugkreislauf ist die Online-Übertragung der Messwerte bei der Werkzeugeinstellung mittels DNC an die Maschinensteuerung [ESSW09]. Allerdings ist auch hier noch ein manueller Eingriff erforderlich, der die übersendeten Messdaten an der Maschine dem jeweiligen Werkzeug zuordnet.

---

### 3 Ziele

---

Auf Basis der im vorherigen Kapitel beschriebenen Problemstellungen ist das Verbundprojektziel die Entwicklung des CPS „SmartTool“. Mit der Entwicklung soll die Erreichung der Ziele des Werkzeugmanagements ermöglicht, vereinfacht und beschleunigt werden. Das wesentliche Ziel des Werkzeugmanagements ist die Sicherstellung der Werkzeugverfügbarkeit bei geringsten Kosten, das heißt die Bereitstellung des richtigen Werkzeugs, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, in der richtigen Qualität und zu möglichst niedrigen Kosten. Um dieses Ziel zu erreichen werden meist hohe Bestände aufgebaut, was in hohen Kapitalbindungskosten resultiert. Eine Optimierung dieses Zielkonflikts wird mit dem SmartTool verfolgt.

#### **Erhöhung der Informationstransparenz im Werkzeugkreislauf**

Ein Ansatzpunkt zur Reduktion der Bestände sowie zur Erhöhung der Werkzeugverfügbarkeit ist die Erhöhung der Informationstransparenz im Werkzeugkreislauf. So soll durch ein sogenanntes Track&Trace-System Transparenz über die im Lager und im Umlauf befindlichen Werkzeuge hergestellt werden. Ein Track&Trace-System ermöglicht zum einen Transparenz bezüglich Werkzeugtyp und -anzahl, zum anderen können den Individuen Mess- und Korrekturdaten sowie Daten aus dem Bearbeitungsprozess zugeordnet werden. Auf Basis dieser Daten können zahlreiche Auswertungen gemacht werden, die weiterhin zu einer Optimierung des Zielkonflikts führen.

Durch eine Analyse der Werkzeugeinsatzdaten kann beispielsweise das Werkzeugspektrum bereinigt werden. Auslaufende Werkzeuge und obsoleete Bestände sollen identifiziert und systematisch ausgesondert werden.

Die technologisch und wirtschaftlich optimale Werkzeugauswahl bei der Werkzeugeinsatzplanung stützt sich primär auf den Prozessdatenrückfluss aus dem Werkzeugeinsatz. Anforderung seitens der Werkzeugeinsatzplanung ist daher die Verknüpfung der Werkzeugeinsatzdaten der Individuen und Aggregation dieser auf Werkzeugtypebene. Durch eine Verfolgung der Reststandparameter (Weg, Zeit etc.) sollen Werkzeuge in der Werkzeugvorbereitung so ausgewählt werden, dass die zur Verfügung stehende Reststandzeit möglichst genau der benötigten Reststandzeit entspricht oder diese leicht unterschreitet, um Transportwege und -zeiten sowie den Einsatz von Schwesterwerkzeugen zu reduzieren.

Weiterhin soll auf Basis der erfassten Daten die Bestellstrategie optimiert werden, was eine Bestandsreduktion ermöglicht, da durch die Track&Trace-Funktionalität des SmartTool sämtliche Lager- und Umlaufbestände auf Individuumsebene erfasst werden, welche unter Berücksichtigung der verfügbaren Reststandzeit bei der Auslösung von Bestellungen beachtet werden.

---

Auf die intralogistischen Prozesse bezogen sollen die Transportrouten und Lagerorte zur Reduktion der Werkzeuglogistikkosten optimiert werden. Durch die systemseitige Unterstützung können Werkzeuge dorthin transportiert werden, wo sie als nächstes benötigt werden. Auf diese Weise werden Transportrouten optimiert und Transportzeiten reduziert. Eine Analyse historischer und aktueller Daten bezüglich der Einsatzorte ermöglicht eine optimierte Lagerortzuordnung.

### **Vernetzung der beteiligten Systeme**

Zur Realisierung durchgängiger Informationsflüsse sollen alle beteiligten Systeme vernetzt werden. Eine Informationsarchitektur soll geschaffen werden, über die alle im Werkzeugkreislauf beteiligten Interaktionspartner wie Werkzeugschrank, Werkzeugeinstell- und -messgerät, Werkzeugmaschine und die Werkzeuge selbst vernetzt sind. Die reibungslose Kommunikation zwischen allen Interaktionspartnern wird angestrebt. Hierfür sind entsprechende Schnittstellen zu entwickeln, Möglichkeiten der Datenfilterung und -analyse zu implementieren sowie Optimierungsalgorithmen und eine anschauliche Datenaufbereitung zur Mitarbeiterunterstützung vorzusehen.

### **Zustandsüberwachung der Werkzeuge**

Um das Problem des fehlenden Wissens über das Verschleißverhalten der Werkzeuge zu beheben, soll eine Zustandsüberwachung der Werkzeuge realisiert werden. Es soll ein Werkzeugsystem entwickelt werden, das die werkstellennahe Erfassung und Übertragung prozessinterner Größen ermöglicht. Mit diesem sollen effiziente Möglichkeiten zur Datenerhebung geschaffen werden. Gerade für die immer stärker aufkommende Überwachung von bedienerlosen Prozessen sind intelligente Werkzeuglösungen notwendig, die eine Zustandsüberwachung zulassen.

Zur Messung von Prozessgrößen werden die Auswahl und konstruktive Anbringung einer geeigneten Telemetrie-Einheit, einer Platine und der aufzubringenden Sensoren thematisiert. Weiterhin ist ein Frequenzband zur fehlerfreien Datenübertragung zu identifizieren.

### **Unterstützung der Beschäftigten**

Die Erhöhung der Informationstransparenz unterstützt auch die Beschäftigten. So können Suchzeiten verringert und die Gefahr der Verwechslung von Werkzeugen vermieden werden. Weiterhin soll das zu entwickelnde System im Problemfall schnelle Unterstützung bieten, um die Überlastung der am Werkzeugkreislauf beteiligten Personen zu verringern. Alle Daten sollen nutzerorientiert aufbereitet und visualisiert werden, um schnelle und richtige Handlungen der Verantwortlichen zu unterstützen.

---

## 4 Konsortium des Verbundprojekts SmartTool

---

Das Projektkonsortium setzt sich aus acht Partnern zusammen. Dies sind auf Forschungsseite das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) und das Fachgebiet Integrierte Elektronische Systeme (IES) der TU Darmstadt, als Anwenderunternehmen die Heidelberger Druckmaschinen AG (HDM) und die Siemens AG sowie die vier Systemlieferanten EINS GmbH, Gühring KG, Haimer GmbH und E. Zoller GmbH. Nachfolgend werden die Schwerpunkte der Partner allgemein sowie im Projekt dargestellt.

### 4.1 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen

Seit vielen Jahren bildet das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) seine Kompetenzen im Werkzeugmanagement aus. So wurden unter anderem ein mathematisches Optimierungsmodell zur Strategieableitung für gesamtkostenminimale Werkzeugwechsel aufgestellt (DFG-Förderkennzeichen: AB 133/51-1) [ABEL10a] und Lösungen entwickelt, um Dienstleistungsprozesse effizienter zu gestalten (BMBF-Förderkennzeichen: 02PG1020) [ABEL07]. Neben dem Werkzeugmanagement ist der Forschungsschwerpunkt der Prozessoptimierung eine wichtige Kernkompetenz des Instituts. Die verschiedenen Methoden werden in Lernfabriken anwendungsnah umgesetzt und geschult.

Der Forschungsschwerpunkt der Werkzeugtechnologie beschäftigt sich mit Ansätzen, um Informationen über den aktuellen Zustand eines Werkzeugs zu erhalten. Untersucht wurden hier beispielsweise sensorintegrierte Werkzeughalter [ABEL08a, ABEL08b, ABEL10b, ABEL11a, ABEL11b], die Applikation piezoresistiver Dehnungsmessstreifen und die Integration von Piez Quarz-Kraftaufnehmern in Werkzeughaltern. Im Bereich Datentransfer wurden echtzeitfähige Schnittstellen und der Einsatz von Telemetrie-Einheiten [GEBE95, GEBE97] getestet.

Im Rahmen des Verbundprojekts arbeitete das PTW unter anderem an der Konzeption des intelligenten Werkzeugkreislaufs. Dies beinhaltete die Definition der Ist- und Soll-Informations- und Materialflüsse im Unternehmen, aus denen Anforderungen an die einzelnen Komponenten des Systems abgeleitet wurden. Zum einen wurde die Implementierung eines Track&Trace-Systems verfolgt. Zum anderen wurden Ansätze zur Bestimmung des aktuellen Zustands identifiziert. Die Lösungen wurden sowohl bei den Anwendern als auch in einer neutralen Versuchsumgebung am PTW umgesetzt.

Weiterhin übernahm das PTW die wirtschaftliche Evaluation des CPS SmartTool auf Basis einer Kostenaufnahme sowie einer simulativen Nutzen-Bewertung. Um eine erfolgreiche Implementie-

---

rung des SmartTool zu gewährleisten, wurde, unter Federführung des PTW, ein mitarbeiterorientierter Implementierungs- und Anwendungsleitfaden entwickelt. Die für die Einführung des SmartTool relevanten Erkenntnisse aller Partner wurden hier integriert.

## **4.2 Fachgebiet Integrierte Elektronische Systeme**

Das Fachgebiet Integrierte Elektronische Systeme (IES) der TU Darmstadt ist in der Forschung auf dem Gebiet des Entwurfs neuartiger analoger und digitaler Schaltungen und Systeme sowie deren prototypischer Anwendung aktiv. Aktuelle Arbeiten umfassen die Konzeption unterschiedlicher ASICs, von 1  $\mu\text{m}$  Silicon-on-Insulator-Technologien mit Spannungen bis 650 V über Hochvolt-ASICs mit digitaler und analoger Signalverarbeitung in 0,35  $\mu\text{m}$  Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)-Technologie bis hin zu Hochgeschwindigkeits-Digitalschaltungen in 65 nm CMOS-Technologie und analogen Hochfrequenz-Schaltungen (HF) bis 3 GHz. Im Bereich der drahtlosen Datenverarbeitung arbeitet das IES an der Systemkonzeptionierung rekonfigurierbarer Transceiver sowie am Einsatz drahtloser Signalübertragung in rauen Umgebungen (z. B. metallische Umgebungen im industriellen Umfeld). Im Bereich des Mittelstandstechnologietransfers ist das IES in der Konzeption von kostengünstigen, aber dennoch präzisen elektronischen Systemen für die Durchflussmessung von Wasserstoff (Elektronik, Sensorik und Signalverarbeitung) aktiv. Das IES verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich des ASIC-Designs, der messtechnischen Charakterisierung und Optimierung von elektronischen Chip-Gehäusen, Leitungen, Diskontinuitäten, Leiterplatten und integrierten Komponenten. In der Messtechnik kann auf zwei Waferprober, einen Stepper, Parametermessplatz sowie 800 l Klimakammervolumen zurückgegriffen werden. Die CAD Entwurfsumgebung basiert auf industriellen Cadence, Synopsys, Mentor Graphics, Keysight und MunEDA Entwurfswerkzeugen auf eigenem Computecoluster. In den vergangenen vier Jahren hat das IES insgesamt zehn ASIC Entwürfe in unterschiedlichsten Technologien erfolgreich durchgeführt.

Der Fokus des IES im Rahmen des Projekts lag auf der Integration der Sensorik zur „Zustandsüberwachung des Werkzeugs“. Dies umfasste die Auswahl und konstruktive Anbringung einer geeigneten Telemetrie-Einheit, einer Platine und von Sensoren sowie die Identifikation eines geeigneten Frequenzbands zur fehlerfreien Datenübertragung. Die mit dem sensorischen Werkzeug erfassten Daten stellten die Basis für weitere Auswertungen dar.

## **4.3 Heidelberger Druckmaschinen AG**

Die Heidelberger Druckmaschinen AG (HDM) stellt Druckmaschinen her und ist der weltweit führende Hersteller von Bogenoffsetmaschinen. Zur Kernkompetenz von HDM gehört die zerspannende Fertigung mit einer hohen Wertschöpfungstiefe sowie Variantenvielfalt. Dies bedeutet,

---

dass das Werkzeugmanagement mit ca. 16.000 verschiedenen Positionen (z. B. Werkzeuge, Werkzeughalter) die Versorgung der Fertigung zu gewährleisten hat. Dazu hat HDM an allen drei Fertigungsstandorten sowohl Werkzeugtechnologien als auch Betriebsmitteltechniker im Einsatz, die den gesamten Werkzeugkreislauf von einer Erstmustererprobung über den Einkauf sowie die Werkzeugbereitstellung und -pflege betreuen. HDM steht mit allen bedeutenden Werkzeuglieferanten in einem ständigen Technologieaustausch.

HDM lieferte als Anwendungspartner den Anforderungsinput für das Forschungsziel des Track&Trace-Systems. Die einzelnen von den Entwicklungspartnern beigesteuerten Komponenten waren in der eigenen Fertigung zu integrieren.

Musterlösungen, z. B. bei der Werkzeugidentifikation, waren auf die Anforderungen des eigenen Betriebs anzupassen. Unter den Randbedingungen eines realen Betriebs mit Firewalls und diversen Zugangsbeschränkungen galt es das Track&Trace-System und ein Tool Management System im eigenen Rechenzentrum aufzubauen. Die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems wurde im Rahmen eines Business Cases berechnet.

#### **4.4 Siemens AG**

Die Siemens AG ist ein globaler Technologiekonzern mit Standorten in über 190 verschiedenen Ländern und zählt weltweit zu den größten Unternehmen im Bereich Elektrotechnik. Die Geschäfte von Siemens sind in neun Divisionen aufgeteilt: Power and Gas, Wind Power and Renewables, Power Generation Services, Energy Management, Building Technology, Mobility, Digital Factory, Process Industries and Drives und Financial Services. Elektrifizierung, Automatisierung und Digitalisierung sind die Wachstumsfelder für Siemens.

Der Standort Mülheim gehört zur Division Power and Gas. Von der Forschung und Entwicklung über die Produktion bis hin zur Inbetriebnahme und dem Service werden die Dampfturbine und der Generator von Mülheim aus gesteuert. Die Entwicklungs- und Konstruktionsaktivitäten im Zusammenhang mit der Gasturbine werden ebenfalls in Mülheim durchgeführt. Da die Dampfturbinen den individuellen Anforderungen der Kunden angepasst werden, handelt es sich um eine Einzelteilfertigung.

Die Siemens AG trat innerhalb des Verbundprojekts als Anwender auf und konzentrierte sich unter anderem auf die nötigen Vorarbeiten, um ein CPS SmartTool nutzen zu können. Dies beinhaltete zum einen die Anforderungsdefinition, die physikalische Einrichtung der notwendigen Komponenten für einen vernetzten Werkzeugkreislauf sowie die Bereitstellung von Software-schnittstellen und die Anpassung von Werkzeugdatensätzen.

---

## 4.5 EINS GmbH

Das Hauptbetätigungsfeld der EINS GmbH ist die Konzeption, Realisierung und der Betrieb browserbasierter Softwarelösungen mit Datenbank-Anbindungen im Bereich Internet/Intranet.

Für das CPS SmartTool wurde zunächst eine serviceorientierte Referenzarchitektur für verteilte CPS-Anwendungen am Beispiel des Werkzeugkreislaufs erarbeitet. Ein wesentlicher Arbeitspunkt hierbei war die Konzeption einer einheitlichen, herstellerunabhängigen Kommunikationseinheit (Embedded System) auf Basis eines verbreiteten Betriebssystems mit einer standardisierten Webschnittstelle zwischen den Interaktionspartnern des Werkzeugkreislaufs und dem intelligenten Werkzeugsystem für mehrere Aufgabenstellungen. Diese Architektur wurde dann in Form eines Android-basierten Einplatinenrechners als herstellerunabhängige Kommunikationseinheit zwischen dem intelligenten, sensorbasierten Werkzeug-/Werkzeughaltersystem und den Interaktionspartnern des Werkzeugkreislaufs umgesetzt. Für den vernetzten Werkzeugkreislauf wurde, basierend auf existierenden Normen, eine Track&Trace-Lösung entwickelt.

Ein weiterer Arbeitspunkt war die Integration des herstellerunabhängigen Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikationsprotokolls Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) für die Erfassung (Messdaten) und das Schreiben von Daten (Werkzeugvermessungsdaten) aus einer bzw. in eine Werkzeugmaschinen (WZM)-Steuerung. Zudem unterstützte die EINS GmbH bei der Erfassung von Daten des sensorischen Werkzeughalters (Beschleunigungswerte).

## 4.6 Gühring KG

Die Gühring KG ist ein Anbieter von Werkzeugen für die rotierende Zerspanung mit definierter Schneide wie Bohr-, Fräs-, Reib- und Gewindewerkzeuge, für deren Entwicklung eigene Forschungs- und Entwicklungszentren zur Verfügung stehen. CAD-unterstütztes Konstruieren, Finite-Elemente-Analyse und Simulation der Schmier-Kühlmittelströmung unterstützen die Werkzeugentwicklung. Neben der Werkzeugentwicklung und -herstellung gehört die Dienstleistung Tool Management, die beim Kunden vor Ort von der reinen Werkzeugversorgung bis hin zur Unterstützung des vollständigen Werkzeugwesens reicht, zu den Kernkompetenzen des Unternehmens.

Basierend auf der Auswertung geeigneter Tool Management-Projekte trug Gühring zur Identifikation der relevanten Parameter und deren Zusammenhänge im Werkzeugkreislauf bei, die eine Auswahl von Referenzwerkzeugen ermöglichte, welche die höchste Relevanz im betrachteten Fertigungsprozess aufweisen. Zusätzlich wurden anhand von Projekten, die in Zusammenhang mit dem Gühring Tool Management System stehen, ermittelt, an welchen Stellen der Prozesskette eine Datenerfassung und -übertragung erfolgt bzw. sinnvoll ist.



---

Gühring hat in diversen Versuchsreihen geeignete Laserparameter für die Beschriftung von Hartmetall und HSS-Werkzeugen mit Datamatrix Codes detektiert. Es wurde untersucht, inwiefern die Lesbarkeit der Laserbeschriftung von deren Positionierung, dem Werkzeugdurchmesser, dem Schneidstoff und Einflüssen wie Verschmutzung, Abnutzung und Oberflächenbeschaffenheit abhängig ist. Hierzu wurden neben internen Standwegversuchen auch Versuche bei Kunden unter industriellen Einsatzbedingungen durchgeführt.

Um einen konsistenten Datenaustausch zwischen dem SmartToolCenter (STC) und dem Gühring Tool Management System (GTMS) zu gewährleisten, wurden die im Rahmen des Projekts SmartTool entwickelten Softwaremodule in das GTMS integriert. Die Softwaremodule wurden gemeinsam mit der EINS GmbH entsprechend dem Bedarf bzw. Input angepasst, so dass die gewünschten Daten zwischen dem SmartTool und dem GTMS ausgetauscht werden können.

#### **4.7 HAIMER GmbH**

HAIMER ist ein familiengeführtes, mittelständisches Unternehmen und entwickelt, fertigt sowie vertreibt innovative, hochpräzise Produkte für die Metallzerspanung, u. a. für die Branchen Automobil, Luft- und Raumfahrt, Energie, Schienenverkehr und Allgemeiner Maschinenbau.

Zum Produktprogramm zählen neben verschiedensten Werkzeughaltern in allen gängigen Schnittstellen, Spannverfahren und Längen, Schneidwerkzeugen aus Vollhartmetall, Maschinen im Bereich der Schrumpf- und Auswuchttechnik sowie 3D-Messgeräten und neuerdings auch Werkzeugvoreinstellgeräte.

Von den 600 Beschäftigten weltweit arbeiten ca. 400 am Fertigungsstandort in Igenhausen mit modernstem Maschinenpark und sehr hohem Automatisierungsgrad bei großer Fertigungstiefe. Als europäischer Marktführer im Bereich Werkzeugspanntechnik mit einer täglichen Kapazität von ca. 2.000 Werkzeugaufnahmen ist HAIMER der technologische Vorsprung der eigenen Produkte sehr wichtig. Deshalb investiert HAIMER jährlich zwischen 8 und 10 % seines Umsatzes in Forschung und Entwicklung.

Das Hauptgewicht im Projekt SmartTool lag bei HAIMER dementsprechend bei den Werkzeugspannfuttern, die im Projekt zur Anwendung kamen. Insbesondere die Ausstattung der Werkzeugspannfutter mit Datenträgern zur Identifizierbarkeit und Nachverfolgung („Track&Trace“) und mit Sensorik zum Übermitteln von Signalen während der laufenden Zerspanung bildeten die zentralen Betätigungsfelder von HAIMER.

---

#### **4.8 E. Zoller GmbH & Co. KG**

Zoller stellt Mess- und Einstellgeräte für das Einstellen, Messen, Prüfen und Verwalten von Zerspanungswerkzeugen sowie die dazugehörige Tool Management Software her. Das Einstellen und Vermessen von Werkzeugen auf externen Messgeräten nimmt eine zentrale Stellung im Werkzeugkreislauf ein. Somit bieten die Mess- und Einstellgeräte zusammen mit den integrierten Informations- und Verwaltungssystemen das Potential, einen erheblichen Anteil zu Datentransparenz und -konsistenz sowie bei der Weitergabe von Expertenwissen über alle Prozessbeteiligten hinweg innerhalb der Fertigung sowie der Arbeitsvorbereitung beizutragen.

Zollers Fokus im Rahmen des Projekts war die Schaffung von Schnittstellen, um eine Verwaltung der Werkzeuge auf Individuumsebene zu ermöglichen. Im Zuge dessen wurde ein Montageassistent entwickelt, über den die virtuelle Montage erfolgt. Zudem wurde das Einstellgerät hardware- und softwaretechnisch erweitert, um als intelligenter Interaktionspartner im Werkzeugkreislauf fungieren zu können. Die Entwicklungen wurden in den aufgebauten Pilotbereichen erfolgreich getestet.

---

## 5 Vorgehen

---

In der Analysephase wurden die Voraussetzungen für die Etablierung eines vernetzten Werkzeugkreislaufs ermittelt. Dazu wurden die Werkzeugversorgung und die Werkzeugtechnologie bei den Anwenderunternehmen analysiert. Dies beinhaltete unter anderem die Aufnahme und anschließende Visualisierung der Prozessabläufe in Vorgangskettendiagrammen. Die in den Untersuchungen identifizierten Anforderungen der Anwenderunternehmen an das CPS SmartTool wurden in einem Lastenheft festgehalten. Darauf aufbauend wurden die notwendigen Funktionsbausteine des SmartTool definiert. Während dieser Konzeptentwicklung wurde zudem eine Referenzarchitektur der benötigten Hardware festgelegt, die alle Interaktionspartner berücksichtigt und einen vernetzten Werkzeugkreislauf realisiert. Anschließend wurden die einzelnen Bausteine detailliert ausgearbeitet. Dies beinhaltete unter anderem

- die Entwicklung eines intelligenten Werkzeugsystems bestehend aus Sensorik zur Messwerterfassung und einem mikroelektronischen System zur Datenverarbeitung sowie -übertragung unter Berücksichtigung der Werkzeugrandbedingungen (Werkzeugtyp, Werkzeugkosten, Werkzeugeinsatzbedingungen etc.),
- die Entwicklung eines standardisierten Embedded System mit einer modularen Informationsarchitektur als Schnittstelle zur Verbindung der realen mit der digitalen Produktionswelt und
- die Entwicklung eines Track&Trace-Systems auf Produktionsplanungs- und Steuerungsebene zur Realisierung einer Selbstoptimierung auf Basis der erzeugten Tracing-Daten im Bereich Werkzeuglogistik und Werkzeugbeschaffung.

Anhand mehrerer Demonstratoren in Pilotbereichen der Anwenderunternehmen und am PTW konnte die Leistungsfähigkeit eines vernetzten Werkzeugkreislaufs in der Praxis überprüft werden. Zudem wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, das die erschließbaren Potentiale des Werkzeugkreislaufs quantifiziert. Auf Basis der Simulationsergebnisse erfolgte eine Kosten-Nutzen-Bewertung des CPS SmartTool. Um eine Umsetzung im Unternehmen zu gewährleisten, wurde zudem ein Anwendungsleitfaden mit Einführungsstrategien und einem Konzept für die Kompetenzentwicklung erstellt.

Parallel hierzu wurden in Zusammenarbeit mit den Verbundprojekten „BAZMod“ und „tool:cloud“ Systemstandards abgestimmt, insbesondere für die Datenmodelle, Kommunikationsstrukturen oder Speichermedien für die Werkzeuge.

Die im Projekt bearbeiteten Arbeitspakete sind (dem Rahmenplan entsprechend) in der folgenden Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Arbeitspakete im Projekt SmartTool

AP Nr.	Arbeitspakete
A	Identifikation der Herausforderungen
B	Spezifikation des CPS SmartTool
C	Entwicklung der Referenzarchitektur
D	Standardisierung
E	Entwicklung der Hardware
F	Entwicklung der Software
G	Aufbau der Demonstratoren
H	Verifikation in den Pilotbereichen & Simulation
I	Kosten-Nutzen-Bewertung
J	Erstellung eines Anwendungsleitfadens
K	Projektmanagement & Ergebnistransfer

Das Vorgehen zur Identifikation der Herausforderungen (AP A) wird im folgenden Kapitel dargestellt. In Kapitel 7 wird die auf dieser Basis definierte Struktur des SmartTool und seiner Umgebung (AP B bis F) näher erläutert. Eine Kosten-Nutzen-Bewertung des Gesamtkonzepts wird in Kapitel 8 (AP I) vorgenommen. Der Anwendungsleitfaden ist aufgrund seines Umfangs nicht Bestandteil dieses Berichts, kann aber unter auf Nachfrage gerne zur Verfügung gestellt werden.

---

## 6 Ist-Analyse

---

Um die Herausforderungen im Werkzeugmanagement zu identifizieren, wurde eine Ist-Analyse durchgeführt. Dies umfasst das Analysieren der Werkzeugdaten sowie die Analyse der Prozesse des Werkzeugkreislaufs bei den Anwenderunternehmen.

### 6.1 Analyse der Werkzeugdaten

Die Schaffung der Transparenz über den gesamten Werkzeugkreislauf baut auf der Erfassung von Daten sowie der Verknüpfung zu interpretierbaren Informationen auf. Eine umfassende Klassifikation der bisherigen werkzeugbezogenen Daten findet sich in [MUMM98]. Nach der dort entwickelten Informationssystematik unterscheiden sich Werkzeugdaten primär in Prozess- und in Verwaltungsdaten (siehe Abbildung 3).

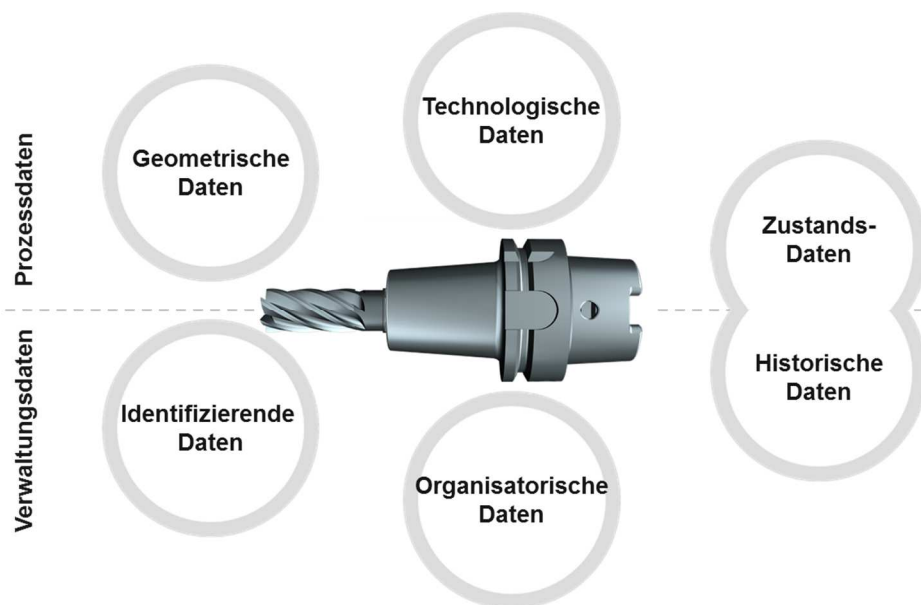


Abbildung 3: Klassifizierung der Werkzeugdaten in Anlehnung an [MUMM98]

Prozessdaten umfassen nach [MUMM98]:

- Geometrische Daten, welche primär die Geometrie der Werkzeugschneide aber auch die des Schneidkörpers sowie des Werkzeugspannfutters beschreiben.
- Technologische Daten, die zum einen Vorgabe für die relativen Wirkbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück sind, aber auch Informationen bzgl. der Eignung von Werkstoff-Schneidstoff-Paarungen oder über den Kühl-/Schmierstoffeinsatz bereitstellen.

Verwaltungsdaten dienen hauptsächlich einem reibungslosen Werkzeugfluss und stellen daher dispositive Informationen bereit. Nach MUMM umfassen Verwaltungsdaten:

- Identifizierende Daten zur eindeutigen Zuordnung von Werkzeugdaten zu physischen Werkzeugindividuen
- Organisatorische Daten, die Informationen bzgl. des Bestands, der Bereitstellung sowie der Disposition der Werkzeuge beinhalten.

Zustandsdaten wie auch Historische Daten lassen sich nicht eindeutig einer der zuvor eingeführten Klassen zuordnen. Während Zustandsgrößen hauptsächlich Standbemessungsgrößen im Hinblick auf definierte Standkriterien [DIN81] beinhalten, werden unter Historischen Daten die Einsatzbedingungen der Werkzeuge über deren Lebenslauf dokumentiert.

Erweiternd können Werkzeugdaten bezüglich ihrer zeitlichen Gültig- und Beständigkeit in statische, quasi-statische und dynamische Daten differenziert werden. Daneben wird zudem die Klasse der Tracking-Daten aufgeführt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Einteilung der Werkzeugdaten bezüglich ihrer zeitlichen Gültig- und Beständigkeit

Daten	Beschreibung
<b>Statische Daten</b>	Statische Daten können u. a. den Sachmerkmaleisten nach DIN 4000 entstammen und sind über den gesamten Werkzeuglebenszyklus zeitinvariant (in der Literatur auch als Stammdaten bezeichnet).
<b>Quasi-statische Daten</b>	Quasi-statische Daten sind statische Daten, die jedoch nur über einen begrenzten Zeitraum, i. d. R. über die Dauer eines Werkzeugeinsatzes, konstant bleiben.
<b>Dynamische Daten</b>	Dynamische Daten verstehen sich als Daten, die sich insbesondere während des Werkzeugeinsatzes über die Zeit verändern.
<b>Tracking-Daten</b>	Tracking-Daten fassen hier alle Daten zusammen, die eine räumliche und zeitliche Auflösung der physischen Werkzeuge in der Produktion ermöglichen

Für alle Datentypen werden im Konsortium die für das SmartTool relevanten Daten bestimmt. Diese sind nachfolgend tabellarisch (siehe Tabelle 3) dargestellt, wobei die Einteilung gemäß der Klassifikation nach [MUMM98] in der Spalte „Allgemein“ vorgenommen wird, und die Einteilung gemäß der zeitlichen Gültigkeit in der rechten Spalte. S steht hierbei für statisch, QS für quasi-statisch, D für dynamisch und T für Tracking.

Tabelle 3: Relevante Daten

Datensatz	Klassifikation	
	Allgemein	Zeitl.
Zuordnung Komponenten-Individuen zu Gesamtwerkzeugtyp	techn.	S
Werkzeugkomponenten-ID	ident.	S
Gesamtwerkzeug (GWZ)-ID	ident.	S
Effektive Zähnezahl des GWZ-Individuums	techn.	S
Bearbeitungsstrategie des GWZ-Individuums	techn.	S
Bauteilwerkstoff	techn.	S
Anzahl der maximal möglichen Nachschliffe	techn.	S
Naschschliffanleitung	techn.	S
Prüfmerkmale/Messprotokoll/Messablauf	org.	S
Werkzeugkomponentenliste/ Werkzeugplan	org.	S
Verknüpfung GWZ-ID mit Werkzeugkomponenten-IDs	hist.	QS
Verknüpfung GWZ-ID mit Fertigungsauftrag und/oder WZM	hist.	QS
Maschinenspezifische Daten für GWZ-Individuum	geom.	QS
Maschinenspezifische Daten für Werkzeugsatz	geom.	QS
Ursache des Werkzeugwechsels	zust.	QS
Werkzeugkorrekturwerte	geom.	QS
Anzahl der Einsätze der WZ-Komponenten-Individuen des GWZ-Individuums	zust.	QS
Einsatzzeit des GWZs	zust.	QS
Einsatzweg des GWZs	zust.	QS

<b>Anzahl hergestellter Werkstücke mit GWZ-Individuum</b>	zust.	QS
<b>Aufgewendete Zerspanungsenergie mit GWZ-Individuum</b>	zust.	QS
<b>Zerspantes Volumen mit GWZ-Individuum</b>	zust.	QS
<b>Ist-Standweg der GWZ-Individuen bzw. des/der Schneidteile</b>	zust.	QS
<b>Ursache des Werkzeugversagens</b>	hist.	QS
<b>Anzahl der aktuellen Nachschliffe bei Nachschleifindividuen</b>	hist.	QS
<b>Bildaufnahme Verschleißzustand</b>	zust.	QS
<b>Prüf-/Messdaten</b>	geom./zust.	QS
<b>Kommissionierauftrag</b>	org.	QS
<b>Temperatur des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Schwingungen des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Drehmoment des GWZ-Individuums (per Spindelstrom)</b>	hist.	D
<b>Biegung des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Kühlmitteldruck im GWZ-Individuum</b>	hist.	D
<b>Drehzahl des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Vorschub des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Schnittgeschwindigkeit des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Eingriffstiefe des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Eingriffsbreite des GWZ-Individuums</b>	hist.	D
<b>Auskraglänge der Achsen</b>	hist.	D
<b>Leistungsaufnahme Spindel</b>	hist.	D
<b>Leistungsaufnahme Achsen</b>	hist.	D



Lagerort	org.	T
Transportziel	org.	T
GWZ in Werkzeugmaschine	org.	T
Werkzeugumlaufbestand	org.	T

Vor dem Hintergrund der Auswertung aufgenommener Daten durch Werkzeugtechnologien zur Ableitung von Aussagen bzgl. der zu erreichenden Standzeiten der Komponenten unter bestimmten Voraussetzungen wurde im Konsortium eine Auswahl an Daten getroffen, die es im Rahmen des Projekts über eine geeignete Systemarchitektur zu erfassen sowie bereitzustellen gilt. Der jeweils angegebene Rang leitet sich hier aus der Häufigkeit der Nennungen bei einer Befragung im Rahmen des Konsortiums ab.

- Rang 1: Vorschub (Ist), Spindelstrom (Ist)
- Rang 2: Schnittgeschwindigkeit (Ist), Schwingungen des auskragenden Werkzeugs, NC-Programm
- Rang 3: Werkstückwerkstoff, Maschinenummer, Komponentenstruktur des GWZs, Einstellparameter
- Rang 4: Anzahl der bisherigen Aufbereitungen, WZ-Korrektur-Speicher mit aktueller WZ-Einsatzzeit
- Rang 5: Bauteilbezeichnung, Bearbeitungsart, Schneidstoff, Temperatur, Schnittbreite  $a_e$  (Ist), Zustellung  $a_p$ , Kühlschmierstrategie, Kühlmitteldurchfluss, Zähnezahl, Radialkräfte, Umfang der WZ-Aufbereitung, Auftrag

## 6.2 Analyse der Prozesse des Werkzeugkreislaufs

Die Prozesse des Werkzeugkreislaufs mit dem Fokus auf die Identifikation der Orte der Datenentstehung wurden analysiert und in Vorgangskettendiagrammen abgebildet. Abbildung 4 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt des Vorgangskettendiagramms für die Werkzeugeinsatzplanung. Die für die „Funktion“ notwendigen Daten werden in der entsprechenden Spalte eingetragen.

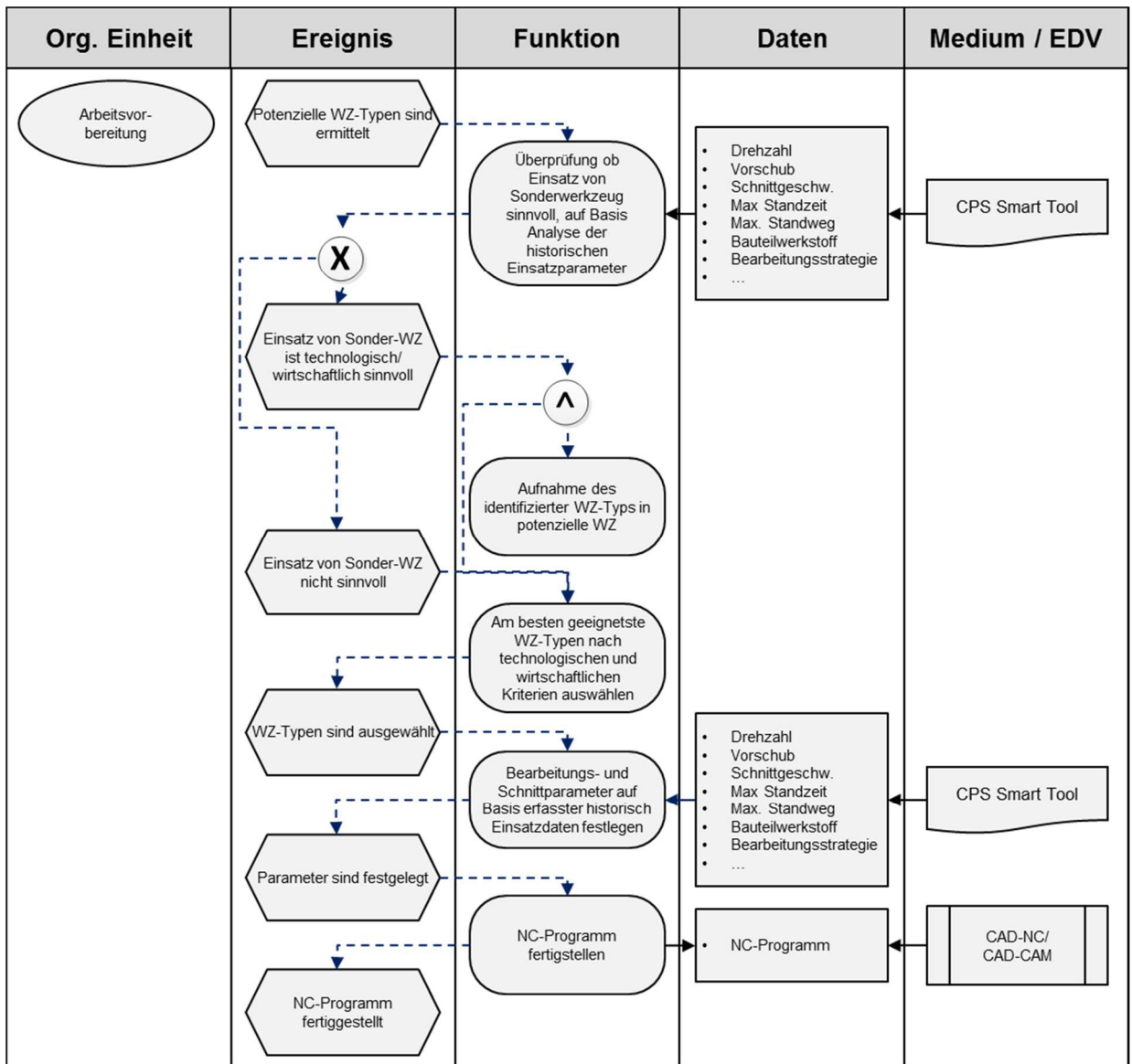


Abbildung 4. Ausschnitt Vorgangskettendiagramm Werkzeugeinsatzplanung

Über die Spalte Medium werden den Daten zum einen die bisher verwendeten Systeme zugeordnet. Zum anderen wird das SmartTool durch die Zuordnung zu den Daten spezifiziert. Auf Basis der Vorgangskettendiagramme wurden die Anforderungen an das CPS SmartTool konkretisiert und in einem Lastenheft festgehalten.

## 7 Soll-Definition

Auf Basis der Vorgangskettendiagramme der Ist-Analyse wurden Soll-Prozesse definiert. Im Hinblick auf ein skalierbares Gesamtsystem SmartTool wurde ein modularer Aufbau des Funktionspektrums des intelligenten Werkzeugsystems verfolgt. Das System wird aus fünf elementaren Funktionsbausteinen zusammengesetzt (siehe Abbildung 5), die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

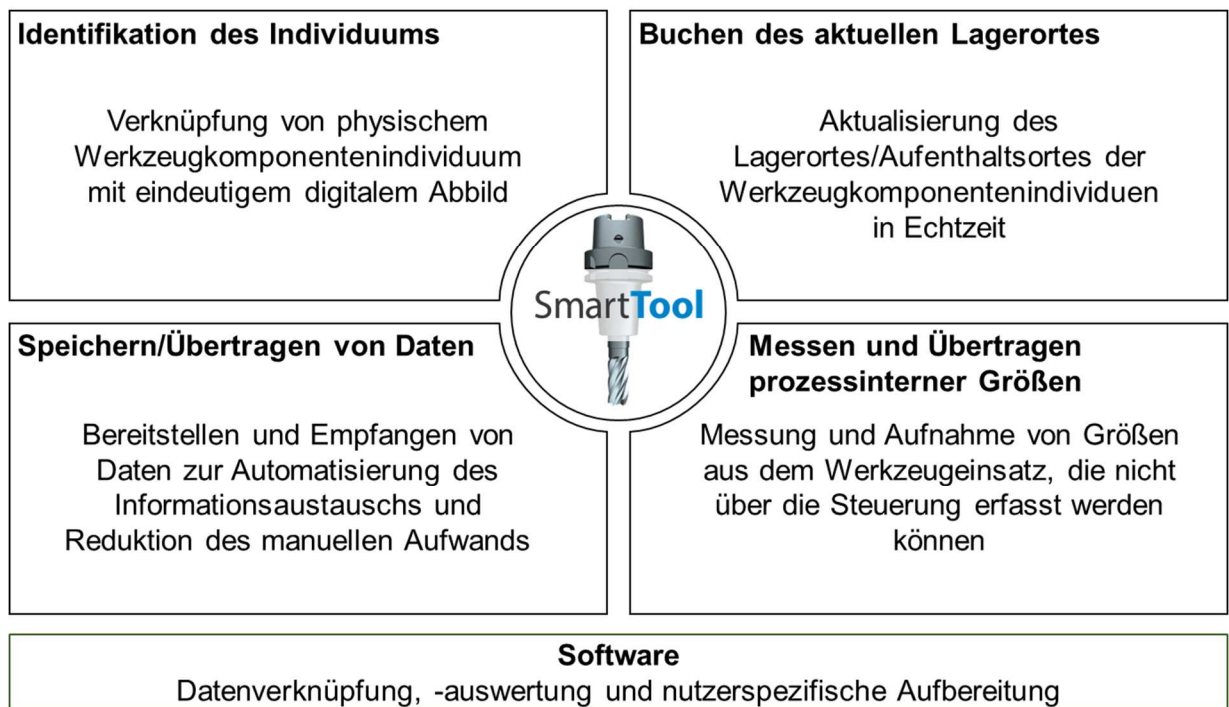


Abbildung 5: Elementare Funktionsbausteine des SmartTool

Während der Konzeptionierung und der Umsetzung wurde stets darauf geachtet, geltende Standards wie DIN-Normen und Richtlinien zu berücksichtigen und einzuhalten (z. B. DIN 4000 Sachmerkmalisten für Werkzeuge zur Beschreibung von Werkzeugdaten, ISM (Industrial, Scientific and Medical Band)-Frequenzen und ihre Einsatzvoraussetzungen zur drahtlosen Datenübertragung), da die Entwicklung einer Insellösung explizit vermieden werden sollte.

### 7.1 Identifikation des Individuums

Die Identifikation mit der zugehörigen Verwaltung des Individuums (auch als Exemplarverwaltung bezeichnet) stellt innerhalb eines Track&Trace-Systems den elementarsten Funktionsbaustein dar. Sie geht jeder weiteren Funktion im Rahmen der Interaktion des intelligenten Werkzeugsystems mit den intelligenten Interaktionspartnern voraus. Im Projekt wurden die Einzelkomponenten Werkzeug und Werkzeugspannfutter/Werkzeugaufnahme betrachtet. Im Folgenden werden allgemein die Anforderungen an die Kennzeichnung beschrieben. In der industriellen

---

Praxis sind verschiedene Kennzeichnungsarten bekannt. Die optische Identifikation und die Identifikation über RFID sind für den vorliegenden Anwendungsfall am besten geeignet und werden daher näher betrachtet.

### 7.1.1 Anforderungen an die Kennzeichnung

Um eine geeignete Kennzeichnung zu finden, werden die Anforderungen nach Aufbau der Identität (ID), Maschinenlesbarkeit der Kennzeichnung und Reduktion des manuellen Aufwands gegliedert.

#### Aufbau der ID

Die Kennzeichnung sollte so aufgebaut sein, dass die Werkzeugkomponenten bzw. Gesamtwerkzeuge eindeutig, je nach Anwendungskontext auch über Unternehmensgrenzen hinweg, identifiziert werden können. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- Wenn der Werkzeughersteller die ID aufbringt, sollte sichergestellt werden, dass sich die Nummernkreise verschiedener Hersteller nicht überschneiden.
- Kennzeichnungen von Werkzeugherstellern sollten genutzt werden, um den eigenen Aufwand zu reduzieren.
- Eine Orientierung an bestehenden Normen und Richtlinien zur Gewährleistung einer breiten Akzeptanz sollte erfolgen.

Zur Gewährleistung einer eindeutigen Identifikation über Unternehmensgrenzen hinweg, wurden in den letzten Jahren einige ISO/IEC-Standards entwickelt, die auch im Bereich der Intralogistik angewendet werden können.

- ISO/IEC 15459 [ISO14]: Erzeugung einer eindeutigen, weltweit unverwechselbaren Markierung für jedes Objekt (Werkzeug/Werkzeugspannfutter)
- ISO/IEC 15434 [ISO06]: Vorschrift zur Kodierung mehrerer Inhalte in einem Data-Matrix-Code/RFID-Tag
- ISO/IEC 15418 [ISO16]: Vorschrift zur generellen Kodierung von Inhalten (Semantik) in einem Data-Matrix-Code/RFID-Tag

Die **ISO/IEC 15459** [ISO14] spezifiziert eine eindeutige Zeichenkette zur Identifikation individueller Transporteinheiten. Die Zeichenkette soll über Medien zur automatischen Identifikation und Datenerfassung am Objekt angebracht werden.

Die ISO/IEC 15434 [ISO06] beinhaltet eindeutige Regeln, wie die Daten von einem Lesegerät in die Anwendungssoftware übertragen werden sollen. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

Um mehrere Datenformate gleichzeitig zu unterstützen, wird eine zweistufige Hierarchie angewendet: Die äußere Struktur ist der sogenannte Message Envelope, der den Beginn und das Ende einer Nachricht definiert. Er besteht aus dem Message Header und dem Message Trailer. Innerhalb dieses Rahmens gibt es einen oder mehrere Format Envelopes, die die eigentlichen Nutzdaten enthalten (siehe Abbildung 6).

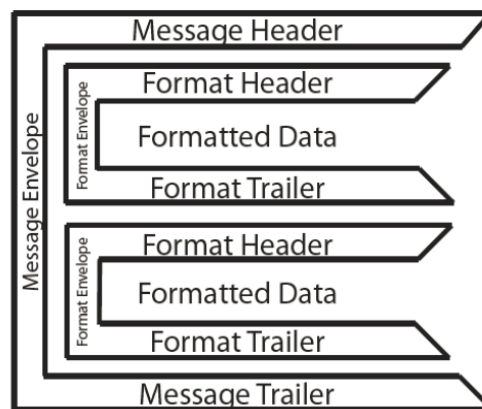


Abbildung 6: Genereller Aufbau einer Message [ISO06]

In der ISO/IEC 15418 [ISO16] werden zwei Gruppen von Datenbezeichnern definiert, mit denen eine eindeutige Identifizierung möglich ist. Dies ist zum einen der „GS1 Application Identifier“ (AI), der vorwiegend in der Konsumgüterindustrie Anwendung findet. Dieser wird gegen Lizenzgebühren vom Unternehmen GS1 an die Hersteller vergeben. In vielen Branchen wie Elektronik, Automobil und Stahl ist hingegen der „ASC MH 10 Data Identifier“ (DI) verbreitet, der vom American National Standards Institute (ANSI) verwaltet wird. Trotz der Konkurrenz dieser beiden Codierungen sind sie oftmals zueinander kompatibel und können in der Regel mithilfe von Übersetzungstabellen (siehe Tabelle 4) ineinander überführt werden. So wird beispielsweise die Teilenummer im Code nach ANSI mit „P“, in der GS1-Codierung mit „241“ eingeführt.

Tabelle 4: Beispiele für die Codierung von Inhalten in MH10 DI im Vergleich zu GS1 AI [ISO16]

Bedeutung	ANSI MH10 DI	GS1 AI
Vom Kunden vergebene Teilenummer	P	241
Vom Lieferanten vergebene Teilenummer	1P	01
Vom Lieferanten vergebene Seriennummer	S	21

Im Projekt SmartTool werden die ANSI MH10 DI verwendet, da diese kostenfrei verfügbar sind. Das generelle Konzept ist aber auch mit den GS1 AI einsetzbar. Bei der Verwendung von AI muss im Message-Header  $[\ ]>^R_s 06 G_s$  durch  $[\ ]>^R_s 05 G_s$  und die verwendeten DI durch die entsprechenden AI ersetzt werden.

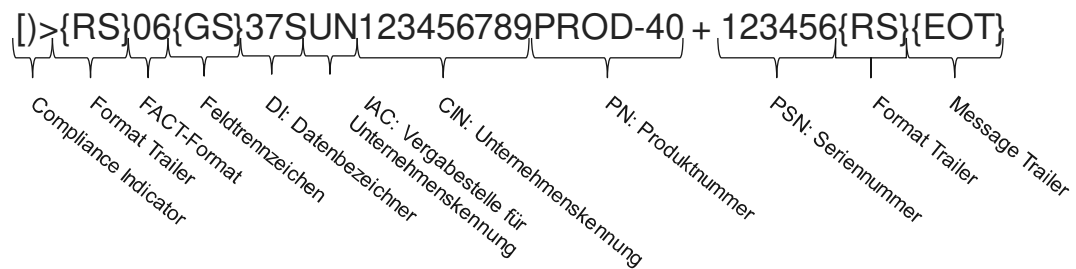


Abbildung 7: Aufbau eines Codes nach ASC MH 10 (37S) (Programm BarCode-Generator)

Je nach Bedarf können verschiedene Segmente, zum Beispiel Produktnummer und Seriennummer, in den Code integriert werden. Die ersten Zeichen einschließlich des {GS} zeigen den Beginn einer Codierung und das Format an. Sie sind bei den im Projekt verwendeten Codierungen identisch, ebenso wie die letzten Zeichen {RS}{EOT}, die das Ende der Codierung anzeigen.

Der vorangestellte DI (im Beispiel in Abbildung 7 die „37S“) zeigt die zu erwartenden Bestandteile an. Dem DI „37S“ folgen die Segmente Vergabestelle, Unternehmenskennung, Artikelnummer und Seriennummer. Die Vergabestelle „UN“ steht für Dun & Bradstreet. Diese vergeben eindeutige Unternehmenskennungen, die sogenannte D&B DUNS Number, die von jedem Unternehmen kostenfrei auf der Homepage der Organisation beantragt werden kann [DUN17].

Soll zusätzlich die Chargennummer integriert werden, eignet sich beispielsweise eine Kombination verschiedener DIs, die durch Feldtrennzeichen ({GS}) getrennt werden. Im Beispiel in Abbildung 8 sind der DI „25P“, dem die Segmente Vergabestelle, Unternehmenskennung und Produktnummer folgen, der DI „1T“, der das Folgen einer Chargennummer anzeigt, sowie der DI „S“, dem die Seriennummer folgt, ausgewählt.

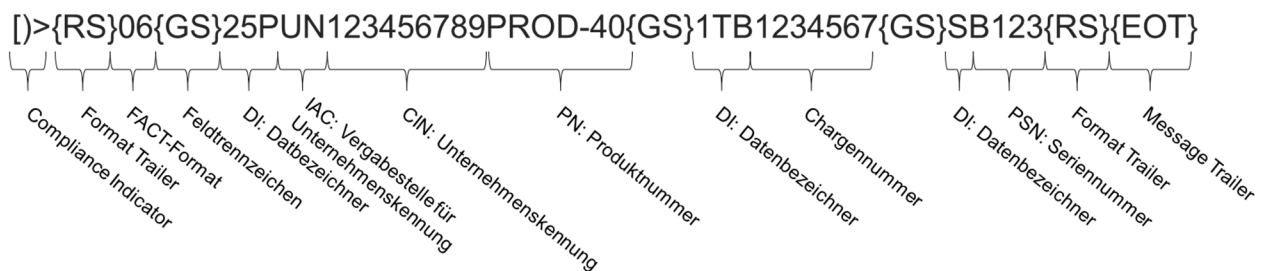


Abbildung 8: Aufbau eines Codes nach ASC MH 10 (25P+1T+S) (Programm BarCode-Generator)

---

## **Zuverlässige Lesbarkeit**

Die eindeutige Kennzeichnung ist in maschinenlesbarer Form auf der Komponente aufzubringen. Die Art der Kodierung und die damit verbundene Größe der Markierung sind dabei (insbesondere bei optischen Kennzeichnungen) von entscheidender Bedeutung. Anforderungen, die hier zu erfüllen sind, lauten:

- Die Lesbarkeit muss bei verschiedenen Materialien und Oberflächen sichergestellt sein.
- Eine (standardisierte) Kennzeichnung muss unabhängig von der Größe der Komponenten maschinenlesbar aufgebracht werden können.

Um eine langfristige Lesbarkeit zu gewährleisten, müssen die Kennzeichnungen gegenüber den Einflüssen aus der Umgebung der Fertigung beständig sein. Insbesondere sind dies physische, thermische und chemische Einflüsse folgender Prozesse:

- Hitzeeintrag, z. B. beim Einschrumpfen des Werkzeugs
- Werkzeugeinsatz mit Kühlschmierstoff, Minimalmengenschmierung oder „trocken“
- Rückstände von verdunstetem Kühlschmierstoff
- Waschen der Gesamtwerkzeuge
- Be-/Entschichten bei der Aufbereitung von Werkzeugen
- Späneflug während der Bearbeitung
- Zerkratzen bei der Montage

## **Reduktion des manuellen Aufwands**

Eine der definierten Hauptanforderungen an den Identifikationsprozess ist die Reduktion des manuellen Aufwands. Der in Verbindung mit dem Identifikationsprozess stehende Zusatzaufwand durch Lesevorgänge etc. soll den Aufwand, der durch die Identifikation eingespart wird, nicht übersteigen. Die Anforderungen an den Prozess der Identifikation lassen sich daher wie folgt formulieren:

- Die Zuverlässigkeit der Erfassung muss gegenüber mangelnder Disziplin der Beschäftigten robust sein, d. h. zusätzliche Schritte zur Identifikation der Werkzeuge sind so tief in den Prozess zu integrieren, dass diese möglichst einfach und robust erfolgen können.
- Bei manuellen Aufwänden muss den Beschäftigten eine Rückmeldung über die erfolgreiche Durchführung der Identifikation/Buchung gegeben werden.
- Der Erfassungsbereich der Erfassungsvorrichtungen sollte mehrere zu identifizierende Objekte parallel erfassen können.

---

## 7.1.2 Optische Identifikation

Zur Kennzeichnung der Individuen empfiehlt sich die Aufbringung einer optischen Codierung. Die optischen Identifikationssysteme lassen sich in schriftbasierte und symbolbasierte Systeme unterscheiden. Die Klarschriftlesung gehört zu den schriftbasierten Systemen. Hier wird die Codierung in numerischer oder alphanumerischer Form aufgebracht. Im Rahmen der symbolbasierten Systeme wird zwischen 1D-, 2D-, 3D- und 4D-Codes unterschieden. 1D-Codes (Barcodes) sind in der Konsumgüterindustrie weit verbreitet. Für die Produktion eignen sich insbesondere 2D-Codes (u. a. Quick Response (QR)-Code und Data Matrix Code (DMC)). DMCs sind im industriellen Einsatz weit verbreitet. Sie zeichnen sich aufgrund ihrer integrierten Fehlerkorrektur durch ihre Robustheit aus, welche in den rauen Umgebungsbedingungen einer mechanischen Fertigung notwendig ist. Um eine eindeutige Kennzeichnung der Individuen zu ermöglichen, werden diese im Projekt mit einem DMC optisch markiert.

### Inhalt der Kennzeichnung

Die Anzahl der DIs und somit die Länge des Codes ist prinzipiell frei wählbar. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die Länge des Codes, zusammen mit der Art der verwendeten Daten (z. B. numerische oder alphanumerische Zeichen) entscheidend für die Modulanzahl und somit für den Platzbedarf auf dem Individuum ist. Ein Code mit 20 x 20 Modulen hat beispielsweise eine Kapazität von 44 alphanumerischen Zeichen. Die Zeichenanzahl ist insbesondere bei Werkzeugen mit kleinem Durchmesser relevant, bei denen der Code auf dem Schaft aufgebracht werden soll. Aus diesem Grund sollten lediglich so viele Segmente integriert werden, wie zur eindeutigen Identifizierung nötig sind.

Unter Berücksichtigung der genannten Restriktionen und Empfehlungen wird im Projekt für das Werkzeug ein rechteckiger DMC ausgewählt. Die besten Testergebnisse wurden bei einer Modulgröße von 0,125 mm erreicht. In der Regel sollte die Matrix-Größe so gewählt werden, dass jeder Modulpunkt beim Lesen mit einer Auflösung von ca. fünf Bildpunkten (Pixel) pro Modulpunkt erkannt werden kann. Bei 16 x 48 Modulen hat der Code somit eine Höhe von 2 mm und eine Breite von 6 mm. Der minimale Schaftdurchmesser des Werkzeugs, bei dem ein Lesen des Codes noch möglich war, betrug 6 mm.

Aufgrund der im Vergleich zum Werkzeug geringeren Oberflächenkrümmung und größeren Fläche wird für das Werkzeugspannfutter ein quadratischer DMC ausgewählt. Das Aufbringen und das Lesen des Codes sind hierbei unkritischer als beim Werkzeug.



---

## Aufbringung der Kennzeichnung

Die Codierung kann auf verschiedene Weisen auf der Komponente aufgebracht werden. Grundsätzlich werden zwei Verfahren unterschieden: die indirekten und die direkten Verfahren [BART08]. Bei indirekten Verfahren wird der Code auf ein Etikett gedruckt, welches an der Komponente angebracht wird. Bei diesem Verfahren wird eine hohe Druckqualität erreicht. Ein Nachteil ist jedoch, dass ein Verlust des Etiketts möglich ist. Für die rotierenden Werkzeuge sind sie insbesondere aufgrund der resultierenden Unwuchten nicht geeignet. Bei direkten Markierungen wird das Objekt selbst markiert. Hier gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren, wie das Nadelprägen, die elektrochemische Gravur, das Laserbeschriften und den Tintenstrahldruck. Für die Kennzeichnung von Werkzeugen bzw. Werkzeugspannfuttern ist insbesondere die Laserbeschriftungstechnologie geeignet. Sie bietet eine berührungslose, kräftefreie, hochauflösende und schnelle Beschriftungsmöglichkeit für schwer zu kennzeichnende Oberflächen, wie bei den metallischen Werkzeugen mit sehr kleinen Durchmessern [ACI12]. Bei der Lasermarkierung werden lokal hohe Temperaturen erzeugt, welche das Gefüge des Objekts verändern oder Material entfernen [ACI12]. Je nach Intensität der Strahlen, das heißt abhängig von den erzeugten Temperaturen, werden – mit aufsteigender Intensität – drei Prozesse unterschieden: das Laserfärben, das Laserätzen und das Lasergravieren. Die Werkzeuge sollten lediglich gefärbt bzw. angelassen werden. Veranschaulicht bedeutet dies, dass die erzeugten Vertiefungen beim Berühren mit dem Finger nicht spürbar sind. Ein Materialabtrag bzw. das Oberflächenaufrauen in Form einer Materialaufwerfung würde dazu führen, dass Werkzeuge nicht fehlerfrei eingespannt werden, woraus entsprechende Rundlauffehler resultieren.

Die Lesbarkeit der Codierung wird in erster Linie vom Lesegerät und nicht vom Aufbringungsverfahren bestimmt. Um eine möglichst gute Lesbarkeit zu gewährleisten, müssen beim Aufbringen jedoch einige Faktoren beachtet werden. So bestimmt die Auswahl des Aufbringungsverfahrens die minimal mögliche Modulgröße. Sie sollte aber so gewählt werden, dass die einzelnen Module vom Lesegerät noch erfasst werden können.

Im Zusammenhang mit der Aufbringung der Codes sind generell zwei Einsatzfälle zu betrachten:

- Beschriftung von Grundhaltern und Zwischenstücken aus Stahl
- Beschriftung von Werkzeugschäften aus Hartmetall

In der Regel kann bei **Grundhaltern und Zwischenstücken aus Stahl** das Lasergravieren zum Einsatz kommen, da keine kritischen Rundlaufeigenschaften beeinträchtigt werden. Zudem ist meist genügend Platz zum Anbringen eines ca. 10 x 10 mm großen DMC vorhanden. Dazu kann

ein 10 W-Ytterbium-Faserlaser zum Einsatz kommen. Die Beschriftung kann sowohl auf blanken als auch auf brünierten, nitrierten und beschichteten Stahloberflächen aufgebracht werden.

Auf Grund der im Allgemeinen sehr geringen zulässigen Rundlaufabweichungen bei Hartmetallwerkzeugen kann bei der **Beschriftung von Hartmetallschäften** (HM-Schäften) nur das Laserfärben eingesetzt werden. In Abhängigkeit von der Oberflächengüte und Grundfärbung des zu beschriftenden Werkzeugs ist eine Variation der Parameter, wie der Beschriftungsgeschwindigkeit und Anzahl der Beschriftungszyklen, erforderlich.

### Lesegeräte/Hardware

Wie bereits erwähnt, ist für das Modul beziehungsweise die Codegröße der beschränkende Faktor nicht das Druckverfahren sondern die Lesefähigkeit der am Markt verfügbaren Geräte. Die Auswahl der Lesegeräte hat dementsprechend eine hohe Bedeutung. Sie müssen für die reflektierenden Oberflächen der Werkzeuge und Werkzeugspannfutter geeignet sein. In Lesegeräte integrierte Polfilter sind notwendig, um die Reflektionen zu kompensieren. Im Projekt wurde für das Auslesen der optischen Codes der Cognex Dataman 8600 ausgewählt. Die Benutzeroberfläche der Software ist in nachfolgender Abbildung zu sehen.

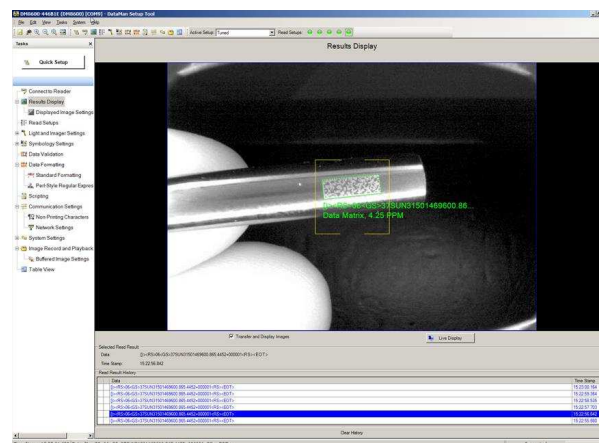


Abbildung 9: Screenshot des Einlesens des DMC mit dem Cognex Dataman 8600

### 7.1.3 RFID Kennzeichnung

Eine weitere Möglichkeit zur Kennzeichnung von Objekten, die hier behandelt wird, ist mittels RFID, da diese Technologie ihre Eignung im Zusammenhang mit Werkzeugen bereits bewiesen hat und weiteres Potential vermutet wird. Bei RFID handelt es sich um eine kontaktlose Übertragung von Informationen bzw. Daten über ein elektromagnetisches Wechselfeld. Die Komponenten eines RFID-Systems sind ein Datenträger, auch Transponder genannt, eine Sende- und Empfangseinrichtung und eine Auswerteeinheit [VDI98]. RFID-Systeme lassen sich hinsichtlich ihrer

---

Frequenzbereiche unterscheiden. Die Wichtigsten bilden der Niederfrequenz- (LF), der Hochfrequenz- (HF), der Ultrahochfrequenz- (UHF) und der Mikrowellenbereich [BART08]. In der industriellen Praxis wird im Bereich der Werkzeuge bereits mit dem Hochfrequenz- und dem Niederfrequenzbereich gearbeitet. Über in den Werkzeugspannfuttern angebrachte Transponder (umgangssprachlich als Balluff-Tag bekannt) werden technologische Daten zwischen verschiedenen Stationen im Werkzeugkreislauf ausgetauscht. So werden geometrische Daten vom Einstellgerät auf den Transponder geschrieben und an der Werkzeugmaschine wieder ausgelesen. Nach Beendigung des Bearbeitungsvorgangs können beispielsweise Verwendungsdaten des Werkzeugs, wie die Anzahl der bearbeiteten Werkstücke oder die Einsatzzeit, wieder auf den Transponder geschrieben werden. Diese Daten erlauben später einen Rückschluss auf den Verschleißzustand des Werkzeugs.

Gegenüber den LF- und HF-Bereichen bietet der UHF-Bereich den Vorteil, dass größere Leseabstände erreicht werden können. Bei den im Projekt verwendeten In-Metal-Tags beträgt die maximale Lesereichweite laut Herstellerangaben 1 m. Diese konnte in praktischen Versuchen jedoch nicht bestätigt werden und betrug in Abhängigkeit der Spannfuttergeometrie und weiteren Umgebungsbedingungen ca. 20 – 40 cm. Auch wenn die Testergebnisse die Herstellerangaben nicht erreichen, wird die Lesereichweite als ein großer Vorteil der UHF-Technologie angesehen. Zudem besteht die Möglichkeit, mehrere Transponder gleichzeitig auszulesen. Dies wird als Pulkauslesung bezeichnet [FINK12]. Dadurch können mehrere auf einem Werkzeugwagen transportierte Werkzeuge gleichzeitig von den Lesegeräten erkannt werden. Die Speicherkapazität der Transponder ist hingegen geringer als bei LF- und HF-Transpondern. Daher werden die Transponder im Rahmen des Projekts nicht mit Maschinendaten etc. beschrieben. Diese Daten werden über die eindeutige Identifikationsnummer des Transponders in der zentralen Datenbank verknüpft.

Die im Projekt benutzten Tags arbeiten auf der Basis Alien Higgs-3-Chips. Als Funkprotokoll wird EPC Class 1 Gen [ISO13] bei 866 – 868 MHz genutzt. Die Chips erlauben eine Speicheraufteilung von 96 Bit beschreibbarem Speicher für die EPC-Nummer, 96 Bit für die nicht änderbare Tag ID (TID) und bis zu 512 Bit freiem User-Space. Der freie User-Space wurde im Projekt SmartTool nicht benutzt, eine Nutzung für die Werkzeugkorrekturen wurde aufgrund des geringen Datenumfangs verworfen. Als führende Nummer wurde die 96 Bit TID gewählt, der standardmäßig vorgesehene 64-Bit-TID liefert beim Einsatz vieler Tags keine eindeutige Identifikation. Die EPC wird als 96 Bit parallel mitgelesen und im System geführt.

Der European Telecommunications Standards Institute (ETSI)-Funkstandard in der Europäischen Union erlaubt vier überschneidungsfreie Funkkanäle. Im Projekt wurden i. d. R. alle vier ausgewählt (Kanäle 4, 7, 10, 13).

## Anbringung der Kennzeichnung

Im Projekt wurde ein RFID-Transponder auf dem Werkzeugspannfutter aufgebracht, um hierüber das Gesamtwerkzeug zu identifizieren. Da die Nutzung von RFID-Transpondern im Zusammenhang mit Werkzeugen in der industriellen Praxis bereits verbreitet ist, ist eine standardisierte Bohrung mit einem Durchmesser von 10 mm im Werkzeugspannfutter für RFID-Transponder vorhanden [DIN03]. Da die Transponder in Metall versenkt werden, handelt es sich um sogenannte In-Metal-Tags. Sie dürfen axial nicht bündig mit dem Metall, das heißt der Bohrungskante, abschließen. Die mindestens einzuhaltende Entfernung ist durch den Hersteller definiert. Der Durchmesser des im Rahmen des Projekts verwendeten Transponders beträgt 6 mm und ist laut Herstellerangaben für die Standardbohrung des Werkzeugspannfutters (Durchmesser 10 mm) geeignet. Weiterhin sollte der Transponder so eingebracht werden, dass er radial bündig mit der Bohrung abschließt. Da die im Projekt verwendeten Transponder lediglich eine Dicke von 2,5 mm (siehe Abbildung 10) haben, wird eine 7,5 mm hohe Metallscheibe untergelegt. Hierbei ist es für die Funktionalität des Transponders sehr wichtig, dass es sich um eine metallische Unterlage handelt. Die Lesetests zeigten zusätzlich, dass die Ausrichtung des RFID-Transponders eine Rolle spielt. Der kleine Aufsatz des Transponders (siehe Abbildung 10, links) sollte nach oben, das heißt in Richtung des Werkzeugs, oder nach unten zeigen.

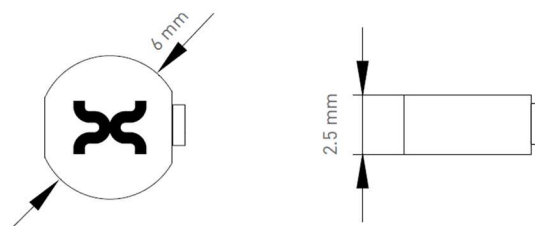


Abbildung 10: RFID-Transponder Dot In XS [XERA17]

Der Rest der Bohrung wird mit Epoxidharzkleber gefüllt. Versuche zeigen, dass der Kleber mindestens 15.000 U/Min standhält. Die beschriebene Einbausituation ist in Abbildung 11 zu sehen.

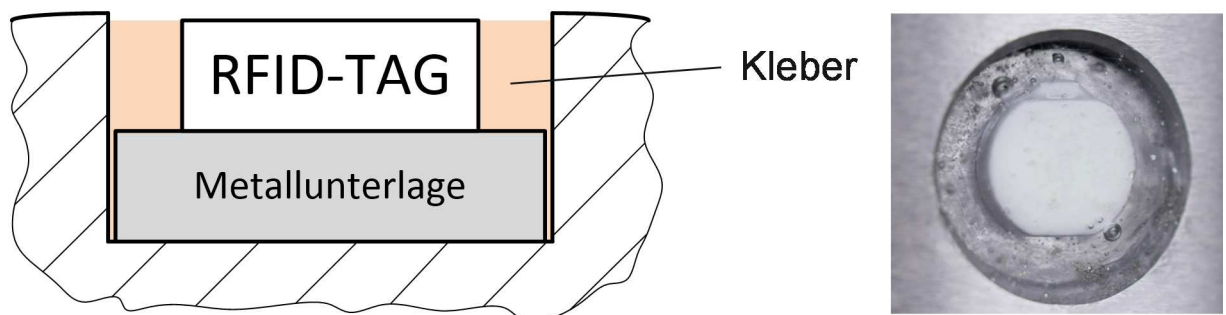


Abbildung 11: Einbau des RFID-Transponders im Werkzeugspannfutter

## Lesegeräte: Hardware und Software

Zur Auswahl der Hardware wurden verschiedene Systeme getestet. In Abbildung 12 werden die drei Bestandteile des gewählten RFID-Systems der Balluff GmbH gezeigt. Bei der Auswerteeinheit handelt es sich um das Modell MIS00M7 und bei der Antenne um das Modell BIS00TZ, die eine Größe von 271 x 271 mm misst. An die Auswerteeinheit können maximal vier Antennen gleichzeitig angeschlossen werden, welche es in verschiedenen Größen gibt. Die kleineren Antennen besitzen eine höhere Lesereichweite, aber einen geringeren Lesedurchmesser gegenüber den größeren Antennen. Aus diesem Grund wurde die kleine Antenne für den (De-)Montageplatz und die große für die Pulkauslesung ausgewählt.

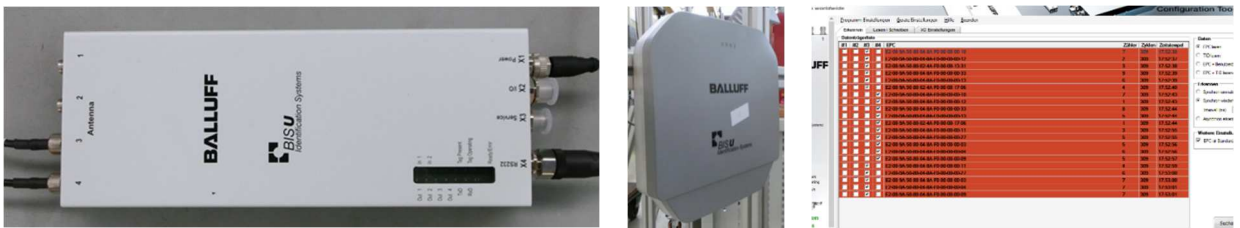


Abbildung 12: Auswerteeinheit, Antenne und Benutzeroberfläche des RFID-Systems Balluff GmbH

## 7.2 Buchen des aktuellen Lagerortes

### 7.2.1 Definition der Ereignisse

Das im Rahmen der Identifikation des Individuums aufgerufene digitale Abbild des Werkzeugs (Gesamtwerkzeug oder auch Werkzeugkomponente) soll den aktuellen Zustand des physischen Werkzeugs zu jeder Zeit wiedergeben können. Da die Daten nicht zu jedem Zeitpunkt aufgenommen werden können, werden relevante Ereignisse identifiziert und beschrieben, an denen Daten aufgenommen werden müssen.

Die Erfassung und Aufzeichnung der Ereignisse sollte standardisiert erfolgen. Im Projekt werden die Ereignisse mit dem Standard EPCIS beschrieben. EPCIS ist ein vom Unternehmen GS1 entwickelter offener Standard zum Verfolgen beliebiger Objekte wie Produkte oder Sendungen z. B. entlang der Lieferkette oder auch im Werkzeugkreislauf, der in seiner ersten Version 2007 veröffentlicht wurde [THOM12]. Dieser spezifiziert im Wesentlichen Schnittstellen zur Erfassung und Abfrage sogenannter EPCIS-Ereignisse (Events). Mittels EPCIS werden Anwender (Unternehmen, Behörden etc.) in die Lage versetzt, Transparenz und Kontrolle über ihre jeweiligen Prozesse zu steigern. EPCIS kann sowohl unternehmensintern als auch unternehmensübergreifend eingesetzt werden. Es setzt standardisierte, (weltweit) eindeutige Kennzeichnungen der Objekte voraus und ist datenträgerunabhängig. Zulässig sind sowohl die Codierung nach GS1 AI als auch nach MH10 DI.

---

Bei jeder Erfassung einer Komponente oder eines Gesamtwerkzeugs werden Objekt-Daten in Form von Events/Ereignissen übertragen. In diesen erzeugten Ereignissen stehen Informationen der „was“- , „wann“- , „wo“- und „warum“-Dimensionen.

- Im Falle von SmartTool bezieht sich die „was“-Dimension auf die Einzelkomponente oder das Gesamtwerkzeug und die Art des Ereignisses. Es werden folgende Ereignisse verwendet:
  - Das „Object Event“ bei reinen Beobachtungen,
  - das „Aggregation Event“ bei der Zusammenführung oder Trennung mehrerer Einheiten (z. B. Verknüpfung von Komponenten zu einem Gesamtwerkzeug) und
  - „Transaction Event“, um Objekte z. B. Dokumenten zuzuordnen (z. B. Zuordnung eines Gesamtwerkzeugs zu einem Auftrag).
- In der „wann“-Dimension wird der Zeitpunkt des Ereignisses erfasst.
- Die „wo“-Dimension wird in zwei Bestandteile geteilt.
  - Der „Read Point“ gibt den Ort des Ereignisses an, während
  - die „Business Location“ den Ort bezeichnet, an dem sich das Objekt nach dem Ereignis befindet.
- Die „warum“-Dimension besteht aus mehreren Komponenten, die gemeinsam den Geschäftskontext erläutern.

Beispielhaft könnte ein EPCIS-Event im Werkzeugkreislauf folgendermaßen aussehen: Das Werkzeug x (was?) war am 01.02.2016 um 10:13 Uhr (wann?) auf Maschine y (wo?) zur Bearbeitung eines Werkstücks eingesetzt (warum?). Alle Ereignisse werden im EPCIS-Repository (Datenbank) gespeichert. Über Clients kann auf die Datenbank zugegriffen werden und eine weitere Auswertung der Daten wird ermöglicht.

Im Jahr 2010 wurde seitens GS1 ein auf EPCIS aufbauender Standard ratifiziert, der die wesentlichen Vokabelelemente und deren Werte definiert, das sogenannte Core Business Vocabulary (CBV). Mit dem CBV werden Events eindeutig beschrieben. Hierzu gehören die „Business Location“ (z. B. HDM, PTW), der „Read Point“ (z. B. Montagestation), die „Action“ („Add“, „Delete“, „Observe“), der „Business Step“ (z. B. „Storing“, „Picking“, „Disassembling“) und die „Disposition“ (z. B. „Active“, „Inactive“). Die relevanten Events im Werkzeugkreislauf sind in Tabelle 5 gelistet.

Tabelle 5: Ereignisse im Werkzeugkreislauf

Event	Beschreibung	Events
1	Auslagerung aus Zentrallager	Object Event
2a	Einlagerung in dezentrales Lager	Object Event
2b	Auslagerung aus dezentralem Lager	Object Event
3	Montage	Aggregation Event
4a	Zuordnung zu Auftrag	Transaction Event
4b	Einstellung	Object Event
5	Gesamtwerkzeuge auf Transportpalette	Aggregation Event
6	Bereitstellung von für den Einsatz gerichteter Werkzeuge	Object Event
7	Einwechslung in Maschine	Object Event
8	Entnahme aus Maschine	Object Event
9	Rückführung in Werkzeugvorbereitung/Betriebsmittelabteilung	Object Event
10	Gesamtwerkzeuge von Transportpalette	Aggregation Event
11	Werkzeugbegutachtung/Prüfung/Entscheidung über weitere Vorgehensweise	Object Event
12	Demontage	Aggregation Event
13	Auflösung der Zuordnung zu Auftrag	Transaction Event
14 (=2a)	Wiedereinlagerung der Komponenten	Object Event
15a	Zuordnung zu externem Aufbereitungsauftrag	Transaction Event
15b	Externe Aufbereitung	Object Event
15c	Auflösung der Zuordnung zu externem Aufbereitungsauftrag	Transaction Event
16a	Zuordnung zu internem Aufbereitungsauftrag	Transaction Event
16b	Interne Aufbereitung	Object Event
16c	Auflösung der Zuordnung zu internem Aufbereitungsauftrag	Transaction Event
17	Entsorgung	Object Event
18	Einlagerung in Schieberschrank	Object Event
19	Auslagerung aus Schieberschrank	Object Event

Die Ereignisse können durch verschiedenen Signale, wie beispielsweise den Lesevorgang eines Identifikationssystems, ausgelöst werden. Die Lesestationen im Werkzeugkreislauf sind in Abbildung 13 zu sehen. Die ausgeblendeten Ziffern waren für den Pilotbereich nicht relevant. Zur

Identifikation der Individuen werden bis zur Montage optische Lesegeräte integriert. Ab der Aggregation der Komponenten zu einem Gesamtwerkzeug in der Montage wird dieses über den im Werkzeughalter integrierten RFID-Transponder identifiziert.

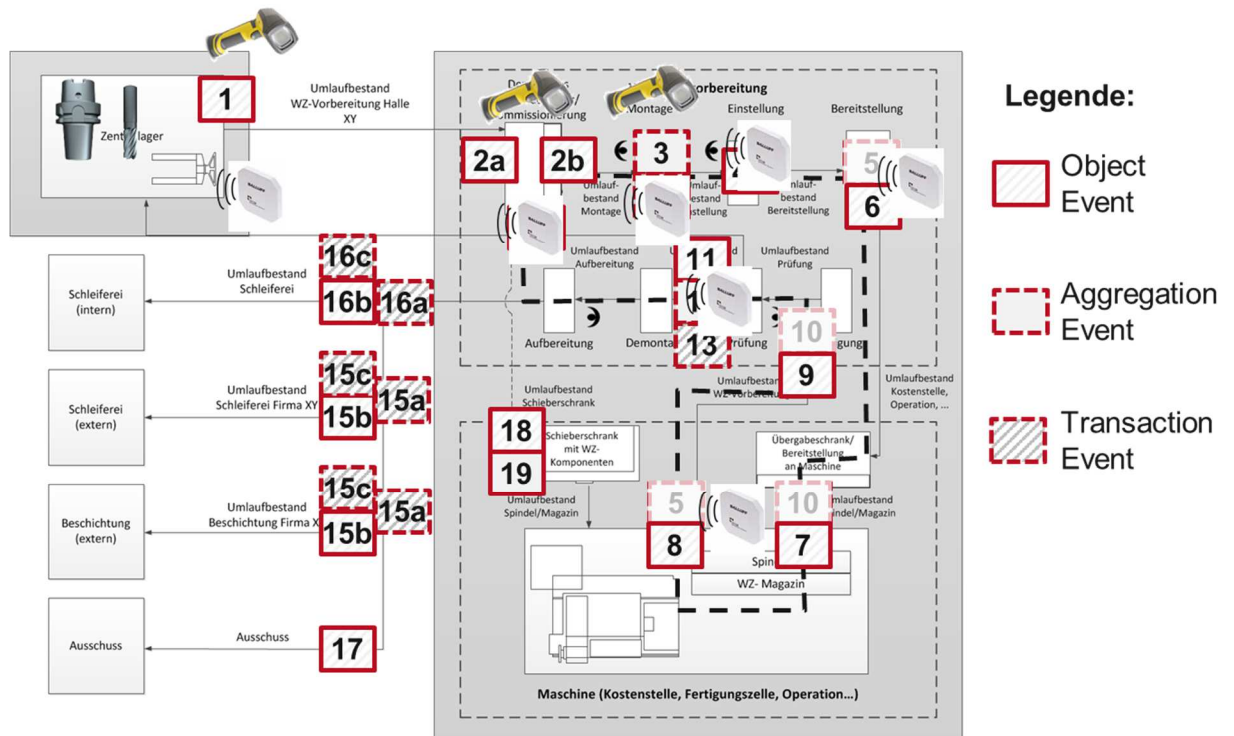


Abbildung 13: Lesestation im Werkzeugkreislauf

## 7.2.2 Umsetzung

In den folgenden Abschnitten wird die Umsetzung des vorher erläuterten Konzepts anhand folgender Stationen erläutert:

- Lager
- (De-)Montagearbeitsplatz
- Einstellgerät
- Portal
- Werkzeugmaschine

### Lager

Am Anfang eines Werkzeugeinsatzes steht i. d. R. die Erstellung eines Werkzeugbereitstellungsauftrages, der die entsprechenden Gesamtwerkzeuge, deren Einzelkomponenten, die Stückzahlen und weitere technologische Daten enthält. In der Werkzeugausgabe werden im ersten Arbeitsschritt die benötigten Einzelkomponenten zusammengestellt und diese dem Lagersystem entnommen. Im Projekt SmartTool kam dazu das Gühring-Werkzeugausgabesystem TM326 mit der Werkzeugmanagement-Software GTMS zum Einsatz.



Zur **Entnahme** von Werkzeugen wird zunächst in der Bedienoberfläche des Tool Management Systems ein Auftrag ausgewählt, woraufhin die für diesen Auftrag notwendigen Komponenten angezeigt werden. Durch die Wahl einer Komponente öffnet sich die entsprechende Schublade automatisch und die Komponente kann entnommen werden. Enthält die Schublade diverse Komponenten, so wird im Display angezeigt, aus welchem Fach die angewählte Komponente zu entnehmen ist. Um sie auch virtuell aus dem Schrank auszulagern, muss abschließend der auf der Komponente angebrachte DMC mittels des mit dem Werkzeugausgabesystem verbundenen Lesegeräts (Cognex DataMan 8600) ausgelesen werden. Die aktuelle Position („Business Location“ und „Read Point“) und der Zustand („nicht verfügbar“) werden nach EPCIS-Standard an das STC übermittelt.

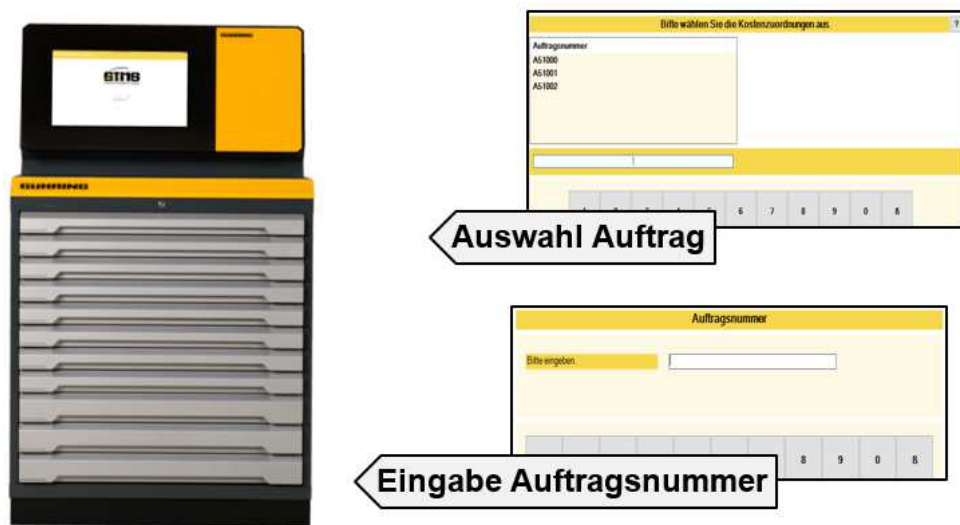


Abbildung 14: Auslagerung

Zur **Wiedereinlagerung** der Komponente bzw. allgemein beim Befüllen des Tool Management Schrankes muss zunächst manuell der DMC der Komponente gescannt werden. Sollte der Artikel noch nicht in der Software angelegt sein, werden alle Informationen aus dem STC in das GTMS geladen, sodass dieser im Tool Management System angelegt ist. Es folgt eine automatische Lagerplatzvergabe und das Öffnen der entsprechenden Schublade, um das manuelle Ablegen des Artikels in das zugewiesene Fach zu ermöglichen. Ist die Komponente bereits im GTMS angelegt, öffnet sich die Schublade unmittelbar nach Einlesen des DMC.

### Montagearbeitsplatz

Auf dem Werkzeugmontagearbeitsplatz werden die Werkzeugkomponenten physisch und virtuell zu einem Gesamtwerkzeug montiert. Im Projekt SmartTool wurden zwei Möglichkeiten der virtuellen Montage umgesetzt.

Zum einen ist eine **virtuelle Montage über das Zoller TMS** möglich. Wie bereits erläutert, werden die Einzelkomponenten via DMC identifiziert. An der Montagestation werden nacheinander die DMC aller zu einem Gesamtwerkzeug gehörenden Komponenten gescannt. An der Bedienoberfläche wird als Aktivität die virtuelle Montage der Komponenten ausgewählt. Das System fordert daraufhin das Einlesen des RFID-Transponders. Die eindeutige Nummer des Transponders wird dem Gesamtwerkzeug zugeordnet und dient ab diesem Zeitpunkt zur Identifikation dessen. Die im Zoller TMS erfassten Daten werden im STC zusammengefasst.

Zum anderen kann die **virtuelle Montage über eine von der EINS GmbH im Rahmen des Projekts entwickelte App** erfolgen. Zunächst wird die Auftragsnummer des zu bearbeitenden Auftrags ausgewählt. Daraufhin werden alle Komponenten des dazugehörigen Auftrags aufgelistet (siehe Abbildung 15). Sind alle Komponenten gescannt (und dementsprechend in der Liste grün markiert), kann der Auftrag gespeichert werden.

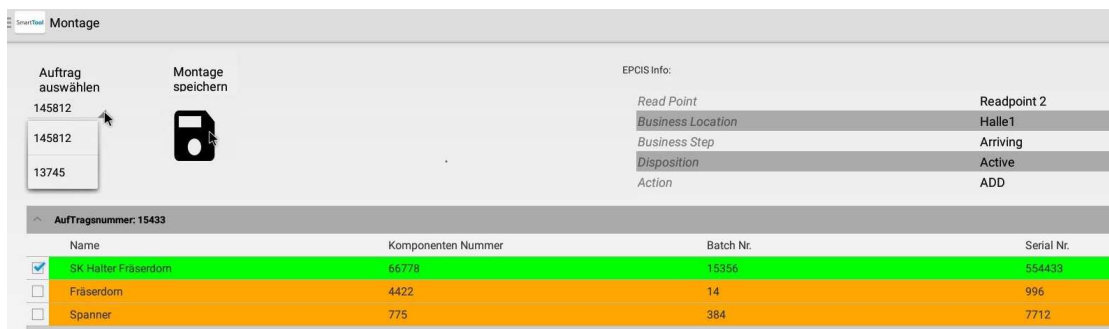


Abbildung 15: Screenshot der Montagearbeitsplatz-App

Nach der virtuellen erfolgt die physische Montage. Das montierte Werkzeug wird anschließend eine Station weiter an das Einstell- und Messgerät (siehe Abbildung 16) gegeben.

### Einstell- und Messgerät



Abbildung 16: Einstell- und Messgerät

---

Durch das Einlesen des RFID-Transponders am Voreinstellgerät wird der digitale Zwilling aus dem STC abgerufen und an dieses übergeben. Die gemessenen Daten werden dem Werkzeug über die eindeutige Identifikationsnummer zugeordnet und im STC gespeichert.

### Portal

Um mehrere Werkzeuge auf einem Werkzeugwagen während der Fahrt gleichzeitig zu identifizieren, wurde ein Portal aufgebaut, welches aus einer RFID-Auswerteeinheit und vier RFID-Antennen besteht. Es wurden vier Antennen eingesetzt, da dies die maximal mögliche Anzahl an Antennen für eine Auswerteeinheit ist. Auf jeder Seite werden zwei Antennen hintereinander angebracht. Hierdurch wird eine Redundanz erzeugt, um eine eindeutige Lesbarkeit zu gewährleisten. Der Abstand der Antennen zueinander wurde so gewählt, dass der Werkzeugwagen exakt hindurch passt. Dies ist notwendig, damit die Werkzeuge möglichst nah an den Antennen vorbei geführt werden (siehe 7.1.3 RFID Kennzeichnung). Der Aufbau ist in Abbildung 17 zu sehen.



Abbildung 17: Aufbau Portallösung mit Werkzeugwagen

Der Werkzeugwagen wird lediglich mit zwei Bahnen Werkzeugen bestückt, das heißt mit sechs Werkzeugen auf jeder Seite (insgesamt somit 12 Werkzeuge), um eine eindeutige Lesbarkeit zu gewährleisten. In Tests mit mehr als zwei Bahnen war eine zuverlässige Lesbarkeit nicht gegeben.

Die Werkzeuge müssen so ausgerichtet sein, dass der RFID-Transponder zur Antenne zeigt. Bei einer Verdrehung kann die metallische Abschirmung zu groß sein, um die Transponder auszule-

sen. Um eine Verdrehung zu verhindern, sollten die Einsätze für die Werkzeuge im Werkzeugwagen so präpariert sein, dass eine eindeutige Ausrichtung erzwungen wird. Die im Projekt gewählte, sehr pragmatische, Lösung ist die Integration von Schrauben in den Einsätzen.

Auf dem am Portal installierten Bildschirm kann der Bediener erkennen, welche Werkzeuge gelesen wurden. Da in der Regel Werkzeugsätze für einen Auftrag gemeinsam auf einer Palette transportiert werden, ist die Anzeige auftragsbezogen. Wird ein Transponder eingescannt, wird der gelesene Code angezeigt und dieser grün markiert. Bei der Werkzeugmontage wurde dieses spezielle Werkzeug einem Produktionsauftrag zugeordnet. Alle anderen zu demselben Auftrag benötigten Werkzeuge werden aus der Datenbank heruntergeladen und erscheinen ebenfalls in der Liste. Sie sind vorerst gelb markiert. Sobald eine Antenne einen entsprechenden Transponder erkennt, wird der Eintrag grün markiert. Weiterhin gibt es rot markierte Einträge (siehe Abbildung 18). Dies sind Werkzeuge, die sich auf dem Werkzeugwagen befinden, obwohl sie nicht dort sein sollten, da sie keinem Auftrag zugeordnet wurden und als aktives Gesamtwerkzeug nicht in der Datenbank existieren.

Name	Tag ID	EPC	ANTENNE
<b>Auftragsnummer: 15433</b>			
<input checked="" type="checkbox"/> Zollbohrer	E2-00-34-12-01-81-FA-00	15-A8-34-12-01-34-12-18-63-88-FA-00	1
<input checked="" type="checkbox"/> Grinding Wheel FEPA 11V9	E2-00-34-37-01-81-FA-00	13-A1-34-12-01-12-18-18-63-CB-FA-00	1
<b>Auftragsnummer: 98457</b>			
<input checked="" type="checkbox"/> Schafffräser Ø10	E2-99-CB-12-77-81-FA-00	99-A4-34-12-01-82-18-18-63-CB-FA-00	4
<input type="checkbox"/> Planmesserkopf	E2-33-CB-02-77-81-FA-00	45-A4-34-12-01-77-18-99-63-CB-FA-00	2
<input type="checkbox"/> Flachbohrer 180° HSK63	E2-99-CB-12-77-81-FA-00	98-97-34-11-01-82-18-18-63-CB-FA-00	4
<b>Auftragsnummer: NO ORDER</b>			
<input type="checkbox"/> Gewindefräser HSK63	E2-84-13-05-77-NMFA-00	93-A1-BC-12-01-77-18-99-77-CB-FA-00	1

**EPCIS Info:**

Read Point	Readpoint1
Business Location	Halle1
Business Step	Assembling
Disposition	Active
Action	ADD

Abbildung 18: Software Portallösung

Die eingelesenen Daten werden erst durch Betätigen eines Bestätigungs-Buttons durch den Bediener an die zentrale Datenbank gesendet. Der Auftrag wird mit Positionsdaten und Statusdaten an das STC übermittelt. Sind nicht alle zu einem Auftrag benötigten Werkzeuge erfasst, kann dieser über die App nicht abgeschlossen und gespeichert werden. Hierdurch sollen Fehler beim Werkzeugtransport vermieden werden.

## Werkzeugmaschine

An der Werkzeugmaschine wird das Gesamtwerkzeug über den am Werkzeugspannfutter angebrachten RFID-Tag eingelesen und das entsprechende Event an das STC gesendet. Beim Entnehmen des Werkzeugs wird der Tag erneut gelesen und ein Event gesendet. Weitere Informationen zur Datenübertragung aus der Werkzeugmaschine sind in Abschnitt 7.3 zu finden.

In Abbildung 19 sind zusammengefasst die Datenflüsse und Verknüpfungen der in SmartTool beteiligten Stationen des Werkzeugkreislaufs dargestellt. Im grün hinterlegten Bereich erfolgt eine Verfolgung auf Komponentenebene, während im gelb hinterlegten Bereich eine Verfolgung auf Werkzeugebene stattfindet. An zentraler Stelle befindet sich das STC, in dem die Daten zentral gesammelt und analysiert werden.

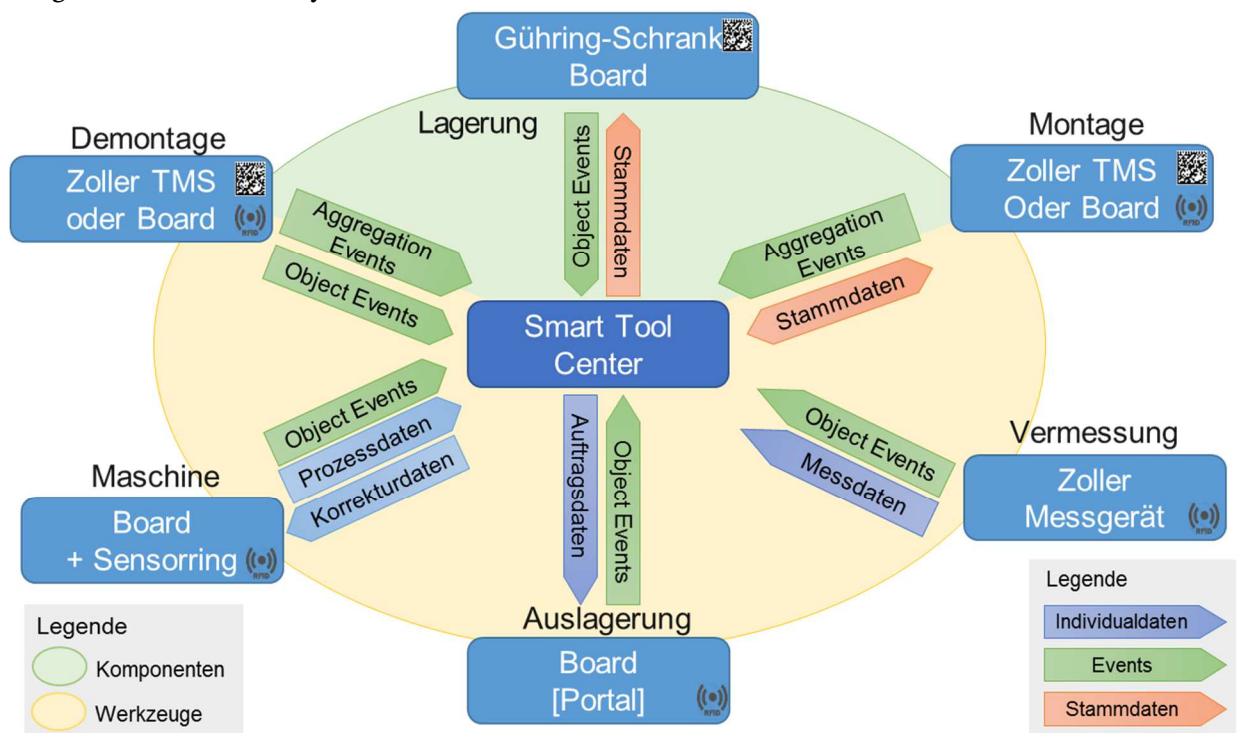


Abbildung 19: Datenübertragung im Werkzeugkreislauf

### 7.3 Speichern und Übertragen von Daten

Einer der eingeführten Funktionsbausteine des Gesamtsystems SmartTool stellt das „Speichern und Übertragen von Daten“ dar. Das Speichern und Übertragen individuumsbezogener Daten erfolgt, wie auch die Buchung des Lagerorts, nach der Identifikation des Individuums. Hierbei ist der Ort der Speicherung der Daten, zentral in einer Datenbank oder dezentral auf dem Werkzeug selbst, zunächst nicht näher definiert. Im Projekt wurde eine zentrale Speicherung im STC als bevorzugte Lösung ausgewählt.

Mit den bereits vorgestellten Vorgangskettendiagrammen wird das systematische Vorgehen zum Speichern und Übertragen von Daten dargestellt. In Abbildung 20 sind zwei Auszüge der Vorgangskettendiagramme zu sehen. Der linke Teil zeigt einen Ausschnitt des Ablaufs der Gesamtwerkzeugaufbereitung und der Rechte des Werkzeugeinsatzes. Im linken Teil sind mehrere Identifikationsschritte abgebildet, die typische Bestandteile dieses Funktionsbausteins sind. Im Bereich des Werkzeugeinsatzes werden Daten an die WZM-Steuerung übertragen und nach dem Einsatz aus der Steuerung gelesen und im STC gespeichert.

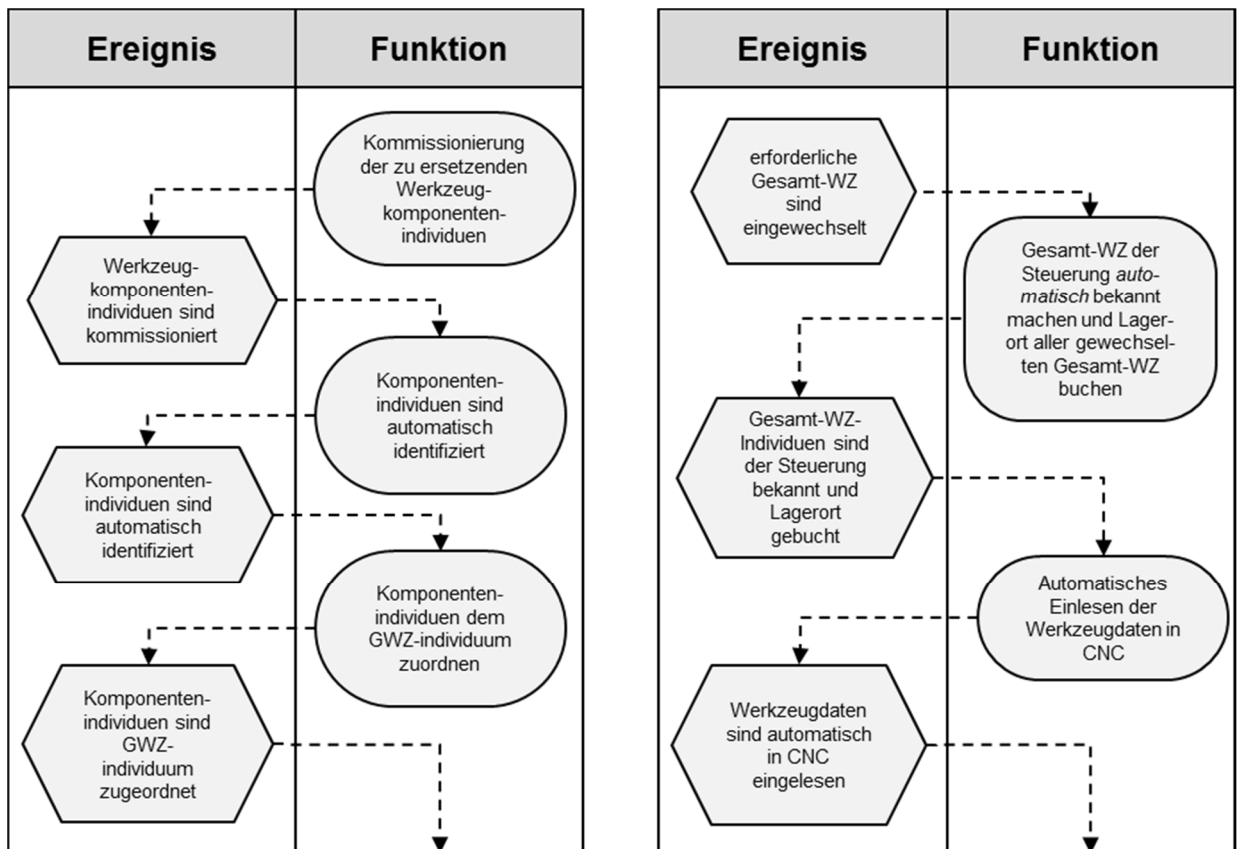


Abbildung 20: Auszug aus Vorgangskettendiagrammen zur Gesamtwerkzeugaufbereitung (links) und zum Werkzeugeinsatz (rechts)

Der Funktionsbaustein „Speichern und Übertragen von Daten“ dient der Interaktion und Vernetzung des SmartTool im Werkzeugkreislauf in zwei Richtungen. Zum einen können dem Werkzeug Daten aus der Planung sowie Vorbereitung, die seine individuelle Konfiguration betreffen, zugeordnet werden. So erlangt das Werkzeug neben der eindeutigen Identifikationskennzeichnung auch einen Informationsspeicher, der die Bewegungsdaten den Interaktionspartnern während des Werkzeugeinsatzes zur Verfügung stellt. Dieser, vom Werkzeug automatisch ausgehende Informationsfluss, versorgt die Interaktionspartner im Werkzeugkreislauf mit den jeweils benötigten Informationen und reduziert dadurch den manuellen Aufwand sowie das Fehlerpotenzial durch Falscheingaben.

---

Zum anderen können Bewegungsdaten, die während des Werkzeugeinsatzes entstehen, dem Individuum mitgegeben werden. Neben der Reststandzeit sind dies weitere Daten, die im Nachgang primär zum Aufbau einer Wissensdatenbank der Planung bereitgestellt werden.

Werkzeug und Werkzeugspannfutter erzeugen mit jeder Bewegung neue Daten im Werkzeugkreislauf. Jede Veränderung des aktuellen Lagerorts oder Werkzeugzustands muss verarbeitet werden und dann an das STC übertragen und dort gespeichert werden. Somit ist dieser Funktionsbaustein an praktisch jeder Stelle im Kreislauf ein wichtiger Teil des Gesamtsystems Smart-Tool. Als Musterfall für diesen Baustein wird die Datenübertragung an der Werkzeugmaschine detailliert erläutert.

### **7.3.1 Datenübertragung an der Werkzeugmaschine**

Zu Beginn des Projekts wurde ein Überblick erstellt, welche Möglichkeiten es zur Kommunikation mit einer WZM-Steuerung bereits gibt. Hierbei wurden einerseits kommerziell erhältliche Lösungen und frei verfügbare Standards betrachtet. Bei den kommerziell erhältlichen Lösungen konnte zusätzlich zwischen steuerungsunabhängigen und steuerungsabhängigen sowie zwischen Systemen unterschieden werden, die zeitunkritische und zeitkritische Signale bereitstellen können.

Die Auswahl der Kommunikationsvariante hängt neben den erarbeiteten Anforderungen und Zielen auch von den zur Verfügung stehenden Werkzeugmaschinen und deren Steuerungen ab. Nach Erfassung des Ausrüsterstandes bei den Anwendern und dem PTW wurde als fokussierte Steuerung die Siemens Sinumerik 840D mit Softwarestand ab V4.5 SP3 ausgewählt. Hierbei soll allerdings eine übertragbare Lösung auf andere Steuerungen berücksichtigt werden.

Die Entwicklung einer eigenen Schnittstelle wurde vom Konsortium als kritisch betrachtet, sowohl bezüglich der zeitlichen Umsetzung im Projekt als auch insbesondere der späteren Umsetzung und Übertragbarkeit über das Projekt hinaus. Daher wurde eine kommerziell erhältliche Lösung, das Hersteller- und Plattform-unabhängige M2M-Kommunikationsprotokoll OPC UA, als favorisierte Lösung zum bidirektionalen Datenaustausch mit der WZM-Steuerung ausgewählt. Dieses Protokoll wird von Fachverbänden und vielen Herstellern der Automatisierungsbranche als Kommunikationsprotokoll für Industrie 4.0-Lösungen propagiert [JUSC16]. Zudem bietet OPC UA mit Blick auf das Projekt sowie die Übertragbarkeit und Umsetzung einige Vorteile gegenüber anderen bereits verfügbaren Lösungen, auf die in Abschnitt 7.3.2 näher eingegangen wird.

Neben der ausgewählten Schnittstelle wurden die Siemens-eigenen Produkte (Sinumerik Integrate) und Lösungen der Siemens Solution Partner betrachtet. Diese beiden Optionen bieten



---

den Vorteil, dass die Gewährleistungsproblematiken seitens der Maschinenhersteller und Siemens sehr gering sind. Siemens-eigene Anwendungen sind beispielsweise Manage MyTools, Analyse MyCondition oder Access MyMachine. Die Sinumerik Integrate Produkte wurden allerdings nicht weiter verfolgt, da mit diesen keine Übertragbarkeit auf andere Steuerungen gewährleistet werden kann. Siemens Solution Partner sind Artis GmbH, Comara KG, MCU GmbH & Co. KG, Promotec GmbH etc. Diese Systeme dienen überwiegend zur Prozess-, Werkzeug- und Maschinenüberwachung. Die Überwachung wird häufig durch das „Einklinken“ in einen der Feldbusse, zusätzliche Software auf der Steuerung oder das Einbringen von Sensorelementen in die Werkzeugmaschine realisiert. Um eine Softwareschnittstelle zur Steuerung herzustellen, muss diese in den meisten Fällen steuerungsseitig implementiert werden. Die steuerungsseitige Implementierung bringt zwei Problemstellungen mit sich: einerseits die bereits erwähnte Gewährleistungsproblematik und andererseits muss für jeden Steuerungstyp eine neue bzw. angepasste Softwareschnittstelle implementiert werden. Aus diesen Gründen wurde eine solche Lösung nicht weiter verfolgt.

Eine weitere offene Kommunikationsschnittstelle stellt MTConnect dar. Hierbei handelt es sich um einen Standard, der vorrangig im nordamerikanischen und asiatischen Raum verbreitet ist. Dieser Standard hat bezüglich des Projektvorhabens allerdings zwei entscheidende Nachteile: Einerseits müssen auf der Steuerung sogenannte Agenten implementiert werden, was wiederum das Problem der Gewährleistung zur Folge hat. Andererseits kann via MTConnect auf der Steuerung nur „mitgehört“ werden. Da ein wesentlicher Bestandteil des Projekts das Schreiben von Daten in die Steuerung war, wurde die Verwendung von MTConnect nicht näher betrachtet.

### **7.3.2 Umsetzung via OPC UA**

Bevor die Schnittstelle OPC UA an der Versuchsmaschine Hermle C32U am PTW freigeschaltet wurde, wurde die Frage der Gewährleistung mit der Fa. Hermle abgeklärt. Hierbei wurden keine Bedenken geäußert, da es sich um eine standardmäßige Schnittstelle seitens Siemens handelt.

Bei HDM wurde im Rahmen des Projekts ein Softwareupdate (neuer Softwarestand SW 4.5 SP5) der Steuerung in Kombination mit der Freischaltung der Schnittstelle auf zwei Bearbeitungszentren Grob G550 durchgeführt. Somit ist davon auszugehen, dass auch andere Hersteller die Nutzung der Schnittstelle ohne Gewährleistungsverlust zulassen.

Als neueste aller OPC-Spezifikationen der OPC Foundation unterscheidet sich OPC UA erheblich von seinen Vorgängern, insbesondere durch die Fähigkeit, Maschinendaten (Regelgrößen, Messwerte, Parameter usw.) nicht nur zu transportieren, sondern auch maschinenlesbar semantisch



zu beschreiben (siehe auch Abschnitt 7.5.1). OPC UA wurde auch als IEC-Normenreihe IEC 62541 veröffentlicht [OPEN17a, OPEN17b].

Neben der Auswahl der Schnittstelle ist auch die Definition der relevanten Daten, welche aus der Maschinensteuerung gelesen und in die Steuerung geschrieben werden sollen, sehr wichtig. Zum einen wurden diese Daten bestimmten Datenquellen zugeordnet und zum anderen wurden diese Daten klassifiziert, vgl. Abschnitt 6.1. Die für die „Datenquelle“ WZM-Steuerung relevanten Daten sind ausschließlich quasi-statisch und dynamisch. Zu den quasi-statischen gehört das NC-Programm, zu den dynamischen unter anderem der Vorschub-Ist, der Spindelstrom-Ist und die Drehzahl-Ist.

Auf Grund der eingeschränkten Übertragungsgeschwindigkeit der Schnittstelle OPC UA werden in der Umsetzung vorerst nur die WZ-Korrekturdaten berücksichtigt. Um eine sinnvolle Aggregation von beispielsweise Spindelströmen oder -drehzahlen zu gewährleisten, reicht die mögliche Abtastrate von OPC UA im Fall der Sinumerik 840D aktuell nicht aus. Das Geschwindigkeitsproblem der Schnittstelle soll allerdings in Zukunft gelöst werden. Dies wurde gemeinsam von mehreren Unternehmen auf der SPS IPC Drives 2016 verkündet [JUSC16].

Das Konzept der Datenübertragung wird im Folgenden beispielhaft für das Einlegen eines Werkzeugs in die WZM detailliert beschrieben (siehe Abbildung 21).

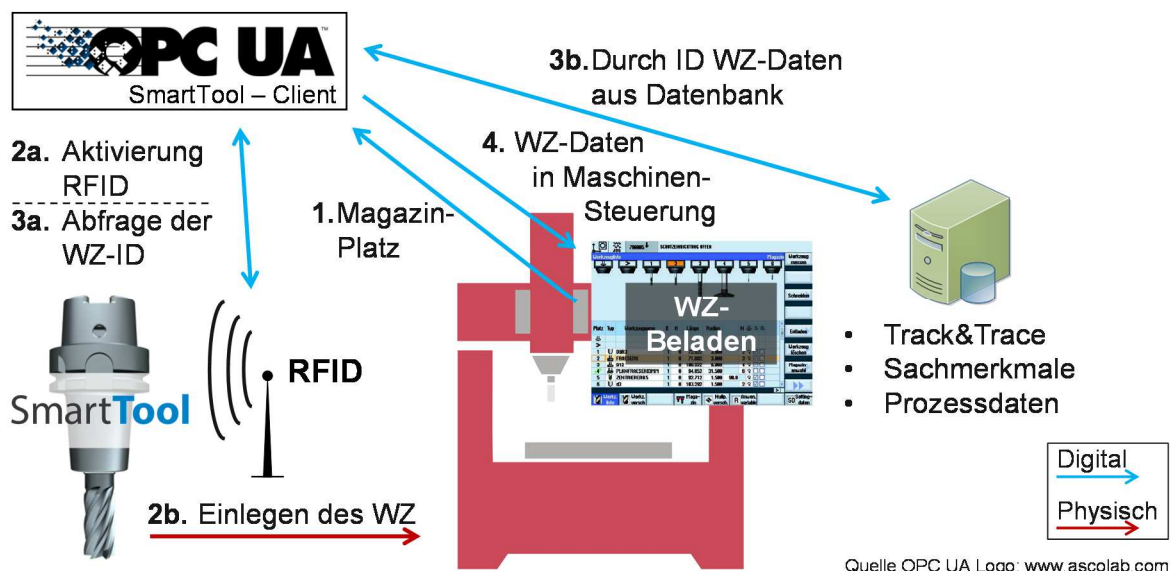


Abbildung 21: Konzept des SmartTool-Beladevorgangs an der WZM physisch und digital

Der Ablauf beginnt mit dem Betätigen der Funktion „Werkzeug Beladen“ am Maschinenbedienpult durch Fachkräfte an der Werkzeugmaschine (1). An dieser Stelle wird vorausgesetzt, dass die Werkzeuge an der Maschine bereit gestellt sind und alle benötigten Daten über das Werkzeug

im STC an- und abgelegt wurden. Durch das Betätigen „Werkzeug Beladen“ wird in der Steuerung die Variable „DB71.DBX34.0“ von false auf true gesetzt. Der im Projekt implementierte OPC UA Client erkennt die Veränderung der Variable und aktiviert die RFID-Auswerteeinheit am Beladeplatz der Maschine (2a & 2b). Das Werkzeug wird an der RFID-Antenne vorbeigeführt, wodurch es eindeutig identifiziert wird (3a) und die Werkzeugdaten im STC abgerufen werden (3b). Im Pilotbereich des PTW wurde die Antenne außen an der Maschine angebracht. Parallel hierzu wird die steuerungseigene T-Nummer („placeData[u1,c30,3]“) ausgelesen, über die die Zuordnung der Werkzeugdaten in der Maschine bestimmt wird. Wird das Werkzeug physisch eingelegt (2b), sind bereits alle relevanten Daten im Werkzeugkorrekturspeicher hinterlegt, da diese vom OPC UA Client in die Steuerung geschrieben werden („edgeData[u1,c“T-Nummer“,“Parameter Nr.“]“). Die „Parameter-Nr.“ gibt das entsprechende Korrekturdatum an, beispielsweise 3 = Werkzeuglänge oder 6 = Radius. Einen Auszug der Parameter ist in Abbildung 22 zu sehen.

edgeData	\$TC_DPx[y,z] x = ParamNo y = ToolNo z = EdgeNo
Korrekturwertparameter und Schneidenliste mit D-Nummern zu einem Werkzeug 1. Teil: Korrekturwertparameter für eine Werkzeugschneide: Bestimmung des Zeilenindex: (SchneidenNr - 1) * + ParameterNr Die Bedeutung der einzelnen Parameter hängt vom Typ des jeweiligen Werkzeuges ab. Zur Zeit sind 34 Parameter für jede Werkzeugschneide reserviert (jedoch nur ein Teil davon ist mit Werten belegt). Um für zukünftige Erweiterungen flexibel zu sein, sollte jedoch nicht mit einem festen Wert von 34 Parametern sondern mit dem Variablenwert " gerechnet werden. Eine detaillierte Beschreibung der Werkzeugparameter ist der Dokumentation 'Werkzeugkorrektur (W1)', Kapitel 'Werkzeugschneide' zu entnehmen. Die folgende Liste ist eine Kurzübersicht der Werkzeugschneiden-Parameter: Parameter 1: Geometrie -- Werkzeugtyp (\$TC_DP1) Parameter 2: Geometrie -- Schneidenlage (\$TC_DP2) Parameter 3: Geometrie -- Länge 1 (\$TC_DP3) Parameter 4: Geometrie -- Länge 2 (\$TC_DP4) Parameter 5: Geometrie -- Länge 3 (\$TC_DP5) Parameter 6: Geometrie -- Radius (\$TC_DP6) Parameter 7: Geometrie -- Eckenradius (Werkzeug-Typ 700; Nutsäge) (\$TC_DP7) Parameter 8: Geometrie -- Länge 4 (Werkzeug-Typ 700; Nutsäge) (\$TC_DP8)	

Abbildung 22: Auszug aus dem "Sinumerik 840D sl NC-Variable und Nahtstellensignale"-Listenhandbuch zur NC-Variable „edgeData“ [SIEM13]

Das Entladen erfolgt, analog zum Beladen, nach dem Betätigen der Funktion „Werkzeug Entladen“. Hierbei werden jedoch nur Daten aus der Werkzeugmaschine ausgelesen und nicht geschrieben. Einen Überblick der an den Abläufen beteiligten Maschinenvariablen bzw. -daten und deren Zugriffsort in der Steuerung ist in Tabelle 6 zu finden.

Tabelle 6: Übersicht der verwendeten NC-Variablen im Rahmen der OPC UA-Umsetzung für Hermle C32U

NC-Variablenname	Zugriffsadresse OPC UA	Erläuterung
DB71.DBX34.0	/plc/	Variable „Werkzeug Beladen“ true/false
placeData[u1,c30,3]	/Tool/Magazine/	Abfrage der T-Nummer in Maschine auf Beladeplatz
edgeData[u1,c“T-Nr“,“Para-Nr“]	/Tool/Compensation/	Werkzeugkorrekturdaten in Abhängigkeit von T-Nummer
toolMon[u1,“T-Nr“]	/Tool/Data/	Einstellung der Werkzeugüberwachung; aus, Standzeit oder Stückzahl
data[u1,c“T-Nr“,“Para-Nr“]	/Tool/Supervision/	Werte der Überwachungsdaten; Abfrage über die T-Nummer
DB71.DBX34.1	/plc/	Variable „Werkzeug Entladen“ true/false

#### 7.4 Messen und Übertragen prozessinterner Größen

Die Analyse der notwendigen Informationsflüsse, Kommunikationsschnittstellen und zu speichernden Daten im Rahmen der Ist-Analyse (siehe Kapitel 6) ermöglichte eine grobe Einschätzung, welche Informationsträger, Logikeinheiten und Sensoren näher in Betracht gezogen werden konnten. Eine weitere Eingrenzung der infrage kommenden Komponenten erfolgte unter anderem auf Basis der Anforderungen an die Energieversorgung und die Datenübertragungsraten, der räumlichen Beschränkungen des Werkzeugs, der Einschränkungen aufgrund des Bearbeitungsprozesses und der Verfügbarkeit von Software-Stacks, Real Time Operating Systems und der zugehörigen integrierten Entwicklungsumgebungen (Integrated Development Environment, IDE).

Nach der Erstellung des finalen Prototyps erfolgten zunächst einige Labor- und im Anschluss daran mehrere Feldversuche. Hierfür wurde das gesamte CPS SmartTool exemplarisch bei den Anwenderunternehmen umgesetzt, um die praktische Anwendbarkeit des Systems zu demonstrieren.

Die einzelnen Komponenten des sensorischen Werkzeughalters und die Versuchsergebnisse werden im Folgenden detailliert erläutert. Abschließend erfolgt eine Abgrenzung zu anderen Systemen.

## 7.4.1 Sensorischer Werkzeughalter

Um über den sensorischen Werkzeughalter eine zuverlässige Zustandsüberwachung ermöglichen zu können, wurden vier Themengebiete detailliert betrachtet, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Dies sind:

- Platzierung der Elektronik
- Auswahl der Sensorik
- Übermittlung der Daten
- Energieversorgung

### Platzierung der Elektronik

Die größte Herausforderung bei der Anbringung zusätzlicher Elemente an Werkzeugaufnahmen liegt im begrenzten Einbauraum. Werkzeugaufnahmen sollen im Allgemeinen so klein wie möglich gestaltet werden, damit ihre Außenkontur bei der Bearbeitung nicht stört oder gar zu Kollisionen führt (Störkontur). Jegliche Zusatzelemente an der Außenkontur eines Werkzeughalters bewirken daher eine vergrößerte Störkontur. Darüber hinaus ist ein Großteil der Außenflächen des Werkzeughalters mit Funktionsflächen belegt, die für den Betrieb des Werkzeugs benötigt werden und nicht verändert werden dürfen (siehe Abbildung 23). Diese sind in der nachfolgenden Abbildung rot markiert. Alle veränder- und daher verwendbaren Flächen sind grün markiert.

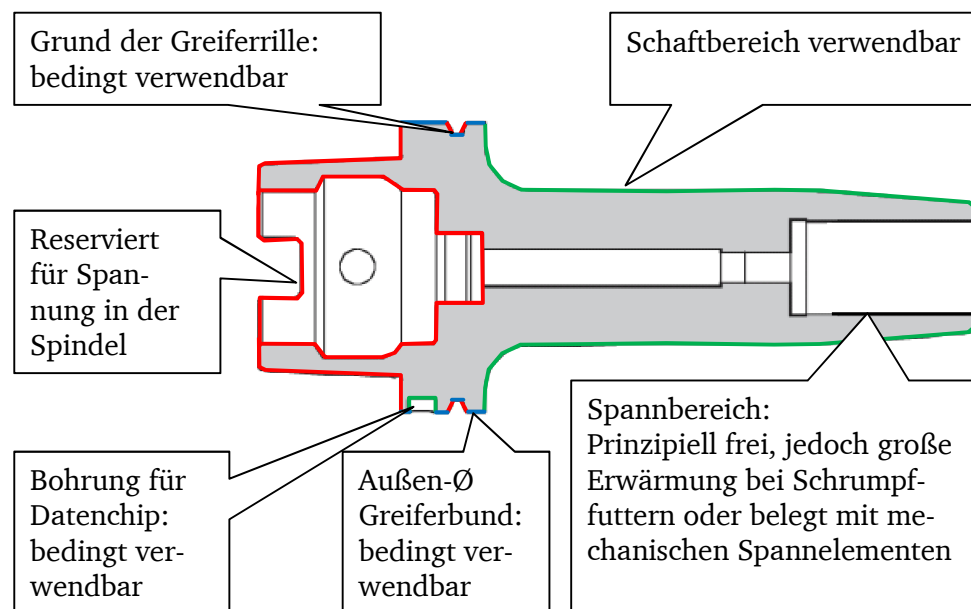


Abbildung 23: Funktionsflächen an einem Werkzeughalter mit HSK-Schnittstelle

Werkzeugaufnahmen, die Sensorik enthalten, sind zwar bereits auf dem Markt verfügbar, allerdings werden bei diesen Systemen große Kompromisse eingegangen. Die Elektronik wird in aller

Regel auf die Außenkontur des Werkzeugs aufgesattelt. Oft muss hierfür erst Platz geschaffen werden, beispielsweise indem der Halter verlängert wird. Bei der Zerspanung mit einem derartigen Werkzeug wird somit nicht unter realen Bedingungen, also mit möglichst kurz auskragenden Werkzeugen, gearbeitet. Weiterhin schließt die vergrößerte Störkontur bestimmte Bearbeitungen bereits im Vorhinein aus. Solche Systeme werden daher meist nur für den Versuchsbetrieb verwendet, um beispielsweise das Verhalten verschiedener Fräswerkzeuge zu vergleichen. Die Erkenntnisse, die so gewonnen werden, lassen sich daher nur bedingt auf den realen Einsatz in der Produktion übertragen.

Um diese Problematik zu umgehen, wird die Elektronik idealerweise ins Innere des Werkzeughalters verlegt (siehe Abbildung 24). Hierfür wurde im Projekt SmartTool ein Konzept entwickelt und in Form einer ringförmigen Nut um den Anschluss für das Kühlmittelübergaberohr umgesetzt. Die Unterbringung der Elektronik in diesem sehr begrenzten Einbauraum macht eine extreme Miniaturisierung der elektronischen Komponenten notwendig.

Die Unterbringung der Elektronik außerhalb des je nach Werkzeug variablen Schaftbereichs erlaubt es, nahezu alle Werkzeughalter mit Sensorik und der dazugehörigen Elektronik auszustatten und unter realen Bedingungen zu betreiben. Die Komponenten können also unabhängig von der Art und Größe des Werkzeugs immer an der gleichen Stelle innerhalb der Werkzeugaufnahme untergebracht werden. Beispielhaft wurde dies im Projekt für die Steilkegel (SK)- und die Hohlchaftkegel (HSK)-Schnittstellen konzipiert (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25). Da die Außenkontur des Halters völlig unbeeinflusst bleibt, kann mit dem Werkzeug weiterhin unter realen Bedingungen zerspant werden. Selbst eine bestehende Werkzeugaufnahme kann mit dem System nachgerüstet werden.

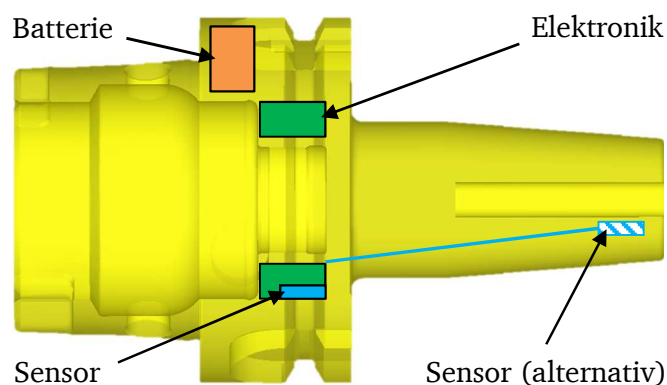


Abbildung 24: Einbauraum in einer Werkzeugaufnahme mit HSK-Schnittstelle

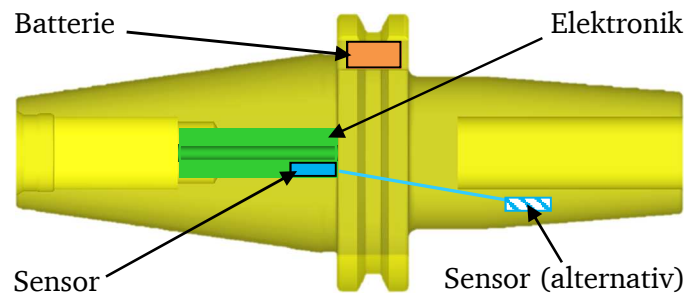


Abbildung 25: Einbauraum in einer Werkzeugaufnahme mit SK-Schnittstelle

Im Projekt SmartTool wurde exemplarisch ein Prototyp basierend auf einer HSK-A 63-Aufnahme mit der beschriebenen ringförmigen Nut im Inneren entwickelt. Der Aufbau ist in Abbildung 26 dargestellt. Das Batteriefach (siehe Abbildung 26) und die Antenne (siehe Abbildung 28) sind von außen sichtbar und zugänglich und fügen sich in die Funktionsflächen ein. Gleichzeitig wurde bei der Integration der Elektronik darauf geachtet, dass der Werkzeughalter weiterhin mit Kühlschmierstoffen durchflossen werden kann.

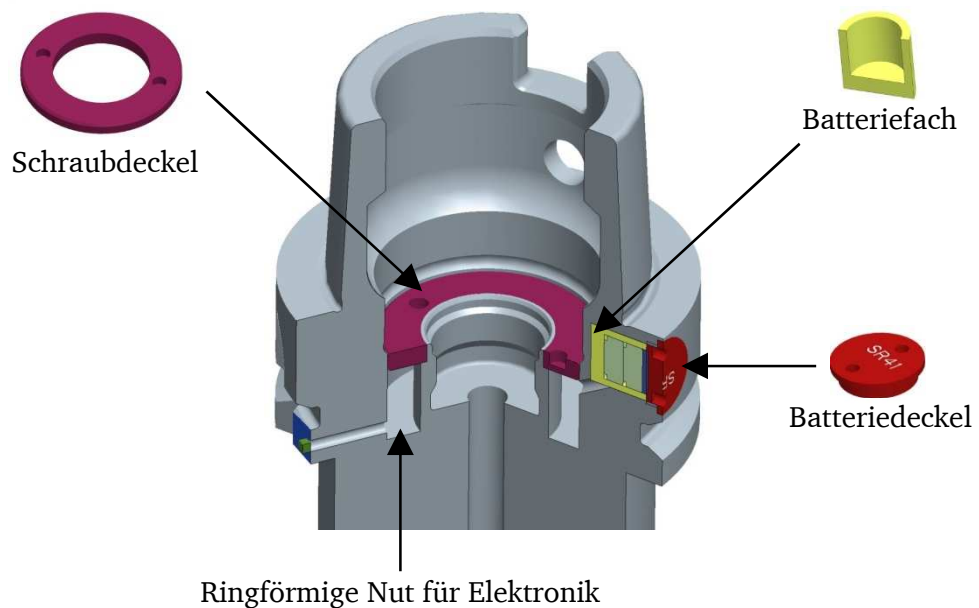


Abbildung 26: HSK-A 63 Aufnahme

### Auswahl der Sensorik

Die Wahl des Sensortyps, der in die Werkzeugaufnahme integriert wird, hängt davon ab, welche Informationen geliefert werden sollen. Einen Mehrwert können u. a. folgende Sensoren generieren:

- Beschleunigungssensor zur Messung der Vibration des Werkzeughalters
  - Zustandsüberwachung der Werkzeugschneiden (Verschleiß)
  - Detektion eines Schneidenbruchs

- 
- Überprüfung der Prozessstabilität
  - Dehnmessstreifen zur Erfassung der Verformung des Werkzeughalters
    - Schnitt- und Vorschubkräfte bzw. -momente
    - Werkzeugverschleiß
    - Vermeidung eines Werkzeugbruchs durch Überlast
  - Temperatursensor
    - Erwärmung des Werkzeugs
    - Korrekte Funktion der Kühlung
  - Drucksensor
    - Überwachung des Kühlmitteldrucks
    - Überwachung des Spanndrucks bei Hydrodehnspannfuttern
  - Durchflusssensor
    - Überwachung des Kühlmittelflusses

Durch den Verwendungszweck der Sensorik wird auch ihre Platzierung bedingt. Wenn die Überwachung des Zerspanungsprozesses bzw. des Werkzeugs im Vordergrund steht, sollten die Sensoren möglichst in der Nähe des Werkzeugs angebracht werden. Allerdings sind auch hier, wie bei der Unterbringung der Elektronik, Randbedingungen zu beachten.

Bei vielen Typen von Werkzeugaufnahmen ist die Wandung im Spannbereich für das Werkzeug nicht frei verfügbar. Bei Hydrodehnspannfuttern verlaufen hier beispielsweise Ölkanäle, die nicht verletzt werden dürfen. Bei Schrumpffuttern wird der Spannbereich beim Werkzeugwechsel stark erhitzt, was die Sensoren oder deren Zuleitungen beschädigen könnte. Nicht zuletzt entscheiden selbstverständlich auch die Kosten für die Anbringung über die Platzierung der Sensoren.

In den meisten Fällen ist es ausreichend, die Sensoren im Bereich der ringförmigen Ausnehmung für die übrige Elektronik anzubringen. Selbst in diesem Fall sind die Sensoren deutlich wirkstellennäher untergebracht, als es bei bisherigen Überwachungsverfahren üblich war (z. B. Schwingungsmessung an der Spindel oder am Werkstück). Zudem ist der Fertigungs- und Montageaufwand bei dieser Variante minimal, da keine Kanäle und Einbauträume für die Sensoren und deren Anbindung geschaffen werden müssen. Ein Blick in das Innere der Werkzeugaufnahme und auf den Schraubdeckel, der die Elektronik schützt, ist in Abbildung 27 zu sehen.



Abbildung 27: Blick in das Innere der Werkzeugaufnahme und auf den Schraubdeckel, der die Elektronik schützt

Im Rahmen des Projekts war es das Ziel, als exemplarische Lösung für einen sensorischen Werkzeughalter Schwingungen am Werkzeug zu messen und zu übertragen. Zur Erfassung von Schwingungen stehen verschiedene Prinzipien zur Verfügung, darunter kapazitiv, induktiv, optisch, resistiv, elektromagnetisch, magnetostruktiv, piezoelektrisch und piezostriktiv. Da während verschiedener Bearbeitungsprozesse hohe Drehzahlen von bis zu  $20.000 \text{ min}^{-1}$  auftreten, führt bereits ein kleiner Versatz zwischen der räumlichen Anbringung des Sensors zur Drehachse zu einer großen Zentrifugalbeschleunigung. Diese Beschleunigung ist nahezu statisch und wird durch die Bearbeitungsdrehzahl hervorgerufen. Sie beinhaltet keine Informationen über den Verschleißzustand des Werkzeugs sondern führt bei den meisten Messprinzipien lediglich zu einem hohen Offset der Messwerte. Soll diese Beschleunigung bereits durch das Messprinzip gefiltert werden, um eine unnötig hohe Abtastung der Amplitude zu vermeiden, verbleiben optische, elektromagnetische und piezoelektrische Prinzipien.

Elektromagnetische Sensoren erzeugen lediglich ein Signal, wenn sich deren Magnetfeld ändert. Um dies zu erreichen, muss jedoch ein Permanentmagnet schwingfähig gelagert werden. Die hohen Zentrifugalbeschleunigungen während des Zerspanprozesses wirken der nötigen Schwingfähigkeit allerdings entgegen. Auch optische Messprinzipien sind durch den geringen Platz und die rauen Bedingungen innerhalb eines Werkzeughalters nicht zur Messung von Vibrationen geeignet.

Piezoelektrische Sensoren zeichnen sich dagegen dadurch aus, dass sie keine statischen Beschleunigungen aufnehmen und sich durch ihre spröde und sehr harte Kristallstruktur nur im Promillebereich verformen. Des Weiteren sind sie klein genug, um in einem Werkzeughalter verbaut zu werden, und kostengünstig. Aus diesen Gründen wurde bei der Prototypenentwicklung auf diesen Sensortyp gesetzt.



---

Zur Auswertung piezoelektrischer Sensoren werden spezielle, rauscharme Ladungsverstärker benötigt, um die Signale zu digitalisieren. Der Verstärker muss den gesamten für die Verschleißerkennung notwendigen Frequenzbereich konstant verstärken und somit die Ladungsänderung in einen für einen Analog-Digitalwandler erfassbaren Spannungswert konvertieren. Die so erhaltenen Daten müssen von einem Mikrocontroller entsprechend verarbeitet oder direkt weitergeleitet werden. Eine direkte Verarbeitung spart dabei gegenüber einer Übertragung von Rohdaten erhebliche Mengen Energie ein und benötigt zudem nur eine verhältnismäßig langsame Datenübertragung, die nicht stabil sein muss.

### Übermittlung der Daten

Anders als bei vielen vorhergehenden Projekten wurde bei dieser Entwicklung auf eine induktive Datenübertragung verzichtet und stattdessen eine Funkverbindung implementiert. Die an den Werkzeughalter angebrachte Antenne ist in Abbildung 28 zu sehen.



Abbildung 28: Sicht auf störkonturfreie Antenne (weiß)

Durch diese Vorgehensweise wird ein deutlicher Vorteil des CPS ermöglicht: Es sind keine Umbaumaßnahmen des Bearbeitungsraums vonnöten, da der Empfänger auch außerhalb des Bearbeitungsraums liegen kann. Diese Möglichkeit besteht bei der induktiven Datenübertragung hingegen nicht, weil äußerst geringe Abstände zwischen Sender und Empfänger notwendig sind, um während der Fertigung größere Datenmengen via Induktion senden zu können. Daher muss hier das Übertragungssystem in den Bearbeitungsraum integriert werden. Durch den blockierten Raum kann es zu Störungen des Bearbeitungsprozesses kommen. Diese so genannten Crashes können z. T. nur durch erheblichen Integrationsaufwand vermieden werden. Eine funkbasierte Lösung ist somit die bessere Lösung.

Die Wahl des Übermittlungskanals ist im Wesentlichen von den benötigten Datenraten abhängig. Bluetooth Low Energie (BLE) ist in der Lage, einen großen Bereich an Datenraten bei minimalem

---

Energieverbrauch abzudecken und wurde u. a. aus diesen Gründen für die Datenübertragung ausgewählt. Sowohl größere Mengen an Rohdaten als auch seltene, kleine, effiziente Statusnachrichten können problemlos übermittelt werden. Mithilfe des integrierten 2,4 GHz-Transceivers werden die erfassten Daten drahtlos an einen Empfänger weitergegeben, der alle Informationen sammelt und in einer zentralen Datenbank hinterlegt. Dieser Empfänger kann aufgrund der Verwendung von BLE auch ein Smartphone oder ein Single-Board-Computer sein. Durch die Nutzung dieses Funkstandards ist eine Anbindung an bestehende Systeme problemlos möglich. Des Weiteren ist BLE ein Standard, der im Consumer-Bereich sehr weit verbreitet ist, wodurch leistungsfähige und zugleich effiziente Hardware in großen Mengen günstig verfügbar ist.

### **Energieversorgung**

Es gibt Bestrebungen, Werkzeuge von der Spindel her über elektrische Kontakte mit Energie und Steuersignalen zu versorgen. Dies ist zumindest dann notwendig, wenn mechanische Verstellvorgänge in der laufenden Zerspanung durchgeführt werden sollen. Die hierfür notwendige Antriebsleistung lässt sich realistisch nur durch externe Versorgung bereitstellen. Nachteilig dabei ist der große Aufwand, der an der Werkzeugmaschine getrieben werden muss. Speziell bei Fräsmaschinen müssen Energie und Signale über Schleifringkontakte oder dergleichen an die drehende Spindel übergeben werden. Selbst die Verkabelung innerhalb der Spindel bereitet Schwierigkeiten, da bei modernen Spindelsystemen der Einbauraum nahezu vollständig ausgenutzt ist. Schließlich bleiben die Kontaktstellen zwischen Spindel und Werkzeughalter ein Problem, da sie beim Werkzeugwechsel offen liegen und leicht verschmutzen können.

Für eine induktive Energieversorgung der Elektronik in der Werkzeugaufnahme wäre eine Vorrichtung nötig, die der Spindel nachgeführt wird. Da eine aufwändige Umrüstung der Werkzeugmaschine umgangen werden sollte, kam diese Art der Energieversorgung für SmartTool nicht infrage. Alternativ wurde angedacht den Fluss des Kühlschmierstoffes auszunutzen, indem beispielsweise eine kleine Turbine in den Werkzeughalter eingesetzt werden könnte. Der hohe Druck des Kühlschmierstoffes (50 bar) würde Bauteile in passender Größe allerdings zerstören und wegreißen.

Eine weitere Idee beinhaltete die energetische Versorgung der intelligenten Werkzeugaufnahme nach dem Laser-Power-Beaming-Konzept. Hier wird ein fokussierter Laserstrahl auf eine Photodiode gerichtet bzw. im Fall der intelligenten Werkzeugaufnahme auf einen Ring aus Photodioden. Als erhebliche Schwierigkeit wird sich hier allerdings der Kühlmittelnebel erweisen, der das Licht – und damit auch die Energie – streut. Es müssten teure, sehr empfindliche Photodioden verwendet werden, um genug Energie zu gewinnen, damit die Elektronik funktionieren kann. Tropfen auf der Linse vor den Photodioden würden ebenfalls zu Streuungen führen, könnten

---

aber ggf. mit Druckluft beseitigt werden. Die Implementierung einer optischen Energieversorgung würde allerdings erhebliche Umbaumaßnahmen des Bearbeitungsraums erfordern, sodass unter Abwägung aller Vor- und Nachteile auch diese Überlegung verworfen werden musste.

All dies steht im Kontrast zu einem robusten, plug-and-produce-fähigen System. Aus diesem Grund wird in SmartTool auf die Kombination von äußerst sparsamer Elektronik und handelsüblichen Knopfzellen gesetzt. Der Blick auf das geöffnete Batteriefach in der HSK-63-Aufnahme ist in Abbildung 29 zu sehen.



Abbildung 29: Blick auf das geöffnete Batteriefach

#### **7.4.2 Versuche**

Um die Funktionsfähigkeit des sensorischen Werkzeughalters zu testen, wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, die im Folgenden näher beschrieben werden. Zum einen wurde der sensorische Werkzeughalter mit einer Modal-Schwingprüfanlage (Shaker) angeregt und zum anderen in einer Werkzeugmaschine mit und ohne Bearbeitung getestet.

##### **Shaker-Versuche**

Das SmartTool-Werkzeugspannfutter wurde mit einem Shaker der Fa. TIRA GmbH (Typ S 51110-M) angeregt. Zur Verifizierung der Sensordaten wurde im Experiment ein Inductively Coupled Plasma (ICP)-Kraftsensor (PCB-208C02) zwischen Shaker und Spannfutter installiert. In Abbildung 30 (links) ist der Aufbau des Versuchs zu sehen, hier ein Aufbau ohne Kraftsensor.

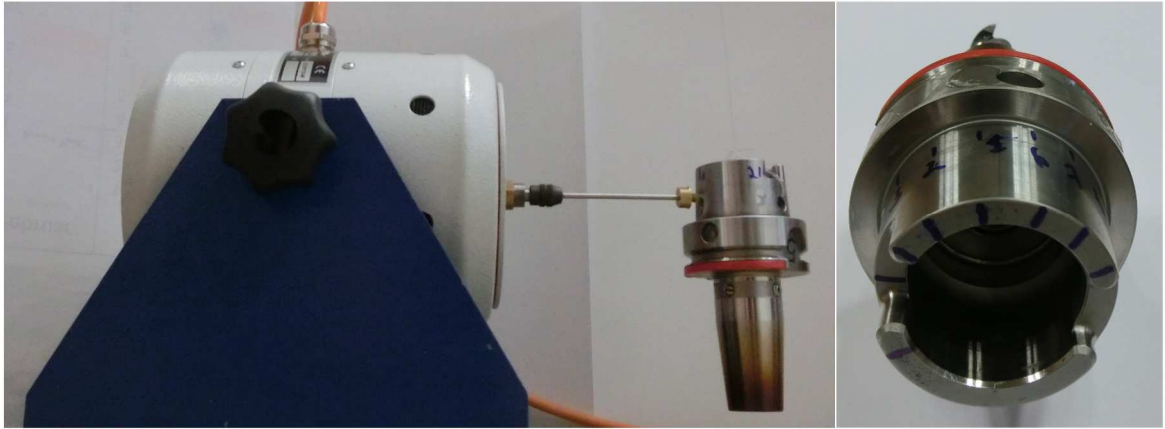


Abbildung 30: Versuchsaufbau Anregung des SmartTool durch Shaker (links) und Anregungsrichtungen (rechts)

Da der verbaute Sensor ein Schocksensor ist und somit keine eindeutigen Achszuordnungen hat, aber eine gewisse „Vorzugsrichtung“ besitzt, wurde das Futter aus verschiedenen Richtungen angeregt. In Abbildung 30 (rechts) ist das Spannfutter mit den Kennzeichnungen (blaue Striche) der Befestigungspunkte bzw. den Anregungsrichtungen des Shakers zu sehen.

Zur Untersuchung des Prototyps wurden mit dem Shaker verschiedene Frequenzen von 100 Hz bis 500 Hz in 100 Hz-Schritten angeregt und dabei auch die Anregungsamplituden variiert. Problematisch stellte sich die Interpretation bezüglich der tatsächlichen Intensität mittels des SmartTool-Signals dar. Die Werte, die von der Sensorik gesendet werden, haben keinerlei physikalischen Bezug. Durch den Abgleich mit dem Kraftsensor konnte dieser physikalische Bezug in einem gewissen Maße hergestellt werden. Dass der Sensor eine „Vorzugsrichtung“ besitzt, ist beim Vergleich der Messdaten zwischen SmartTool und Kraftsensor deutlich zu erkennen. Dies erschwert allerdings die exakte Zuordnung der physikalischen Größen zu den empfangenen Werten, da die exakte Einbaulage des Sensors auf der Platine nach dem Vergießen nicht bekannt ist. In Abbildung 31 ist diese Richtungsabhängigkeit für eine Messung bei 500 Hz Anregung zu sehen. Die in Abbildung 30 (rechts) zu sehenden Messrichtungen sind als Bereiche 1-8 bezeichnet.

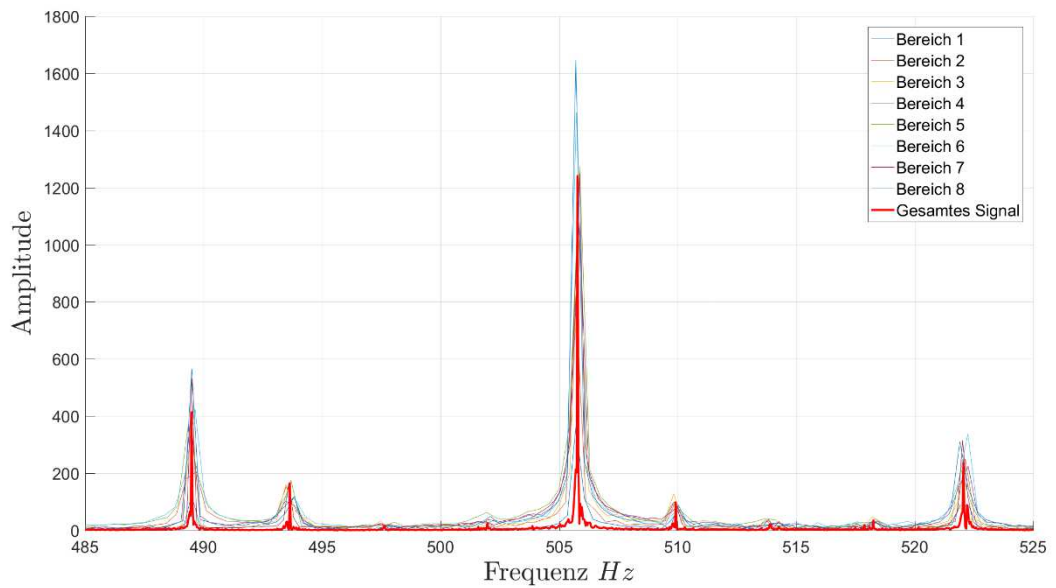


Abbildung 31: Spektrum des SmartTool in den acht gemessenen Richtungen bei 500 Hz Anregung

Der Vergleich zwischen der Kraftmessdose und dem SmartTool bei 500 Hz wird in Abbildung 32 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass es eine kleine Abweichung von ca. 6 Hz bei den Messdaten des SmartTool gibt. Allerdings ist die dominante Frequenz, abgesehen von der Abweichung wie bei der Kraftmessdose, bei 500 Hz zu finden, wenn auch deutliche Störfrequenzen zu erkennen sind.

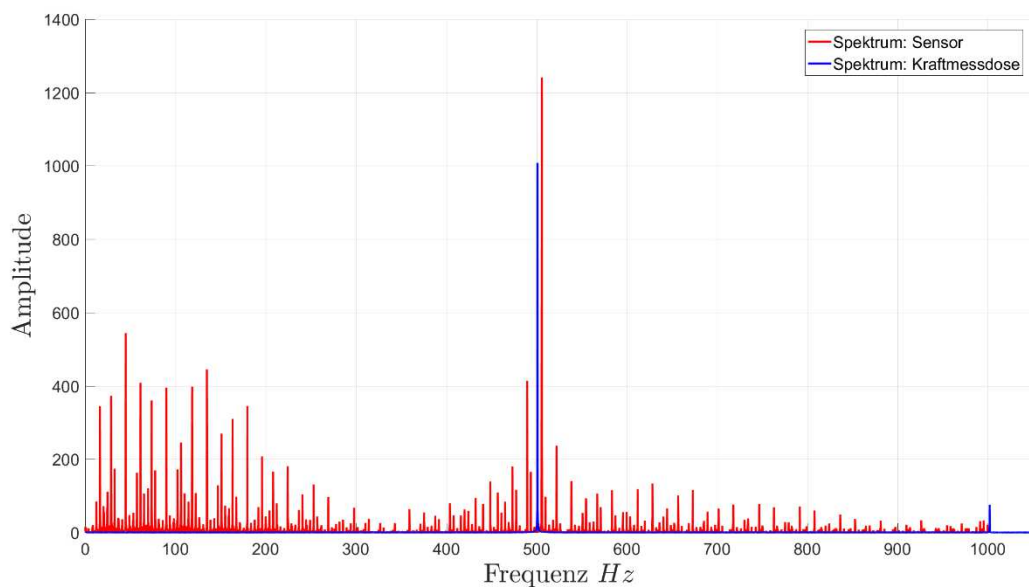


Abbildung 32: Vergleich der Messdaten zwischen Kraftmessdose (blau) und SmartTool-Sensor (rot)

---

## Versuche auf der Werkzeugmaschine

Nach den vielversprechenden Ergebnissen der Versuche mit der Anregung durch den Shaker wurde das SmartTool auf der Versuchsmaschine DMC V70 linear der Fa. DMG eingerichtet. Zu Beginn wurden einfache Versuche unter Drehzahl ohne Bearbeitung durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Drehfrequenz im Sensorsignal erkennbar ist. Hierbei war bereits ersichtlich, dass das Sensorsignal unabhängig von der Drehzahl nicht interpretierbar ist. Bei Veränderung der Drehzahl war dies im Zeitsignal ersichtlich. Allerdings lieferte eine Frequenzanalyse keine nachvollziehbaren Ergebnisse. Anschließend wurden weitere Versuche mit Bearbeitung durchgeführt. Die typischen Schnittparameter wie Drehzahl  $n$ , Vorschub  $f$  und Eingriffstiefe  $a_e$  wurden variiert, aber ohne ein interpretierbares Ergebnis zu erhalten. Wie bei den Versuchen ohne Bearbeitung war eine Veränderung im Zeitsignal erkennbar. Im Frequenzbereich war allerdings weder die Zahneingriffsfrequenz noch die Drehfrequenz erkennbar.

Um eine Fehlinterpretation der Messergebnisse auszuschließen, wurden Fräsversuche mit den gleichen Schnittparametern und anderen Messsystemen durchgeführt. Es kamen hierbei das sensorintegrierte Werkzeugspannfutter Spike der Fa. pro-micron GmbH & Co KG und ein Kistler 3-Komponenten-Dynamometer (Kraftmessplattform (KMP); Typ 9255A) zum Einsatz. Abbildung 33 zeigt die Messdaten der drei Systeme in Zeit- und Frequenzdarstellung. Die mit den anderen Messsystemen durchgeführten Versuche bestätigten die vorherigen Ergebnisse. Die Schnittparameter waren  $6.000 \text{ U/min}$ ,  $v_f = 1700 \text{ mm/min}$ ,  $a_e = 15 \text{ mm}$ ,  $a_p = 3 \text{ mm}$ , und es wurde das Material Al Mg 4,5 Mn 0,7 mit dem Werkzeug VHM Ratiofräser RF100-A 16 mm der Fa. Gühring bearbeitet. In weiteren Versuchsreihen muss die Ursache geklärt werden, warum aktuell kein Rückschluss auf den Fräsprozess mittels des sensorischen Spannfutters gezogen werden kann.

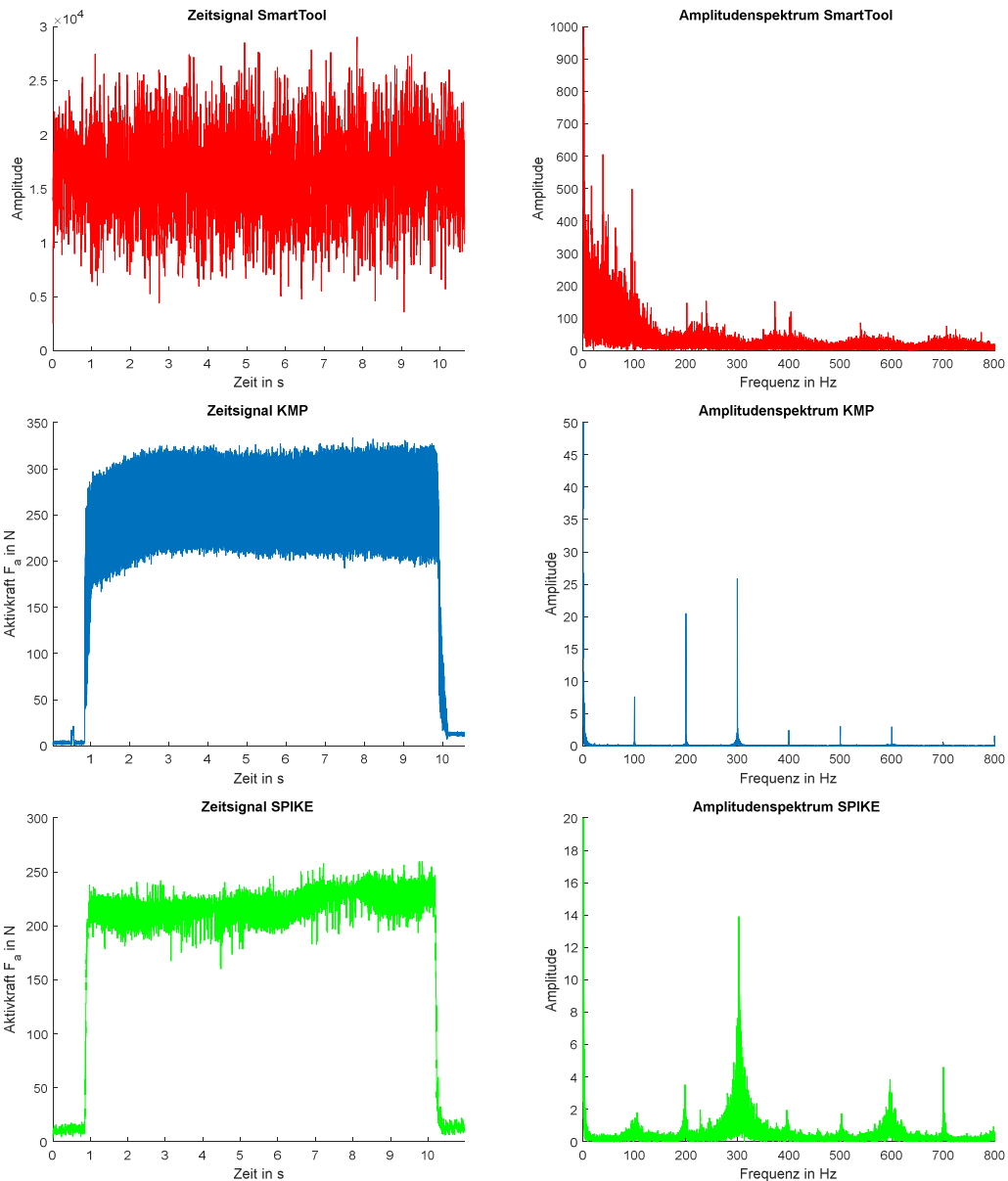


Abbildung 33: Vergleich der Messsysteme KMP und SPIKE mit dem SmartTool-Spannfutter

### 7.4.3 Einordnung des Konzepts zum sensorischen Werkzeughalter

#### Entwicklung des Fraunhofer IIS

Auf der Embedded World-Messe im Februar 2016 wurde unter dem Themengebiet Industrie 4.0 das Konzept eines intelligenten Werkzeughalters durch das Fraunhofer IIS vorgestellt. Zu den wichtigsten Merkmalen gehörten die Erfassung der räumlichen Lage des Werkzeughalters sowie von Informationen zur Maschine und zum derzeitigen Prozessschritt. Weiterhin sollten Informationen über BLE und Near Field Communication übertragen werden. Ein detaillierteres Gespräch mit einem Mitarbeiter des Fraunhofer IIS ergab, dass sich dieser Werkzeughalter noch in der

---

Konzeptionsphase befand. Nachforschungen im April 2017 lassen vermuten, dass die weitere Forschung in diesem Bereich vom Fraunhofer IIS eingestellt wurde.

### **Werkzeughalter mit integrierter Elektronik von Sandvik**

Im September 2016 wurde auf der AMB – Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung von der Firma Sandvik ein Werkzeughalter mit integrierter Elektronik vorgestellt. Dort wurde sichtbar, dass bei diesem Werkzeughalter, im Gegensatz zu SmartTool, die Abmessungen verändert wurden. Nähere Informationen zu diesem System wurden dem Konsortium nicht zur Verfügung gestellt.

### **Spike von pro-micron**

Bereits im Jahr 2012 wurde der sensorische Werkzeughalter Spike von der Firma pro-micron vorgestellt. Dieser misst Axialkräfte, Torsionsmomente sowie Biegemomente in x- und y-Richtung und überträgt die Werte auf einer Frequenz von 2,45 GHz. Die maximal zulässige Drehzahl wird mit  $18.000 \text{ min}^{-1}$  angegeben, die Reichweite beträgt 2 bis 3 m, und der integrierte Akkumulator versorgt das System bis zu 12 Stunden mit Energie. Der in SmartTool entwickelte sensorische Werkzeughalter ist demjenigen von pro-micron somit sehr ähnlich. Entscheidende Vorteile von SmartTool liegen in den unveränderten Abmessungen trotz integrierter Elektronik und im um den Faktor 30 bis 60 niedrigeren Preis.

## **7.5 IT-Infrastruktur**

Voraussetzung für die Erhöhung der Informationstransparenz im Werkzeugkreislauf ist eine geeignete Systemarchitektur, welche die Kommunikation und neue Informationsflüsse zwischen den Subsystemen ermöglicht, hinzukommende Schnittstellen unterstützt, aber auch bereits bestehende Informationsflüsse adaptiert. In diesem Kapitel wird die IT-Infrastruktur für den Einsatz des CPS SmartTool in einem Fertigungsnetzwerk beschrieben. Hierfür werden zunächst die Anforderungen an das Netzwerk erläutert. Anschließend wird die Ausgestaltung der Hard- und Software beschrieben.

### **7.5.1 Netzwerk**

Bei der Integration des SmartTool-Konzepts in ein (Fertigungs-)Netzwerk muss die grundlegende IT-Infrastruktur, bestehend aus allgemeinen Netzwerkanschlüssen (LAN), Managed Switches und Serverhardware vorhanden sein.

Die Netzwerkzugänge für die im Projekt eingesetzte Hardware sollten frei konfigurierbar sein. Aus Sicherheitsgründen sollten ausschließlich diejenigen Ports freigegeben werden, die für die



---

Kommunikation der Komponenten untereinander notwendig sind. Die Anforderungen an die Server-Hardware sind stark von der Anzahl der im Werkzeugkreislauf eingesetzten CPS SmartTool abhängig und sollte entsprechend dimensioniert werden (Central Processing Unit (CPU), Random Access Memory (RAM), Festplatte).

### **Virtual Local Area Network (VLAN)**

Ein VLAN ermöglicht einerseits die Nutzung einer bestehenden physischen Netzwerkinfrastruktur und andererseits eine klare Abschottung von anderer sicherheitsrelevanter Infrastruktur bei gleichzeitiger Absicherung des SmartTool-(Sub-)Netzes. Eine Entscheidung zwischen Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) oder festem Internet Protocol (IP) muss abhängig von der eingesetzten Hardware getroffen werden (realisierbar über VLAN oder Subnetz).

### **MAC-Adressen**

Die Media-Access-Control (MAC)-Adresse ist die Hardware-Adresse jedes einzelnen Netzwerkkadapters. Diese kann als eindeutiger Identifikator eines Geräts (bzw. des Netzwerkkadapters dieses Gerätes) in einem Rechnernetz dienen. Das im Projekt eingesetzte Embedded Board Odroid C2 verfügt über eine feste MAC-Adresse und bietet über Android nicht die Möglichkeit, eine IP-Adresse zu vergeben. Deswegen ist es in diesem Fall zwingend erforderlich, über den Switch im Netzwerk der MAC-Adresse im VLAN oder Subnetz eine IP-Adresse zuzuteilen (DHCP). Hierdurch ist eine vom Netzwerk-Port unabhängige Identifikation des Geräts möglich.

Durch die eindeutige Identifikation der MAC-Adresse kann eine Verbindung zu unrechtmäßig angeschlossenen oder nicht für den Einsatz an diesem Standort vorgesehenen Geräten verhindert werden. Das ist eine Grundvoraussetzung, um die Hardware für den Einsatz in einem Sicherheitsbereich zu qualifizieren. Wie oben bereits ausgeführt, setzt dies wiederum ein konfigurierbares und konfiguriertes Netzwerk am Einsatzort und die entsprechende Infrastruktur hierfür voraus.

### **Ports**

Eine weitere Sicherheitsmaßnahme ist die Reduzierung der offenen Kommunikations-Transmission Control Protocol (TCP)-Ports im Netzwerk. Die Kommunikation der CPS bzw. der eingesetzten Embedded Hardware im lokalen Netz sollte ausschließlich mit dem STC-Server zulässig sein. Die Kommunikation der Applikationen mit dem STC-Server, wie auch als Nutzer mit der Web-Oberfläche des STC, findet über den Port 80 bzw. 443 statt. Bei Nutzung eines externen STC-Servers muss die Kommunikation über Port 80/443 aus dem jeweiligen VLAN oder Subnetz nach

---

außen gegeben sein. Für den produktiven Einsatz sollte unter Betrachtung von Sicherheitsaspekten auf eine verschlüsselte Verbindung gesetzt werden (Port 443). Selbstsignierte Zertifikate werden zurzeit noch nicht unterstützt.

Für den Pilotbereich beim Projektpartner HDM wurde innerhalb des Fertigungsnetzes ein VLAN-Netz konfiguriert, um eine Kommunikation ausschließlich zwischen den beteiligten Hardware-Systemen wie den Embedded Boards, des STC-Servers, der Werkzeugvermessung und auch einer OPC UA-fähigen Werkzeugmaschine zu gewährleisten. Zusätzlich notwendige Netzwerkanlüsse wurden eingerichtet und physisch installiert. Es wurden nur die für den Betrieb notwendigen Ports freigeschaltet und jegliche Kommunikation mit anderen Teilen des Netzwerks unterbunden. Dabei war es sowohl möglich, die angeschlossenen Geräte über die MAC-Adresse zu verifizieren, als auch durch eine zuvor auf dem Gerät vergebene IP den Zugriff zu gewähren, was den Test der unterschiedlichen Hardware, welche nicht immer über eine feste MAC-Adresse verfügte, möglich machte.

### **7.5.2 Hardware**

Die Anforderungen an die Hardware-Plattform für das CPS SmartTool waren eine gute Leistungsfähigkeit, eine gute Ausstattung mit Schnittstellen (bzw. Erweiterbarkeit über Universal Serial Bus (USB)-Geräte) bei gleichzeitig möglichst geringem Preis.

Grundvoraussetzungen an die Hardware für jede SmartTool-Arbeitsstation sind:

1. RJ-45 Netzwerkanschluss und eine einzigartige IP-Adresse
2. Tastatur, Maus und High Definition Multimedia Interface (HDMI) Monitor in einer gängigen Auflösung oder ein Touchscreen (HDMI und USB)
3. Android Version 5.1.x oder höher

#### **Einplatinenrechner Odroid C2**

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Einplatinenrechnern (engl. Single-Board Computer (SBC)); im Folgenden auch als Boards bezeichnet) entwickelt. SBC sind Computersysteme, bei denen sämtliche zum Betrieb nötigen elektronischen Komponenten auf einer einzigen Leiterplatte zusammengefasst sind, was den wesentlichen Vorteil hat, dass solche Systeme geringe Dimensionen haben (z. B. 150 mm x 90 mm x 20 mm). Da sie unter anderem in modernen Smartphones verbaut werden, sind sie in großen Stückzahlen bei gleichzeitig geringen Kosten verfügbar. Zudem werden immer leistungsfähigere Komponenten entwickelt. Der aktuelle Trend geht dahin, immer mehr Funktionen (Standardschnittstellen, A/D-Wandler usw.) des Einplatinenrechners direkt auf demselben Chip wie der CPU zu integrieren (siehe System-on-a-Chip).

---

Dadurch können auch bei steigender Funktionalität der Stückpreis und die Dimensionen dieser Rechner gesenkt werden.

Im Projekt wurde eine Reihe von Einplatinenrechnern getestet und in diversen Praxistests eingesetzt. Unter diesen zeichnet sich besonders das Odroid C2 [HARD17] durch eine gute Verfügbarkeit und guten Software-Support aus. Durch die hohe Leistungsfähigkeit der Hardware, auch in Verbindung mit Android, kam es im Testbetrieb nie zu Leistungsengpässen. Zudem ermöglicht sie die Darstellung der App-Programm-Oberflächen in Full HD (1920x1080).

Bluetooth-Unterstützung für die Sensordatenerfassung erfolgte mit einem Bluetooth-Dongle, der über einen Certificate Signing Request (CSR) 4.0-Chip verfügt. Displays können nur digital angesteuert werden, da das Odroid C2 lediglich einen HDMI-Ausgang bietet und keinen D/A-Converter besitzt. Beim Einsatz von Android, wie im Falle von SmartTool, ist auch der Einsatz von Touch-Displays möglich, welche über die USB-Schnittstelle angesteuert werden.

Technische Daten des Boards Odroid C2 (siehe Abbildung 34)

- Amlogic ARM® Cortex®-A53(ARMv8) 1.5Ghz quad core CPUs
- Mali™-450 GPU (3 Pixel-processors + 2 Vertex shader processors)
- 2Gbyte DDR3 SDRAM
- Gigabit Ethernet
- HDMI 2.0 4K/60Hz display
- H.265 4K/60FPS and H.264 4K/30FPS capable VPU
- 40pin GPIOs + 7pin I2S
- eMMC5.0 HS400 Flash Storage slot/UHS-1 SDR50 microSD Card slot
- USB 2.0 Host x 4, USB OTG x 1 (power + data capable)
- Android 5.1.1 + 6.0.1



Abbildung 34: Board Odroid C2

### **An Einplatinenrechner angeschlossene Hardware/Geräte**

In den Werkzeugkreislauf werden zahlreiche dieser Einplatinenrechner eingebracht, an die verschiedene Geräte angeschlossen werden. Dies sind DMC-Lesegeräte, RFID-Auswerteeinheiten und ein Bluetooth-Dongle von LogiLink. Über diese werden die im Werkzeugkreislauf relevanten Daten erfasst.

Optische Lesegeräte lesen DMC ein, dekodieren die im Code enthaltenen Informationen und übergeben sie als Text an die aufrufende Anwendung. Das Einlesen und Dekodieren von DMC mit einem tragbaren Geräte u. a. auf gebogenen Objekten (z. B. Schaftwerkzeug) mit metallisch glänzenden Oberflächen ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe und erfordert hochwertige Lesegeräte mit gestreuter Beleuchtung, um Reflexionen auf dem Objekt zu minimieren. Diese Anforderungen werden vom Cognex DataMan 8600 (siehe Abbildung 35) erfüllt. Dieser wird per USB an den Einplatinenrechner angeschlossen.



Abbildung 35: DMC-Lesegerät

Die RFID-Auswerteeinheit BIS U-6020-053 (siehe Abbildung 36) von Balluff wurde mithilfe eines Serial-USB-Adapters (RS232-USB) an allen im Projekt eingesetzten Einplatinenrechnern erkannt. Momentan gibt es in diesem Bereich noch kein standardisiertes, hersteller-unabhängiges Protokoll. Die software-technische Anbindung von RFID-Antennen bzw. -Ausleseeinheiten ist somit aufwändiger als die Integration von optischen Lesegeräten und muss immer herstellerabhängig implementiert werden. Die Funktion der SmartTool-Applikation, basierend auf Android 5.1.1 oder höher, im Zusammenspiel mit der Auswerteeinheit und dem STC-Server konnte erfolgreich nachgewiesen werden.



Abbildung 36: RFID-Auswerteeinheit

Um Bluetooth 4.0 LE mit dem Odroid C2 nutzen zu können, ist ein CSR 4.0 Chip notwendig. Der im Projekt eingesetzte Bluetooth-Dongle BLE LogiLink BT0015 USB Bluetooth V4.0 EDR Class1 Micro von LogiLink (siehe Abbildung 37) verfügt über diesen Chip und wurde erfolgreich unter Android im Zusammenspiel mit den Sensoren der entwickelten Applikation getestet.



Abbildung 37: BLE LogiLink

### Externe Systeme

Neben den Boards werden weitere externe Systeme mit dem STC-Server verbunden. Hierzu gehören die WZM-Steuerung via OPC UA, der Werkzeugschrank mit integriertem Tool Management System (GTMS), das Werkzeugvoreinstellgerät (Zoller/Zoller TMS) und ein System zur Verwaltung der Werkzeugstammdaten (integriert in GTMS oder Zoller TMS). Die Netzwerktopologie ist vereinfacht in nachfolgender Abbildung zu sehen.

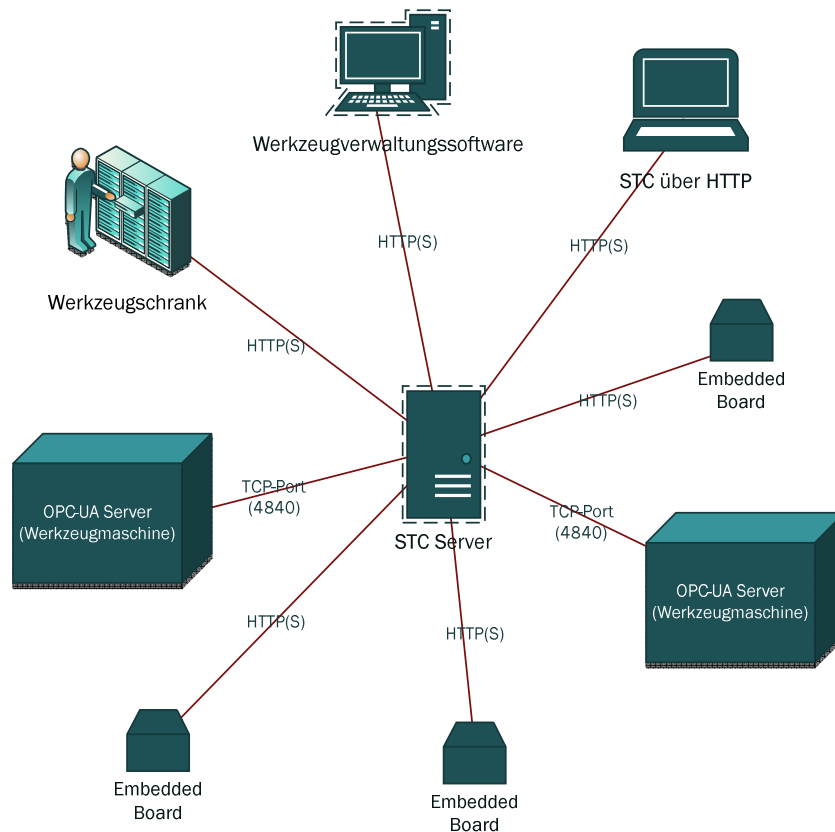


Abbildung 38: Allgemeine Netzwerktopologie (vereinfacht)

### 7.5.3 Software

Die Software-Module umfassen zwei Hauptkomponenten:

- die Serveranwendung und das Storage-System STC
- die SmartTool-App zur Anbindung der Systeme

#### SmartToolCenter

Das STC stellt die zentrale SmartTool-Datenbank-Anwendung im Werkzeugkreislauf dar. Es wird im lokalen (inhouse) Rechenzentrum des Unternehmens installiert und im internen Netz freigegeben. Die Hauptaufgaben des STC sind die Speicherung, Verwaltung und Aufbereitung der im Werkzeugkreislauf erfassten Daten. Diese werden über das lokale Netz an das STC gesendet und dort gespeichert. Sie umfassen Track&Trace-Daten (im EPCIS-Standard), werkzeugbezogene Daten wie die Mess- und Einstellwerte sowie Prozess- und Sensordaten, zu denen die Daten aus der Werkzeugmaschine und die Daten gehören, die über die Sensorik im Werkzeughalter erfasst werden.

Der beidseitige Datenaustausch, das heißt das Speichern und Abfragen, erfolgt über Webservices (REST-Web-Schnittstelle). Im STC werden die Daten den entsprechenden Stationen des Werkzeugkreislaufs und den Einzelkomponenten bzw. Gesamtwerkzeugen zugeordnet.

Um Benutzern eine Übersicht über die im STC vorhandenen Daten zu ermöglichen, bietet das STC eine Weboberfläche. Der Zugang hierzu kann über eine Benutzerkontensteuerung eingeschränkt werden. Die Weboberfläche ist in die Bereiche

- EPCIS-Stammdaten,
- Dashboard,
- (Gesamt-)Werkzeuge und
- Komponenten

unterteilt. Diese Bereiche werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Als Datenablagensystem für die Track&Trace-Daten wurde ein EPCIS-Repository eingesetzt (siehe Abschnitt 7.2). Mit der Free and Open Source Software for Track and Trace (FOSSTRAK) steht zudem eine EPCIS Implementierung in der EPCIS-Version 1.0.1 zur Verfügung, die auch EPCglobal-zertifiziert ist und kostenfrei genutzt werden kann [FOSS17, GS114] (siehe Abbildung 39).

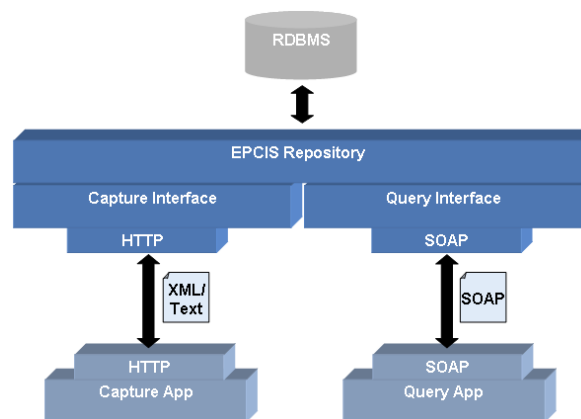


Abbildung 39: Architektur des FOSSTRAK-EPCIS-Systems [FOSS17]

Der Bereich EPCIS-Stammdaten im STC (siehe Abbildung 40) dient der Verwaltung, Anlage und Einsicht der EPCIS-Stammdaten, welche im EPCIS-Repository hinterlegt sind. Hier können neue „Read Points“, „Business Locations“ etc. verwaltet und mit zusätzlichen Bezeichnungen und Beschreibungen versehen werden. Diese können die Verfolgung von Elementen im Unternehmen vereinfachen.

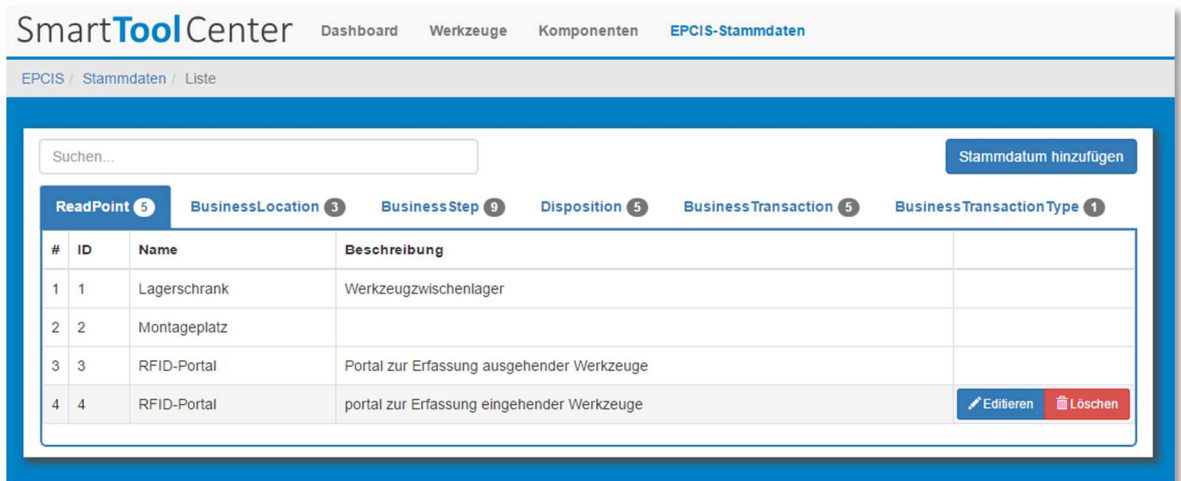


Abbildung 40: EPCIS-Stammdatenverwaltung

Die Gesamtwerkzeugverwaltung bietet einen Überblick über alle im STC erfassten Gesamtwerkzeuge (siehe Abbildung 41). Diese werden nach ihrem Typ gruppiert. Alle Werkzeuge desselben Typs verweisen auf denselben Stammdatensatz.

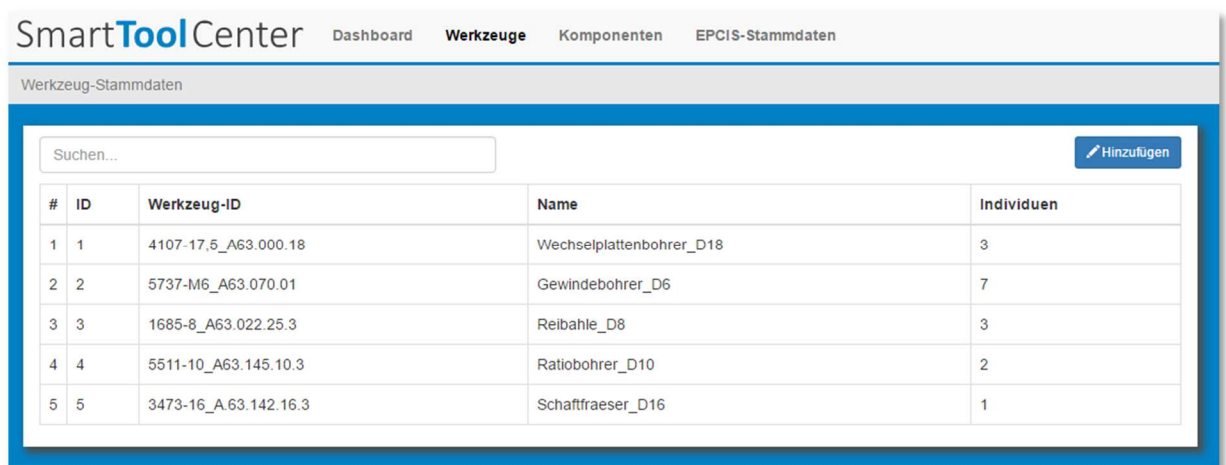


Abbildung 41: Liste aller Gesamtwerkzeugstammdaten

Die Auswahl eines Stammdatensatzes zeigt eine Liste aller zu dieser Nummer bisher montierten (aggregierten) Individuen und bietet außerdem die Möglichkeit, die Gesamtwerkzeugnummer sowie die Klartextbezeichnung des Datensatzes zu verändern. In Abbildung 42 ist dies beispielhaft für den Gewindebohrer 5737-M6\_A63.070.01 zu sehen.

Werkzeug-Stammdaten / Gewindebohrer\_D6 / Allgemein

### Stammdaten

**Gesamtwerkzeug-Nummer** 5737-M6\_A63.070.01

**Bezeichnung** Gewindebohrer\_D6

Speichern

### Individuen

#	Batch-Nr.	Serial-Nr.	Job-Nr.	Letzter Standort	Letzte Erfassung
1		STC0000000005	AMB-05	AMB: DM-2, RFID-1	vor 2 Tagen
2		STC0000000006		AMB: DM-2, RFID-1	vor 3 Tagen
3		STC0000000007	AMB-05	AMB: DM-2, RFID-1	vor 1 Woche
4		STC0000000001	AMB-04	AMB: RFID-Portal	vor 2 Wochen
5		STC0000000002	AMB-05	AMB: RFID-Portal	vor 2 Wochen
6		STC0000000003	AMB-05	AMB: DM-2, RFID-2	vor 1 Monat
7		STC0000000004	AMB-04	AMB: DM-2, RFID-1	vor 4 Monaten

Abbildung 42: Einzelansicht Stammdaten Gesamtwerkzeug

Nach Auswahl eines Individuums können alle zu diesem individuellen Werkzeug hinterlegten Daten eingesehen werden. Hierzu gehören unter anderem alle zu diesem Werkzeug erfassten Events inklusive Zeitstrahl (siehe Abbildung 43) sowie Mess- und Korrekturdaten. Da die Events in Echtzeit an das STC übergeben werden, ist eine eindeutige Zuordnung zum Zeitstrahl gewährleistet.

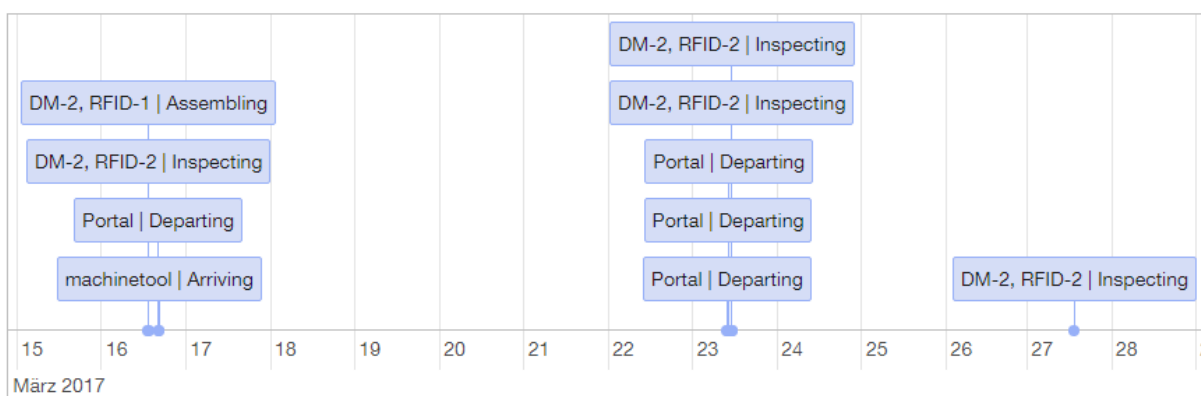


Abbildung 43: Zeitstrahl aller zu einem Individuum erfassten Events im Track&Trace Prozess



Die Komponentenverwaltung bietet eine Übersicht über alle im STC erfassten Komponenten. Gruppieren werden diese nach ihrem Typ. Alle Komponenten desselben Typs verweisen auf denselben Stammdatensatz. Einen Screenshot aus der Weboberfläche zeigt Abbildung 44.

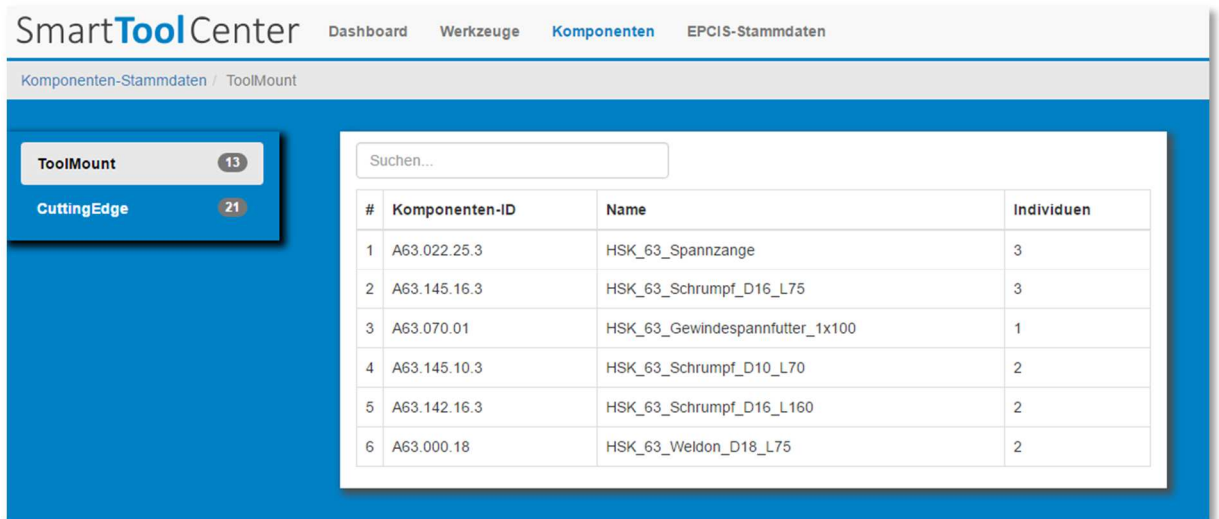


Abbildung 44: Übersichtsseite Komponentenverwaltung

Nach Auswahl eines Stammdatensatzes werden die Details des Datensatzes und die Individuen, welche diesem zugeordnet sind, angezeigt. Die den Individuen zugeordneten Daten können, analog den Gesamtwerkzeugen (GWZ), abgefragt werden (siehe Abbildung 45).

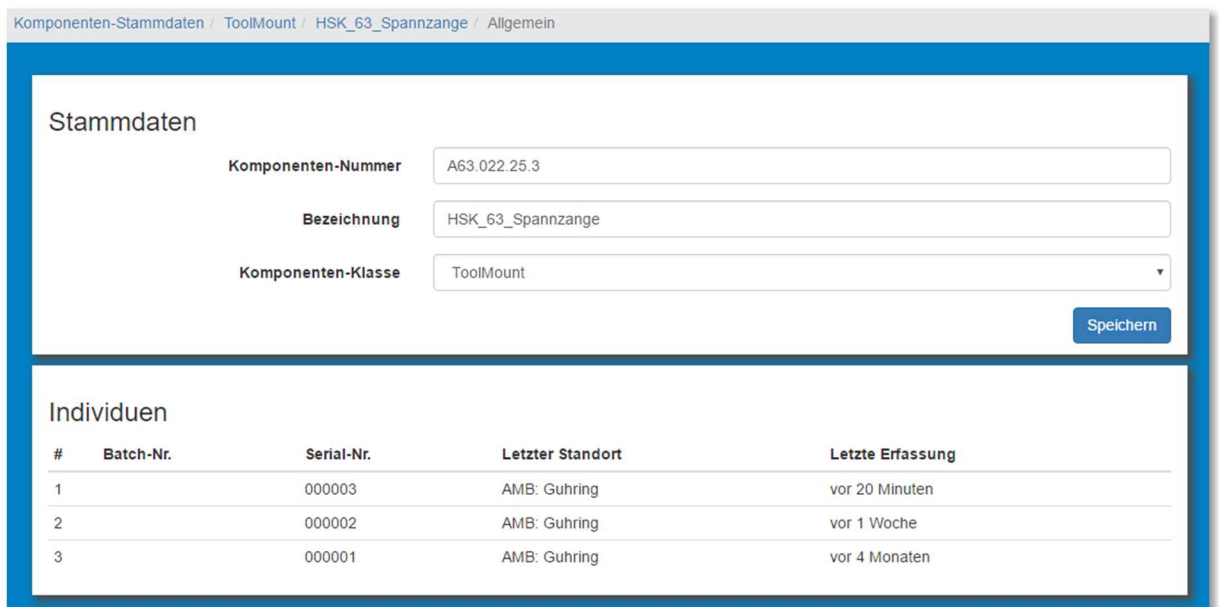


Abbildung 45: Detailansicht eines Komponentenstammdatensatzes mit Individuenliste

Das Dashboard stellt für den Anwender eine Übersichtsseite mit einigen Auswertungen bereit (siehe Abbildung 46). Die im Werkzeugkreislauf gesammelten Tracking-Daten (EPCIS-Events) werden hierzu für den Benutzer in verschiedenen Ansichten aufbereitet.

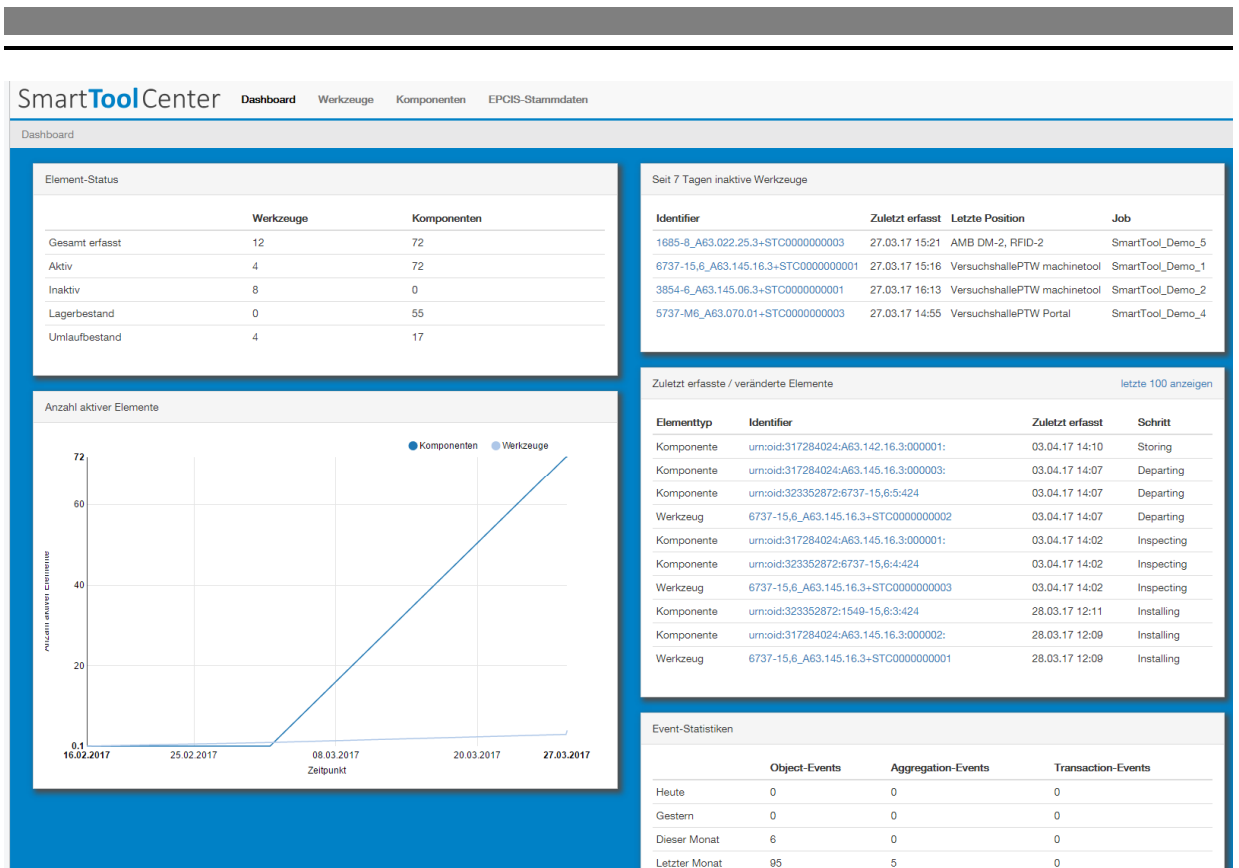


Abbildung 46: Dashboard des STCs

Die Übersicht „Element-Status“ zeigt aggregierte Statusinformationen zu den im Unternehmen erfassten Werkzeugen und Komponenten. Dies ist eine Momentaufnahme basierend auf Echtzeit-Informationen aus den aufgenommenen Events. Es umfasst auch eine Summierung aller in der Datenbank bereits erfassten Elemente. Folgende Werte werden dargestellt:

- Gesamt erfasst: bisher insgesamt erfasste Elemente
- Aktiv: montierte GWZ, noch nicht ausgemusterte Komponenten
- Inaktiv: demontierte GWZ, noch funktionsfähige Komponenten
- Lagerbestand: aktive Elemente, die zuletzt an einem Lagerplatz erfasst wurden
- Umlaufbestand: aktive Elemente, deren letztes Event kein Lagereingang war

Unter dem Element-Status ist eine Grafik einzusehen, die die Anzahl aktiver Elemente (GWZ und Komponenten) über einen bestimmten Zeitraum anzeigt (siehe Abbildung 47). Ein Element ist dann als aktiv anzusehen, wenn es mindestens einmal erfasst und bisher nicht wieder „vernichtet“ wurde. Für Komponenten erstreckt sich die Lebensdauer vom ersten Scannen des DMC bis hin zur Ausmusterung der Komponente. Der Zyklus eines GWZ beginnt mit der Montage und endet mit der Demontage.

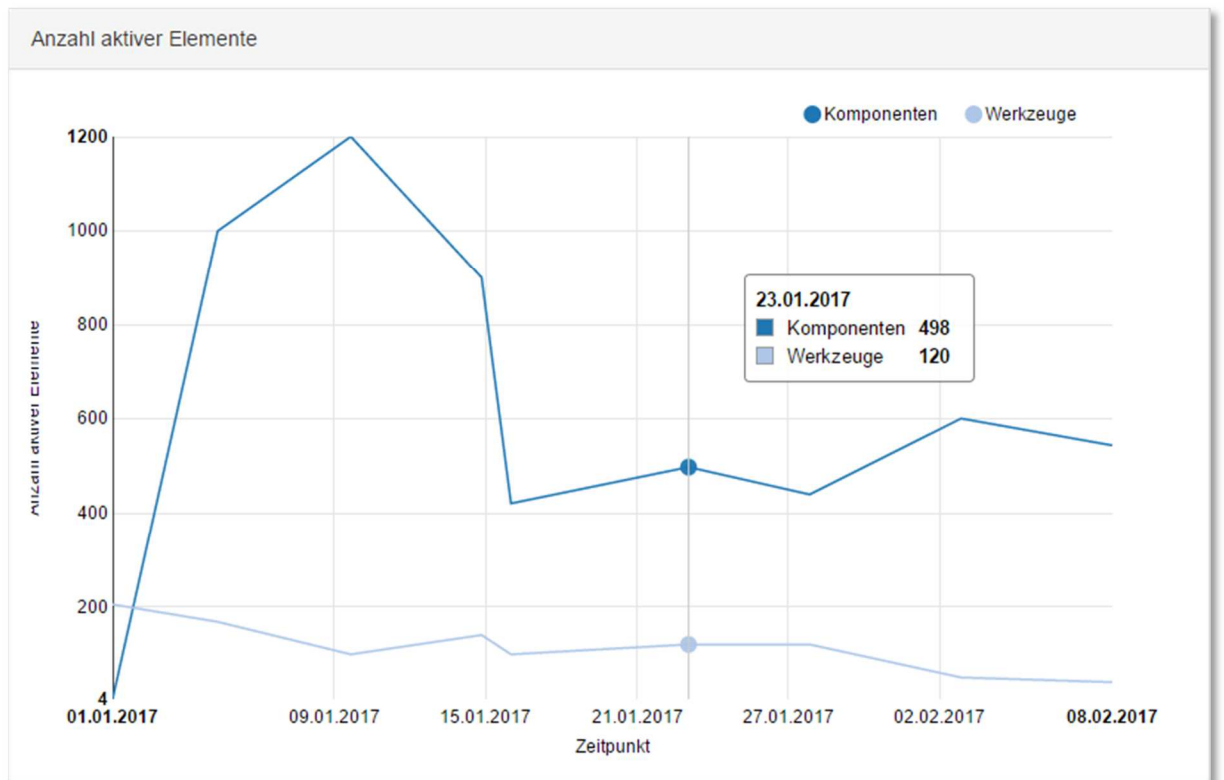


Abbildung 47: Graph: Anzahl der aktiven Elemente im Unternehmen

Da Werkzeuge in vielen Unternehmen auftragspezifisch montiert und anschließend bis zum Einsatz zwischengelagert werden, ist es wichtig, eine Übersicht über lange nicht verwendete Werkzeuge, hier als inaktive Werkzeuge bezeichnet, zu haben (siehe Abbildung 48). Dies kann beispielsweise bedeuten, dass das Werkzeug montiert und eingelagert wurde, der Auftrag jedoch storniert oder verschoben wurde. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, das Werkzeug wieder auszulagern und zu demontieren, um die verwendeten Komponenten anderweitig zu nutzen.

Seit 7 Tagen inaktive Werkzeuge			
Identifier	Zuletzt erfasst	Letzte Position	Job
<a href="#">1685-8_A63.022.25.3+STC0000000003</a>	27.03.17 15:21	AMB DM-2, RFID-2	SmartTool_Demo_5
<a href="#">6737-15,6_A63.145.16.3+STC0000000001</a>	27.03.17 15:16	VersuchshallePTW machinetool	SmartTool_Demo_1
<a href="#">3854-6_A63.145.06.3+STC0000000001</a>	27.03.17 16:13	VersuchshallePTW machinetool	SmartTool_Demo_2
<a href="#">5737-M6_A63.070.01+STC0000000003</a>	27.03.17 14:55	VersuchshallePTW Portal	SmartTool_Demo_4

Abbildung 48: Liste der seit mehr als 7 Tagen inaktiven Werkzeuge

Die Ansicht „zuletzt erfasste/veränderte Elemente“ zeigt die letzten Aktivitäten im Werkzeugkreislauf. Eine detailliertere Liste der letzten 100 Events kann über „letzte 100 anzeigen“ abge-

fragt werden. Zu jedem Event werden der Typ des erfassten Elements, der Identifier mit Verlinkung auf die jeweilige Detailansicht sowie das Erfassungsdatum und der Erfassungsschritt dargestellt (siehe Abbildung 49 und Abbildung 50).

Zuletzt erfasste / veränderte Elemente			<a href="#">letzte 100 anzeigen</a>
Elementtyp	Identifier	Zuletzt erfasst	Schritt
Komponente	<a href="#">urn:oid:317284024:A63.142.16.3:000001:</a>	03.04.17 14:10	Storing
Komponente	<a href="#">urn:oid:317284024:A63.145.16.3:000003:</a>	03.04.17 14:07	Departing
Komponente	<a href="#">urn:oid:323352872:6737-15,6:5:424</a>	03.04.17 14:07	Departing
Werkzeug	<a href="#">6737-15,6_A63.145.16.3+STC0000000002</a>	03.04.17 14:07	Departing
Komponente	<a href="#">urn:oid:317284024:A63.145.16.3:000001:</a>	03.04.17 14:02	Inspecting
Komponente	<a href="#">urn:oid:323352872:6737-15,6:4:424</a>	03.04.17 14:02	Inspecting
Werkzeug	<a href="#">6737-15,6_A63.145.16.3+STC0000000003</a>	03.04.17 14:02	Inspecting
Komponente	<a href="#">urn:oid:323352872:1549-15,6:3:424</a>	28.03.17 12:11	Installing
Komponente	<a href="#">urn:oid:317284024:A63.145.16.3:000002:</a>	28.03.17 12:09	Installing
Werkzeug	<a href="#">6737-15,6_A63.145.16.3+STC0000000001</a>	28.03.17 12:09	Installing

Abbildung 49: Zuletzt erfasste/veränderte Elemente

#	Zeitpunkt	Typ	Aktion	Schritt	Ort	Lesestation	Transactions	EPCs	RFID-Tag-ID
1	03.04.17 14:10	ObjectEvent	ADD	Storing	VersuchshallePTW	Guhring		EPCList <a href="#">urn:oid:317284024:A63.142.16.3:000001:</a>	
2	03.04.17 14:07	ObjectEvent	OBSERVE	Departing	VersuchshallePTW	Portal		EPCList <a href="#">urn:oid:323352872:6737-15,6:5:424</a> <a href="#">urn:oid:317284024:A63.145.16.3:000003:</a> <a href="#">urn:oid:tool:6737-15,6_A63.145.16.3:STC0000000002</a>	E2-00-34-12-01-71-FE-00
3	03.04.17 14:02	ObjectEvent	OBSERVE	Inspecting	AMB	DM-2, RFID-2		EPCList <a href="#">urn:oid:323352872:6737-15,6:4:424</a> <a href="#">urn:oid:317284024:A63.145.16.3:000001:</a> <a href="#">urn:oid:tool:6737-15,6_A63.145.16.3:STC0000000003</a>	E2-00-34-12-01-83-FE-00

Abbildung 50: Übersicht über die 100 zuletzt erfassten Events

Die Event-Statistik zeigt die Anzahl der aufgenommenen Events am aktuellen und vorherigen Tag sowie dem aktuellen und dem letzten Monat. Hierbei wird gemäß EPCIS nach Object, Aggregation und Transaction Events unterschieden (siehe Abbildung 51). Dies bietet einen Überblick über die Scanhäufigkeit im Werkzeugkreislauf oder Schwankungen im Produktionsbetrieb.

Event-Statistiken			
	Object-Events	Aggregation-Events	Transaction-Events
Heute	51	17	17
Gestern	261	49	49
Dieser Monat	3468	597	597
Letzter Monat	6495	1468	1468

Abbildung 51: Event-Statistiken

### SmartTool-App

Die Verfügbarkeit und der Status der SmartTool-Komponenten (Embedded Systems Plattformen) sollte zyklisch ermittelt werden. Hierzu wird das Open Source Monitoring-System Nagios eingesetzt. Die Datenerfassung erfolgt über verschiedene Module der SmartTool-App. Dies sind die Module

- Werkzeuergfassung und -identifizierung,
- Sensor-Kommunikation und
- OPC UA-Kommunikation,

die im Folgenden erläutert werden. Zudem sind die externen Systeme entsprechend angeschlossen.

Die Hauptaufgabe des Moduls **Werkzeuergfassung und -identifizierung** ist das Erfassen und Identifizieren von Werkzeugen und Werkzeugkomponenten. Über einen angeschlossenen optischen Scanner können DMC und über RFID-Antennen RFID-Tags eingelesen werden. Über die eindeutige ID werden die Objekte identifiziert und diese, zusammen mit Zustands- und aktuellen Positionsdaten, in Form von EPCIS-Events an das STC übermittelt. Zu den Events gehören das Ein- und Ausbuchen im Lager, das Ankommen und Verlassen des (De-)Montagearbeitsplatzes, das Einsetzen in und Entnehmen aus der WZM und das Passieren des Portals für die Pulkauslesung.

Entsprechend verfügt die App über vier Aufnahmemodi:

- Einzelerfassung von Werkzeugkomponenten per DMC
- Erfassung von Werkzeugspannfutter an Montage- und Demontagestationen per RFID
- Pulkauslesung von Gesamtwerkzeugen per RFID

Jede Lesestation wird den Anforderungen entsprechend konfiguriert. Hierzu wird folgendes EPCIS-Vokabular verwendet:

- „Read Point“: Name des Erfassungsgeräts
- „Business Location“: Ort, an dem sich der „Read Point“ befindet
- „Business Step“: Track&Trace-Schritt
- „Disposition“: Verfügbarkeit nach dem Buchungsvorgang
- „Action“: Hinzufügen einer neuen Position für ein erfasstes Objekt

Um im Werkzeugkreislauf erfasste Daten zu speichern, werden diese an das STC gesendet. Hier werden die Track&Trace-Daten als EPCIS-Events im EPCIS-Repository gespeichert.

Parallel dazu werden die Komponenten- und Werkzeugtypen und auch -individuen in einer internen STC-Datenbank angelegt und kontinuierlich aktualisiert. Zu den Komponenten und Werkzeugen werden außerdem ausgewählte Stammdaten sowie Mess- und Korrekturdatensätze angelegt und somit zentralisiert gespeichert.

Das Modul **Sensor-Kommunikation** dient dazu, gemessene Beschleunigungswerte von der im Werkzeughalter angebrachten Sensorplatine über BLE zu empfangen und aufzuzeichnen. Nach der Aktivierung dieses Moduls in der App wird gemäß Bluetooth-Protokoll die Umgebung nach BLE Geräten in der nahen Umgebung abgescannt. Sobald ein Gerät in der Nähe lokalisiert wurde, wird dieses angezeigt und kann ausgewählt werden. Ein Passwort kann hinterlegt werden, das zur Authentifizierung an die Platine übermittelt wird. Nach dem Verbindungsaufbau meldet sich die Sensorplatine bei der App und übermittelt die aktuellen Beschleunigungswerte (siehe Abbildung 52). Durch das Betätigen des „Start“-Button wird die Aufzeichnung der Sensorwerte im Comma-Separated Values (CSV)-Format gestartet. Sobald der „Stop“-Button gedrückt wird, wird die Aufzeichnung der Beschleunigungswerte unterbrochen. Die empfangenen Messwerte werden im CSV-Format auf dem internen Speicher des Boards abgelegt und können von dort per E-Mail als Zip-datei versendet werden. Die Daten können Aufschluss z. B. über den Verschleiß des eingesetzten Werkzeugs in der Maschine geben.

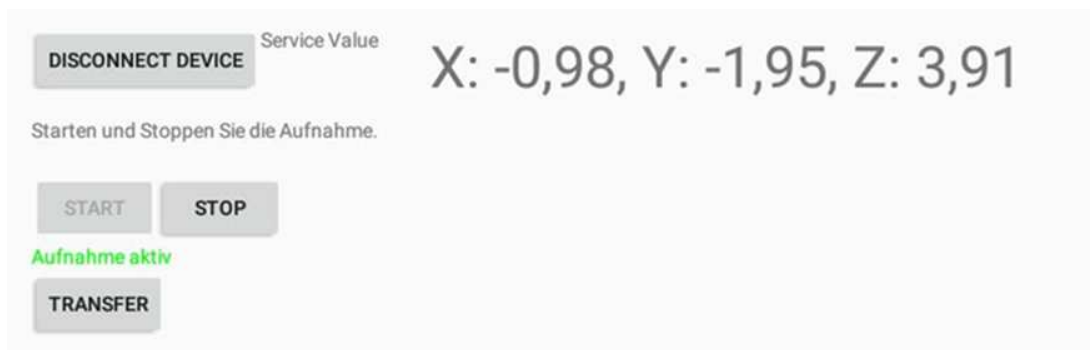


Abbildung 52: Beschleunigungswerte des sensorischen Werkzeugspannfutters; Darstellung in Android-App

Das Modul **OPC UA-Kommunikation** schließt die WZM über das industrielle M2M-Kommunikationsprotokoll an. In OPC UA stehen zwei Kommunikations-Protokolle zur Verfügung: das Binärprotokoll und der Webservice Simple Object Access Protocol (SOAP), wobei letzterer als Standard gilt.

### Binärprotokoll

- Beste Performance, am wenigsten Overhead
- Verbraucht am wenigsten Ressourcen (kein Extensible Markup Language (XML)-Parser, SOAP und Hypertext Transfer Protocol (http) notwendig; wichtig für Embedded-Geräte)
- Beste Interoperabilität (binär ist genau spezifiziert, nicht so viele Freiheitsgrade wie mit XML)
- Ein einziger TCP-Port (4840) wird für die Kommunikation verwendet und kann auch leicht getunnelt oder in einer Firewall freigeschaltet werden

### Webservice (SOAP)

- Beste Tool-Unterstützung; kann z. B. auch leicht aus Java und .net verwendet werden.
- Firewall-freundlich: Verwendung von Port 80 (http) und 443 (https) möglich, meistens ohne weitere Konfiguration

Der Teil UA Security beinhaltet Authentifizierung und Autorisierung, Verschlüsselung und Datenintegrität durch Signieren und orientiert sich an den Web-Service-Security-Spezifikationen.

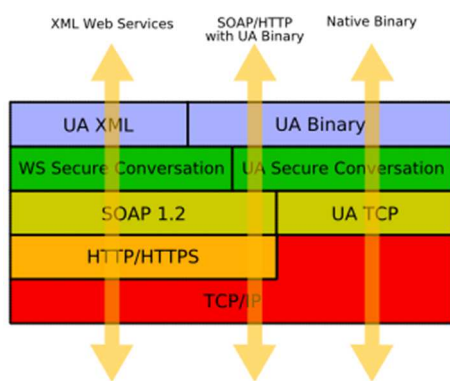


Abbildung 53: Protokoll und OPC UA Security [GAPP06]

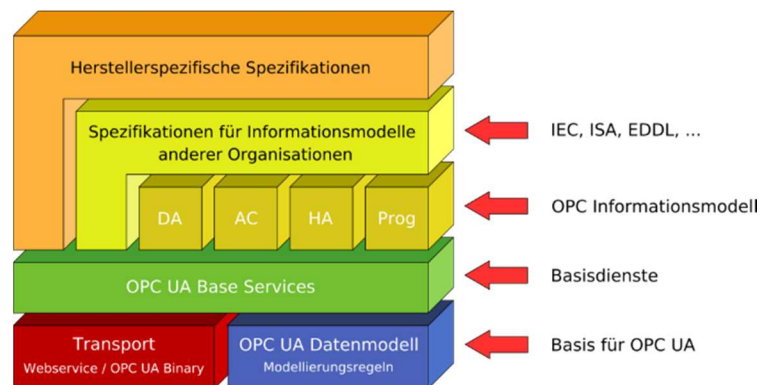


Abbildung 54: OPC UA Architektur [GAPP17]

Falls Maschinendaten im Binärformat über OPC UA vom Embedded-Board ausgelesen werden sollen, ist eine Freigabe des dort eingesetzten Ports (Standard OPC UA TCP-Port: 4840) und der Zugriff auf die Maschine über das verwendete VLAN/Subnetz zusätzlich notwendig (beim Testaufbau beim Projektpartner PTW ist auch der Port 53530 im Einsatz).

---

Zur Überwachung des Embedded Boards über das Monitoring-System Nagios (Open Source Software zum Monitoring von IT-Infrastrukturen) ist zusätzlich der Port 5667 (Standard Nagios Service Check Acceptor (NSCA) Port) nötig. Hierzu sendet das Board zyklisch aktiv Statusinformationen an den Nagios-Server (da aufgrund der Sicherheitsanforderungen des Netzwerks der Nagios-Server in der Regel nicht aktiv auf das Board zur Status-Abfrage zugreifen kann).

Das Modul OPC UA-Client ist eine (Windows-Konsolen-)Anwendung, die mit einer Werkzeugmaschine über das industrielle standardisierte M2M-Kommunikationsprotokoll OPC UA kommunizieren kann. Hierbei ist es natürlich zwingend notwendig, dass auf der Steuerung der Werkzeugmaschine ein entsprechender OPC UA-Server installiert ist und läuft. Für die Umsetzung des Clients wurde das C++-Framework von Unified Automation verwendet. Es stehen auch JAVA-Frameworks zur Verfügung, die aber in der Testumgebung aus technischen Gründen nicht verwendet werden konnten.

In Anlehnung an Kapitel 7.3.2 wird der Ablauf bei einer Maschinenbeladung im Folgenden erläutert. Der Fokus liegt hier auf der Software.

- Ausgangspunkt ist, dass die Module über die Web REST-Schnittstelle im STC neu angelegte Ereignisse/Events überwacht. Bevor ein (Komplett-)Werkzeug in die Werkzeugmaschine eingesetzt wird, wird das Werkzeug an einem „Read Point“ (per RFID) außerhalb der Werkzeugmaschine erfasst. Hierbei wird von der App ein EPCIS-Event an das STC gesendet, welches vom OPC UA-Client über die Webschnittstelle abgefragt werden kann. Dieses Event dient als Trigger.
- Sobald der Client dieses im STC neue angelegte Event erkannt hat, wartet die App im nächsten Schritt auf den Status „Werkzeug beladen“, der in der Werkzeugmaschine gesetzt wird, sobald ein Werkzeug in das Magazin eingesetzt und an der Maschine dies mit dem „Beladen“-Button bestätigt wurde (Lesen). Hierbei weist die Maschinensteuerung dem Werkzeug eine T-Nummer zu, welche das Werkzeug in der Werkzeugmaschinen eindeutig identifiziert, solange es sich in der Werkzeugmaschine befindet.
- Die OPC UA-Client-Anwendung fragt nun diese T-Nummer ab (Lesen), sodass die Anwendung mithilfe dieser Nummer spezifische Werkzeugdaten aus der Maschinensteuerung ausgelesen werden können.
- Die App teilt der Werkzeugmaschine z. B. die Standzeit bzw. die Vermessungsdaten des eingelegten Werkzeugs, die im STC gespeichert sind, mit (Schreiben).
- Die App wartet, bis ein Entladevorgang in der Werkzeugmaschine stattfindet (Lesen).



- Sobald dies geschieht, erfragt die App die T-Nummer des zu entladene Werkzeugs; über diese Nummer identifiziert die App die spezifischen Werkzeugdaten, z. B. die Standzeit (Lesen).
- Die spezifischen Werkzeugdaten werden über die Webschnittstelle an das STC übermittelt. Weiterhin wird im STC für dieses Werkzeug ein Event angelegt, mit dem angegeben wird, dass das Werkzeug aus der Werkzeugmaschine entladen worden ist.

Einen Überblick über einige der benötigten Maschinenvariablen und ihre Bedeutungen und Funktionen gibt Tabelle 7. Das individuelle Verhalten der OPC UA-Client-Anwendung kann über eine Konfigurationsdatei gesteuert werden.

Tabelle 7: Überblick über Maschinenvariablen und ihre Bedeutungen und Funktionen

Maschinenvariable	Bedeutung/Funktionen
ServerUrl	Netzwerkposition der Werkzeugmaschine
StcUrlMachineValueGet IntervalTimerWebRequest	Adresse des STC, welches über die Variable „IntervalTimerWebRequest“ getriggert wird (Zeiteinheit in Millisekunden).
IntervalTimer	Wenn die obige Abfrage ein Ergebnis zurückliefert, startet die App per OPC UA die Abfrage der WZM-Steuerung mit der Frequenz wie in „IntervalTimer“ vorgegeben.
IsToolLoading	Die App liest die Maschinenvariable „IsToolLoading“ aus der Werkzeugmaschine, die ein true oder ein false zurückliefert. Wenn ein true gelesen wird, ist ein Beladevorgang abgeschlossen.
ToolTNumber	Sobald diese T-Nummer zurückgeliefert wird, kann ein Werkzeug anhand dieser Nummer eindeutig identifiziert werden.
WriteMachineData	Über den Maschinenvariable „WriteMachineData“ wird der Maschine mitgeteilt, dass für ein Werkzeug

	noch spezifische Werkzeugdaten übermittelt werden. Das Werkzeug wird anhand der T-Nummer identifiziert.
WriteMachineDataRemainingLifetime	Die Variable „WriteMachineDataRemainingLifetime“ schreibt die im STC hinterlegte Standzeit des Werkzeugs in die Maschine. Jetzt kann das Werkzeug in der Maschine eingesetzt werden.
IsToolUnLoaded	Die App triggert jetzt auf die MaschinenvARIABLE „IsToolUnLoaded“, die ebenfalls true oder false zurückliefert. Sobald dieser MaschinenvARIABLE true liefert, fragt die App die geänderten Daten des Werkzeugs ab.
ReadMachineDataRemainingLifetime	Die Variable „ReadMachineDataRemainingLifetime“ liefert die aktuelle Standzeit des Werkzeugs.
StcUrlMachineValueClear	Die App sendet jetzt an das STC über den Value „StcUrlMachineValueClear“ die aktuellen Daten des Werkzeugs. Durch dieses Event wird das Werkzeug im STC als aus der Maschine entladen verbucht.
StcUrlMachineValueGet	Die App wechselt jetzt wieder in das Lesen der Variablen „StcUrlMachineValueGet“ und wartet auf ein weiteres Beladen der Werkzeugmaschine.

Weiterhin beinhalten **externe Systeme** wie ERP-Systeme, Manufacturing Execution Systems (MES) und Tool Management Systeme eine Vielzahl an Informationen, die zu verschiedenen Zeitpunkten und an unterschiedlichen Orten im Werkzeugkreislauf dezentral bereitgestellt werden müssen. Die Referenzarchitektur verfügt über geeignete Schnittstellen, um die identifizierten Daten, insbesondere statische wie auch quasi-statische Werkzeugdaten, dezentral bereitzustellen, bzw. diese von dezentraler Stelle aus zu schreiben. Als Interaktionspartner im Werkzeugkreislauf, den jedes Gesamtwerkzeugindividuum passiert, muss die Referenzarchitektur des SmartTool die Interaktion mit dem Werkzeugeinstellgerät über geeignete Schnittstellen ermöglichen. Die gesamte IT-Infrastruktur am Beispiel des Projektpartners HDM ist in nachfolgender Abbildung zu sehen.

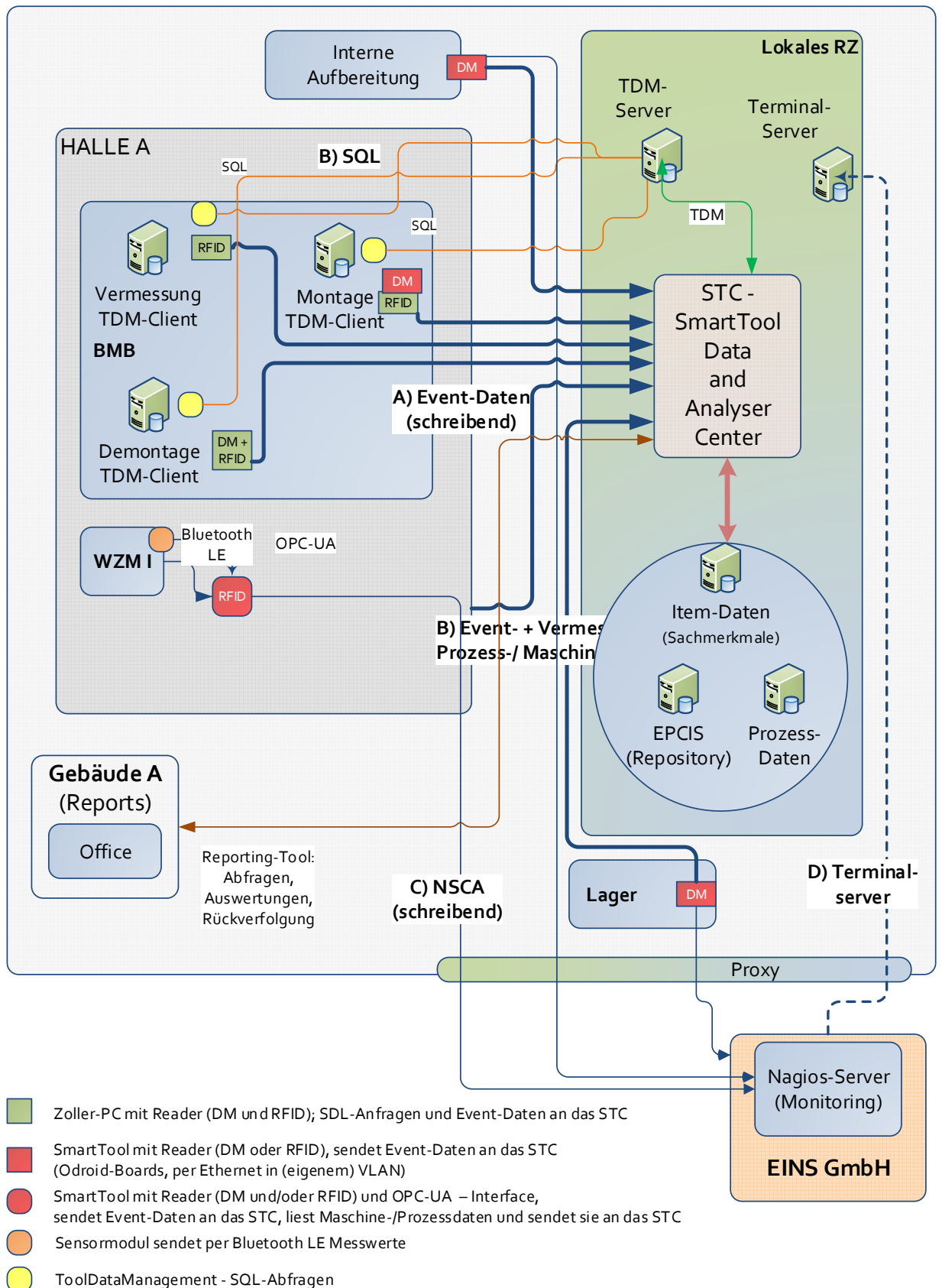


Abbildung 55: SmartTool-Infrastruktur beim Projektpartner HDM

---

## 8 Kosten-Nutzen-Bewertung

---

Um eine fundierte Entscheidung bezüglich der Einführung eines CPS SmartTool treffen zu können, müssen die entstehenden Kosten sowie der Nutzen bewertet werden. Die Nutzenbewertung erfolgte durch eine Bewertung der in Kapitel 3 erläuterten Ziele.

Bei der Nutzenermittlung ist zu berücksichtigen, dass zwischen einzelnen technischen Teilsystemen Abhängigkeiten bestehen. Einzelne Teilsysteme müssen für sich alleine noch nicht mit einem monetär bewertbaren Nutzen verbunden sein, können aber eine notwendige Basisfunktion des Gesamtsystems darstellen. So ist die Exemplarverwaltung eine notwendige Voraussetzung für die meisten weiteren Maßnahmen. Auch muss für alle Systeme die entsprechende IT-Infrastruktur aufgebaut werden, sofern noch nicht vorhanden.

### 8.1 Kostenbewertung

Um die Kosten des Vorhabens abzuschätzen, wurde ein Excel-Tool erstellt, welches die Initialkosten und die in der Folgezeit anfallenden laufenden Kosten beinhaltet. Abhängig von den zuvor existierenden Randbedingungen (Werkstückportfolio, Maschinenpark bzw. Maschinensteuerungen etc.) wurden verschiedene Umsetzungsszenarien betrachtet. Diese Szenarien erstrecken sich von der vollständigen Umsetzung aller beschriebenen Maßnahmen über eine Umsetzung auf Basis des direkt Machbaren bis zur Umsetzung mit nur wenigen SmartTool-Teilfunktionen. Folgende Bereiche wurden betrachtet:

- Werkzeuge
  - Ausstattung der Werkzeuge mit Identifikationstechnologie (DMC/RFID)
  - Ausstattung der Werkzeughalter mit Sensorik
- Werkzeugvorbereitung
  - Werkzeuglagerung (GTMS)
  - Montageplatz mit DMC/RFID-Leseinheit
  - Voreinstellgerät mit RFID-Leseinheit
- Identifikationsstationen
  - Einzelne Lesestationen mit DMC/RFID
  - Pulkauslesung mit RFID
- Werkzeugmaschinen: Ausstattung mit OPC UA-Funktionalität

Die Größenordnung der Kosten soll im Folgenden verdeutlicht werden. Zu beachten ist hierbei, dass zu den erläuterten Kosten zum einen die Kosten für die Beschäftigten des Anwenderunternehmens (im Projekt HDM und Siemens) addiert werden müssen, die bei der Integration der

---

Systeme beteiligt sind. Zum anderen sind Maschinenstillstände, die auftreten können, zu berücksichtigen.

### **Werkzeuge**

Die Zusatzkosten einer Komponenten mit DMC betragen ca. 1 €. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass der Werkzeuglieferant über die Kompetenzen im Bereich der Lasermarkierung verfügt. Ist die Anbringung einer zusätzlichen Fläche erforderlich, kommen nochmals 3 € hinzu. Die RFID-Transponder wurden für 4,50 €/Stück bei einer Stückzahl von 100 bezogen. Bei größeren Mengen sinken die Stückkosten. Beim sensorischen Werkzeughalter werden Kosten von ca. 600 € angenommen. Je nach angebrachter Sensorik können diese aber stark schwanken.

### **Werkzeugvorbereitung**

Die Kosten zur Aufrüstung der externen Systeme sowie für die Umsetzung eines STC sind bei den Systemlieferanten EINS, Gühring und Zoller anzufragen.

### **Identifikationsstationen**

Der höchste Anteil der Kosten für die Identifikationsstationen fällt für die RFID-Auswerteeinheit inkl. -Antenne an. Diese betragen ca. 3.000 €. Zur Anbindung dieser Komponenten an das Gesamtsystem ist weitere Hardware nötig (Steckverbinder, Board etc.). Kosten von maximal 500 € können als realistisch angenommen werden. Die Kosten für das im Rahmen des Projekts aufgebaute Portal (eine RFID-Auswerteeinheit, vier RFID-Antennen, Gerüst, IT-Zubehör) betragen ca. 6.500 €. Auch hier fiel der Großteil der Kosten für die RFID-Auswerteeinheit und die Antennen an.

### **Werkzeugmaschinen**

Die Kosten für die Ausstattung einer Werkzeugmaschine mit OPC UA sind von der aktuellen Steuerung abhängig. Bei HDM war eine Investition von ca. 3.000 € für die Integration der Schnittstelle nötig. Insbesondere die Kosten für den Servicetechniker vor Ort fallen mit ca. 2.000 € ins Gewicht. Zu diesen müssen die Kosten für die RFID-Station an der Maschine (vgl. vorheriger Abschnitt) und die Hardware zur Anbindung der Systeme addiert werden.

## **8.2 Nutzenbewertung**

Neben den Kosten sollte auch der Nutzen einer SmartTool-Umgebung bewertet werden. Dieser wird im Folgenden erläutert.

---

## Erhöhung der Informationstransparenz im Werkzeugkreislauf

Die Daten der Identifikation und Verwaltung der Individuen dienen der **Bereinigung des Werkzeugspektrums**. Im konzipierten System wird nicht nur der Lager- sondern auch der Umlaufbestand erfasst, sodass Informationen zu allen im Unternehmen vorhandenen Werkzeugen vorliegen.

Durch das entwickelte System kann bei HDM das Lager mit Neuwerkzeugen zur Sicherstellung der Versorgung anteilig aufgelöst werden. Dies führt zu Zinseinsparungen in den Folgejahren sowie zur Reduzierung der Lagerkosten. Langfristig ist durch die verbesserte Bestands- und Zustandstransparenz auch mit einer Reduzierung der schon vorhandenen Umlaufbestände zu rechnen, 10 % können hier als realistischer Wert angesetzt werden. Bestandseffekte sind bei langlebigen Gütern wie den Bestandswerkzeugen i. d. R. nicht kurzfristig zu sehen, da keine noch einsatzfähigen Werkzeuge verschrottet werden, um den Bestand zu reduzieren. Eine Messbarkeit war daher innerhalb der Projektlaufzeit nicht gegeben. Ein weiterer Effekt lässt sich aufgrund der verbesserten Transparenz mit einem restriktiveren Durchlaufzeitenmanagement erzielen. Einmal für einen Fertigungsauftrag vorgerichtete Werkzeugsätze werden in aller Regel bei Terminverschiebungen im Fertigungsablauf nicht wieder demontiert. Die Kapitalkosten für eine längere Vorabbereitstellung können und werden i. d. R. nicht berücksichtigt, könnten aber zukünftig durch einen höheren Verrechnungssatz für verspätet abgerufene Werkzeuge realistischer einbezogen werden. Liegezeitreduzierungen von mehr als 10 Tagen erscheinen realistisch.

Im STC werden alle zu den Werkzeugindividuen erfassten Daten gesammelt, gespeichert und, wo benötigt, auf Werkzeugtypebene aggregiert. Hierdurch ist eine **optimierte Werkzeugauswahl** möglich. Bei der Auswahl in der Werkzeugvorbereitung wird von einer um 10 % besseren Nutzung der Schneideteile ausgegangen, somit auch anteilig von 10 % geringeren Verbrauchskosten.

Bei der Bestellung muss der Trade-Off aus niedrigen Bestellkosten (Anzahl der Bestellungen \* fixe Bestellkosten) bzw. hoher Verfügbarkeit und niedrigen Lagerhaltungskosten optimiert werden. Zur **Optimierung dieses Zielkonflikts in der Bestellstrategie** werden verschiedene Verfahren angewendet, die in nachfolgender Tabelle aufgeführt sind.

Tabelle 8: Matrix der Bestellsysteme

Bestellsystem		Lagerkontrolle	Bestellintervall	Bestellmenge
<b>Bestellrhythmus-Verfahren</b>	t,Q-System	keine	fix	Fix
	t,S-System	periodisch	fix	Variabel
<b>Bestellpunkt-Verfahren</b>	s,Q-System	kontinuierlich	variabel	Fix
	s,S-System	kontinuierlich	variabel	variabel
<b>Optional-Verfahren</b>	t,s,Q-System	periodisch	variabel	Fix
	t,s,S-System	periodisch	variabel	variabel

t: Bestellrhythmus

q/Q: Bestellmenge (variabel/fix)

s: Meldebestand

S: Sollbestand

Wie in der Tabelle gezeigt, unterscheiden sich die Bestellstrategien hinsichtlich der Lagerkontrolle, des Bestellintervalls und der Bestellmenge. Da mit SmartTool eine kontinuierliche Lagerkontrolle ermöglicht wird, sind lediglich die Bestellpunktverfahren (s,Q-System und s,S-System) relevant. Der Meldebestand s berechnet sich durch Addition des Produkts aus Tagesbedarfs und Wiederbeschaffungszeit (WBZ) und dem Sicherheitsbestand (SB):

$$s = \text{Tagesbedarf} \times \text{WBZ} + \text{SB}$$

Der Sicherheitsbestand dient dem Ausgleich von Abweichungen zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Bestandsverlauf aufgrund von Bestandsabweichungen, Verbrauchsabweichungen, Lieferterminabweichungen und Liefermengenabweichungen. Mit SmartTool sollten Bestandsabweichungen nicht mehr vorhanden und Verbrauchsabweichungen geringer sein, sodass der Sicherheitsbestand und damit auch der Meldebestand gesenkt werden können. Der Sicherheitsbestand sollte auf Basis der erfassten Daten dynamisch angepasst werden. Weitere relevante Kennzahlen (z. B. Verwendungshäufigkeit und Einsatzhäufigkeit) sollten in Echtzeit berechnet werden, um den optimalen Bestellzeitpunkt und die optimale Bestellmenge abhängig vom aktuellen Ist-Bestand und dem aktuellen Verbrauch bzw. Bedarf zu bestimmen.

Weiterhin wird mit SmartTool ermöglicht, die Bestandshöhe nicht über die Anzahl der Werkzeuge, die pro Typ, Klasse etc. vorhanden sind, zu bestimmen, sondern über die Reststandzeiten. So werden die Reststandzeiten aller Werkzeuge eines Typs/einer Klasse etc. addiert. Auf diese Weise kann die Beschaffung den Verbrauch und den zukünftigen Bedarf besser kalkulieren.

---

Durch die Vernetzung der Bearbeitungsstationen ist es weiterhin möglich Informationen vom Ort der Entstehung an vorgelagerte Wertschöpfungsstufen unmittelbar und digital weiterzuleiten. Dadurch wird der Bullwhip-Effekt vermieden.

Die Einführung des SmartTool hat auch **positive Auswirkungen auf die Intralogistik**. In der Regel werden Werkzeuge für Fertigungsaufträge reserviert, damit sie zur Verfügung stehen, wenn der entsprechende Auftrag abgearbeitet werden soll. Heutzutage geschieht dies auf Werkzeugtypebene. In Zukunft kann jedoch das gewünschte Individuum reserviert werden. Hierdurch ist eine optimale Ausnutzung der Reststandzeit möglich. Beispielsweise sind zwei parallele Aufträge M und N zu fertigen, die beide Werkzeugtyp A benötigen. Auftrag M benötigt das Werkzeug 30 min während Auftrag N das Werkzeug 2 h benötigt. Es stehen noch zwei Werkzeuge des Typs zur Verfügung, eines (A.1) mit einer Reststandzeit von 50 min und das andere (A.2) mit einer Reststandzeit von 3 h. Es erscheint in diesem Fall logisch, Werkzeug A.1 für Auftrag M und Werkzeug A.2 für Auftrag N zu benutzen. Die Basis für diese Entscheidung ist jedoch das Aufzeichnen von Reststandzeiten. Die Überprüfung des Werkzeugs findet bereits bei der Auslagerung durch Abscannen des DMC statt.

An allen Stationen, an denen Lesegeräte vorhanden sind, wird der aktuelle Aufenthaltsort des Werkzeugs festgestellt. Auf Basis dieser Daten kann nicht nur die Verfügbarkeit sondern auch der Aufenthaltsort entsprechend geplant werden. Wird beispielsweise ein Gesamtwerkzeug sowohl von einem Beschäftigten genutzt, als auch von einem anderen Beschäftigten für seinen nächsten Auftrag benötigt, kann Letzterer prüfen, ob es zeitlich und in Bezug auf die Verfügbarkeit sinnvoll ist, auf das Werkzeug zu warten. Entscheidet er sich dafür bzw. sagt ihm das System, dass er das Werkzeug nehmen sollte, werden dadurch ein Demontage- und ein Montagevorgang eingespart.

Weiterhin wird das Individuum durch die Kennzeichnung eindeutig einem Auftrag zugeordnet. Auf dieser Basis wird fortlaufend geprüft, ob das richtige Werkzeug transportiert wird. Ist dies nicht der Fall, gibt es eine Warnung. Dies wurde beispielhaft bei der Portallösung umgesetzt.

### **Vernetzung der beteiligten Systeme**

Die aufgebaute Informationsarchitektur vernetzt alle relevanten Systeme des Werkzeugkreislaufs. Bereits am Markt bestehende Tool Management Systeme wie das GTMS und das Zoller TMS wurden in das Gesamtsystem integriert. Zudem wurden Endgeräte wie das DMC-Lesegerät Cognex DataMan 8600 über Einplatinenrechner mit dem System verbunden. Im STC werden alle relevanten Daten zentral gesammelt, gespeichert und aufbereitet. Weitere Systeme können angeschlossen werden.



---

## Zustandsüberwachung der Werkzeuge

Die Datenbasis zur Optimierung der Prozesszeiten wird über die in das Werkzeugspannfutter eingebrachte Sensorik sowie den Zugriff auf die Steuerung der Werkzeugmaschine aufgebaut. Die Daten werden im STC gesammelt, gespeichert und aufbereitet. Die Datenbasis kann zur **Reduktion der Zeiten für Neuanläufe** genutzt werden. Bei HDM kann angenommen werden, dass es sich bei ca. 10 % der Prozesse um Neuanläufe handelt. Die Beobachtungsrate beträgt 100 %. Als Aufwand sind hier die Personalkosten der eingesetzten Werkzeugtechnologien anzusetzen. Durch den Einsatz des sensorischen Werkzeugspannfutters kann der zeitliche Aufwand für Neuanläufe verringert werden.

Das SmartTool ermöglicht eine ständige Aufnahme und Dokumentation der Belastungs- und Schnittdaten während eines Werkzeugeingriffs zur kontinuierlichen technologischen Effektivitätsbewertung der Werkzeugeinsätze und schlägt den Beschäftigten an der Maschine optimierte Schnittwerte vor. Die **Optimierung der Schnittwerte** kann je nach Anwendungsfall mit Bezug auf Kosten, Standzeit oder Durchlaufzeit angepasst werden. Eine 2 %-ige Effizienzsteigerung durch fallbezogen angepasste Erhöhung der Schnittwerte und damit verbundene Reduzierung der Bearbeitungszeiten erscheint realistisch.

Ein Einsatz des sensorischen Spannfutters kann aber auch bei kritischen Prozessen mit hoher Prüfschärfe oder bei fortlaufender Prozesskontrolle für kostenintensive Werkstücken notwendig sein. Als kritisch werden bei HDM ca. 2 % der Prozesse eingestuft bei einer Beobachtungsrate von 10 %. Analog zu den Kosten für Neuanläufe werden die Personalkosten kritischer Prozesse berechnet. Bei kritischen Prozessen ist zur Überwachung durch das sensorische Werkzeug und die dahinter liegende Datenbasis **weniger Personalaufwand** notwendig.

## Unterstützung der Beschäftigten

Eine nutzerorientierte Aufbereitung der erfassten Daten bietet eine Unterstützung für den Beschäftigten. Dieser wird insbesondere durch die Webapplikation des STC, den Montageassistenten und die automatische Übertragung der Werkzeugkorrekturdaten über den RFID-Tag unterstützt.

In der **Webapplikation des STC** werden die erfassten Daten nutzerorientiert aufbereitet. Dadurch können Optimierungspotenziale durch den Bediener erkannt werden. Zudem können Daten zu jedem Werkzeugindividuum und -typ jederzeit durch Scannen des DMC abgerufen werden. Somit kann beispielsweise auf Geometriedaten oder Informationen über den Lebenszyklus zugegriffen werden.

---

Durch Angabe des aktuellen Lagerorts der Werkzeugindividuen können Suchzeiten in der Werkzeugvorbereitung verringert werden. In nicht geplanten Situationen, wie z. B. beim Werkzeugbruch, können schnell Ersatzwerkzeuge und deren Lagerort bestimmt werden und störungsbedingte Unterbrechungen verkürzt werden. Somit können zum einen Personalkosten für die Werkzeugsuche sowie Kosten für Ausfälle oder Reparaturen vermieden bzw. verringert werden.

Der eingerichtete **Montageassistent** unterstützt den Beschäftigten bei der Vorbereitung von Montageprozessen. Hier sind alle benötigten Gesamtwerkzeuge, die benötigten Komponenten und ihre aktuellen Lagerorte aufgelistet. Bei der virtuellen Montage, das heißt dem Abscannen des DMC, wird überprüft, ob die richtigen Komponenten montiert werden. Die eindeutige Identifikation bietet daher eine Sicherheit gegen Verwechslungsgefahr.

Durch die **automatische Übertragung der Werkzeugkorrekturdaten** anhand der Identifikation beim Werkzeugeinsatz an der Maschine können manuelle Fehler vermieden und Durchlaufzeiten verkürzt werden.

### **Simulative Nutzenbewertung**

Eine quantitative Nutzenbewertung stellt sich meist als schwierig dar. Im Rahmen des Projekts wurde der Nutzen simulativ in Tecnomatix Plant Simulation bewertet. Diese Software dient zur Simulation diskreter ereignisorientierter Logistik- und Materialflüsse. Der Hersteller wirbt mit deutlichen Kosteneinsparungen durch Produktivitätssteigerungen, Reduktion der Lagerbestände und einem effizienten Ressourceneinsatz [TECN10]. [LANZ10] bezeichnen die Software darüber hinaus als Standardlösung für Wissenschaft und Technik zur realitätsgetreuen Abbildung unterschiedlichster Steuerungsstrategien der Logistik- und Materialflüsse.

Die Prozesse werden in Plant Simulation gemäß dem Bausteinprinzip aufgebaut. Vom Hersteller bereits vordefinierte Bausteine sind beispielsweise Einzel- und Parallelstationen, Lager, Montage- und Demontagestationen sowie Puffer. Die Bausteine lassen sich auf der Oberfläche anordnen und können über Materialflusskanten miteinander verbunden werden. Über diese Kanten und durch die Stationen fließen die sogenannten beweglichen Elemente. Bereits implementiert sind unter anderem Fördergüter, Förderhilfsmittel und Fahrzeuge.

Um den Nutzen des intelligenten Werkzeugs simulativ zu zeigen, wurden zwei Modelle entwickelt und miteinander verglichen: ein Standardmodell und darauf aufbauend ein optimiertes intelligentes Modell. Der grundsätzliche Aufbau beider Modelle, das heißt die Anordnung der Stationen, Wege etc. ist gleich und in Abbildung 56 zu sehen. Das intelligente Modell unterscheidet sich jedoch vom Standardmodell durch den Einsatz intelligenter Werkzeuge und die Nutzung

dieser zusätzlichen Informationen. Die von den Werkzeugen aufgezeichneten Echtzeitdaten werden zur Optimierung genutzt. So erfolgt beispielsweise an verschiedensten Stellen im Modell, u. a. bei der Auslagerung und bei der Kommissionierung, ein Rückgriff auf die Reststandzeit. Sie ist für die Entscheidung ausschlaggebend, ob ein Werkzeug für einen weiteren Auftrag verwendet werden kann. Hier erfolgt zu Beginn des Einsatzes in der Maschine eine Überprüfung. Unterschreitet die verfügbare die benötigte Reststandzeit, wird die Auslagerung eines Ersatzwerkzeugs eingeleitet. Dieses wird in der Vorbereitung priorisiert behandelt, um sicherzustellen, dass es nicht zu Stillstandszeiten der WZM aufgrund eines fehlenden Werkzeugs kommt. Damit dieser Fall möglichst selten auftritt, erfolgt bereits bei der Auswahl des auszulagernden Werkzeugs ein Abgleich der für den Dispositionszeitraum erforderlichen Standzeit mit der restlichen Standzeit. Existiert im Zentrallager kein Werkzeug, das diese Anforderung abdeckt, wird das Werkzeug mit der geringsten Standzeit ausgelagert.

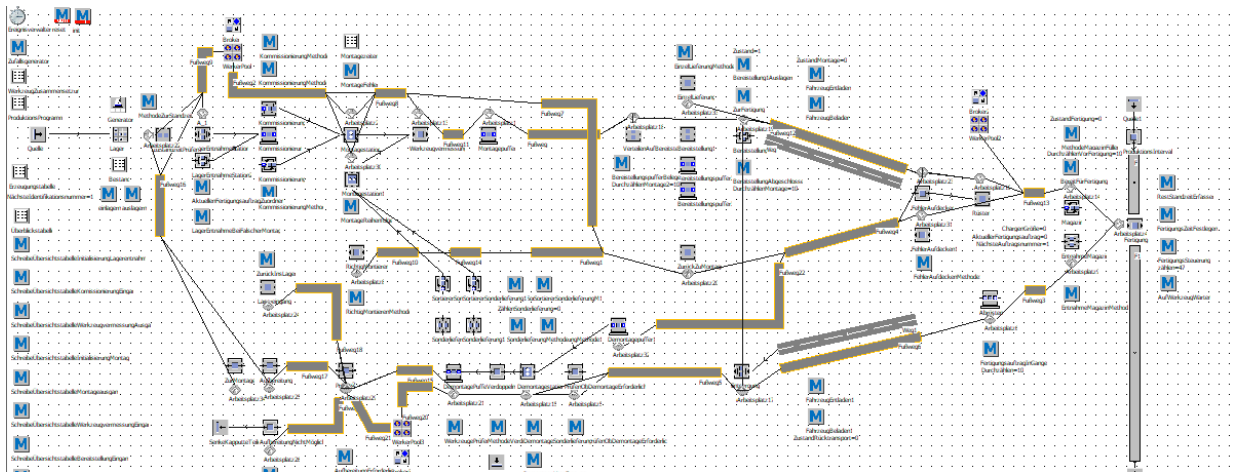


Abbildung 56: Simulationsmodell in PlantSimulation

Das Verhalten des Modells wurde in verschiedenen Szenarien untersucht. Einen Auszug der Ergebnisse einer der simulierten Szenarien zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Simulativer Vergleich des Standardmodells und des intelligenten Modells

Modellvariante	Anzahl Aufträge	Maschinenproduktivität [%]	Durchschnittliche Bereitstellungszeit [min]	Durchschnittliche Wartezeit [min]
Standardmodell	782	46,8	28,2	129
Intelligentes Modell	944	56,5	26,1	87
Differenz	162	9,7	-2,1	-42

---

Eine Steigerung der Maschinenproduktivität und eine Reduktion der durchschnittlichen Bereitstellungs- und Wartezeiten konnte mit dem intelligenten Werkzeug erreicht werden. Auch in den weiteren Untersuchungen zeigte das intelligente Werkzeug deutliche Vorteile, sodass von einer Nutzensteigerung durch Einsatz des SmartTool ausgegangen werden kann.

---

## 9 Zusammenfassung

---

### 9.1 Ergebnisse des Verbundprojekts

Im Rahmen des Verbundprojekts SmartTool wurde ein intelligenter Werkzeugkreislauf konzipiert und umgesetzt. Die hiermit verfolgten Ziele umfassten die Reduktion der Bestände, die Erhöhung der Prozesssicherheit (der logistischen Prozesse sowie des Bearbeitungsprozesses) und die Unterstützung der Beschäftigten.

Hierfür wurde ein **Track&Trace-System** aufgebaut, über welches zu jedem Zeitpunkt aktuelle Informationen über Aufenthaltsorte, Bestände, zusammengebaute Werkzeuge etc. abgefragt werden können. Somit sind die Werkzeugbestände sowohl in den Lagern als auch in den Werkzeugmaschinen einer Fertigung bekannt. Folglich können die Sicherheitsbestände der Werkzeuge in einem bisher nicht realisierbaren Umfang reduziert werden ohne die Versorgungssicherheit zu gefährden. Des Weiteren wird die Informationstransparenz dazu genutzt, die Werkzeugbeschaffung hinsichtlich Bestellzyklen, -mengen und -verfahren standortübergreifend zu optimieren. Somit können Ressourcen geschont und Kosten reduziert werden.

Die **Integration von Sensorik im Werkzeughalter** sowie die **Anbindung der Maschinensteuerung** ermöglicht Rückschlüsse über den aktuellen Zustand des Werkzeugs, wie z. B. den Verschleiß. Eine bessere Ausnutzung der Standmengen der Werkzeuge kann erzielt und somit die Ressourcenproduktivität gesteigert werden. Zudem wird mithilfe des Prozessdatenrückflusses von der Fertigung in die Arbeitsvorbereitung die Prozessgestaltung und Technologieoptimierung insbesondere bei Anläufen von Neuteilen erleichtert. Bereits in der Fertigung erschlossene Optimierungspotentiale im Zerspanungsprozess gehen nicht mehr verloren und unterstützen die Entwicklung hin zu einer lernenden Organisation im Funktionsbereich Werkzeugtechnologie. Auf diese Art und Weise soll auch ein Lernen über Standortgrenzen hinweg erleichtert werden. Die Anmeldung von zwei Patenten in diesem Bereich bestätigt die Innovation.

Beschäftigte werden durch SmartTool von Routinetätigkeiten, wie der Eingabe der Werkzeuggeometriedaten in die Maschinensteuerung, entlastet oder bei Routinetätigkeiten, wie der Buchung der Werkzeuge bei der Entnahme aus dem Lager, unterstützt. Ebenfalls erfolgt eine Entscheidungsunterstützung der Beschäftigten, etwa bei der Einschätzung, ob ein Werkzeug noch einmal eingesetzt werden kann, oder ob es zuvor aufbereitet werden muss. Somit steht den Beschäftigten mehr Zeit für höherwertige Tätigkeiten, wie der Durchführung und Umsetzung von kontinuierlichen Verbesserungsprozessen, zur Verfügung.

---

Durch Schaffung einer transparenten, durchgängigen und konsistenten Informations- und Datenbasis im Werkzeugkreislauf sind alle Daten an jedem mobilen Endgerät verfügbar.

Nachdem die Anforderungen definiert und das Kosten-/Nutzen-Verhältnis positiv bewertet wurde, wurden die Lösungen zur Realisierung der Soll-Konzeption in Pilotbereichen des PTW der TU Darmstadt sowie der Anwenderunternehmen erfolgreich umgesetzt (siehe Abbildung 57).

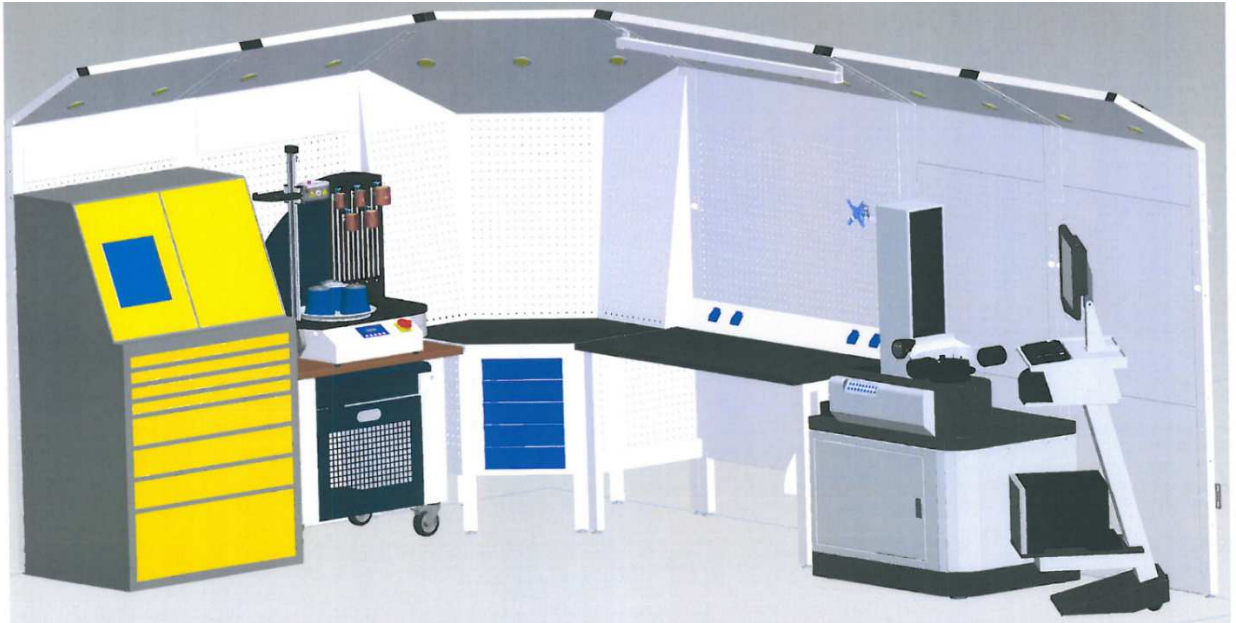


Abbildung 57: Demonstrator (PTW)

Auf der AMB 2016 in Stuttgart wurde der Demonstrator ausgestellt (siehe Abbildung 58) und dadurch einem bereiteren Fachpublikum präsentiert. Die positiven Rückmeldungen bestätigen die Ergebnisse des Projekts.



Abbildung 58: Demonstrator (AMB)

---

## 9.2 Ergebnisverwertung und Ausblick

In Zukunft wissen Planer dank des CPS SmartTool aufwandsarm und zuverlässig, wo und in welchem Zustand sich die Werkzeugsysteme in der Fertigung befinden. Die geschlossenen Informationslücken im vernetzten Werkzeugkreislauf werden genutzt, um eine automatisierte Entscheidungsunterstützung bei verschiedenen Tätigkeiten zu realisieren, wie der Auswahl einer optimalen Bestellstrategie. Eine Übertragung des Systems auf andere verschleißende Werkzeuge, wie Spritzgusswerkzeuge, oder für die Bereitstellung anderer Betriebsmittel in Unternehmen ist grundsätzlich möglich. Um weitere Unternehmen zur Einführung eines intelligenten Werkzeugsystems zu befähigen, wurde ein Leitfaden geschrieben, in dem unter anderem Herausforderungen und Möglichkeiten zu deren Bewältigung enthalten sind.

Zudem werden die Ergebnisse des Projekts von der TU Darmstadt und den beteiligten Unternehmen weiterentwickelt und verbreitet. So dient der Beispielarbeitsplatz am PTW als Industrie 4.0-Testumgebung für die EINS GmbH im Projekt SmartTool++. Die Projektergebnisse werden zudem in einem im Rahmen des vom BMWi geförderten „Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Darmstadt“-Workshops zum Thema Traceability jedes Quartal präsentiert. Dies dient zum einen der Schulung der Teilnehmer im Bereich Traceability, zum anderen dem Erfahrungsaustausch mit und zwischen den Teilnehmern. Weiterhin unterstützt er im Rahmen von Führungen (z. B. bei der alle zwei Jahre stattfindenden Powertrain Conference des PTW) und Workshops bei der praktischen Darstellung der Arbeiten am Schwerpunkt „Werkzeugmanagement“. Eine auf dem Projekt SmartTool aufbauende Projektskizze „Durch intelligente Datennutzung zu neuen Geschäftsmodellen im Werkzeugwesen – SmartIS“ zur BMBF-Ausschreibung „Zukunft der Arbeit: Arbeit in hybriden Wertschöpfungssystemen“ wurde eingereicht. Die Ergebnisse des Projekts wurden zudem bereits in bestehende Produkte, wie das GTMS der Fa. Gühring, integriert.

Das Projekt wird somit insgesamt als positiv bewertet. Weitere Erfolge werden auf Basis der Erkenntnisse erwartet.

---

---

## Literaturverzeichnis

---

- [ABEL07] Abele, E.; Liebeck, T.; Hueske, B.: Optimierung des Werkzeugmanagements. Verbesserung der internen Prozesse und Integration von Dienstleistung in der spanenden Fertigung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 102 (2007) 12, S. 844–848.
- [ABEL08a] Abele, E.; Stein, S.; Quirnbach, K.: Einfluss der Werkzeugaufnahme bei der Blechbearbeitung mittels Hochgeschwindigkeitsfräsen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103 (2008) 7-8, S. 470–474.
- [ABEL08b] Abele, E.; Tschannerl, M.; Kulok, M.: Qualitätssteigerung beim Bohren mit VHM-Spiralbohrern unter Berücksichtigung radialer Schwingungen und Kräfte Teil 2 - Konstruktive Änderungen am Bohrer sowie technologische Maßnahmen zur besseren Formgenauigkeit. In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 1, S. 60–65.
- [ABEL10a] Abele, E.; Hueske, B.; Beck, M.: Raise of availability by improvement of tool life implicated tool changes in mass production: Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance 2010.
- [ABEL10b] Abele, E.; Hohenstein, J.; Kolaric, S.: Fliehkraftadäquate Auslegung von Fräs Werkzeugen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 7-8, S. 681–686.
- [ABEL11a] Abele, E.; Hauer, T.; Haydn, M.: Modellierung der Prozesskräfte beim Reiben mit Mehrschneidenreibahlen - Implementierung eines Kraftmodells für die Simulation der Reibbearbeitung. In: wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 6, S. 407–412.
- [ABEL11b] Abele, E.; Santin, R.; Dietz, S.: Fräsen mit nur einer Schneide. In: maschine+werkzeug (2011) 10, S. 46–48.
- [ACI12] ACI Laser GmbH: Laserbeschriftungssysteme kennzeichnen fast alle Materialien. 2012. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/laserbeschriftungssysteme-kennzeichnen-fast-alle-materialien-a-386688/>.
- [AURI08] Aurich, J. C.; Faltin, M.; Gomez Kempf, F. A.: Intelligente Werkzeuge und Spannsysteme durch RFID. Ein Konzept zur unternehmensspezifischen Realisierung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103 (2008) 12, S. 883–887.



- 
- [AURI09] Aurich, J. C.; Faltin, M.; Gomez Kempf, F. A.: Was intelligente Werkzeuge in der Fertigung leisten können. In: wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 7/8, S. 510–515.
- [BART06] Barthelmä, F.: Sensorische und aktorische Werkzeuge und Werkzeugkomponenten zur Gestaltung optimaler Hochleistungserspanprozesse, Dissertation. Magdeburg 2006.
- [BART08] Bartneck, N.; Klaas, V.; Schönherr, H. (Hrsg.): Prozesse optimieren mit RFID und Auto-ID: Grundlagen, Problemlösung und Anwendungsbeispiele: Grundlagen, Problemlösung und Anwendungsbeispiele. Erlangen: Publicis. 2008.
- [DIN81] DIN 6583: Begriffe der Zerspantechnik – Standbegriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 1981.
- [DIN03] DIN 69893-1: Kegel-Hohlschäfte mit Plananlage. Teil 1: Kegel-Hohlschäfte Form A und Form C. Maße und Ausführungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2003.
- [DUN17] Dun & Bradstreet, <http://www.dnb.com/duns-number.html>, Abruf am 21.12.2017.
- [ESSW09] Esswein, T.: Einstellgeräte, von manuell bis vollautomatisiert, erschließen Produktivitätspotentiale. Spanzeitanteile maximieren. In: Werkstatt und Betrieb (2009) 1-2, S. 42–44.
- [FINK08] Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC, 5. Auflage. München 2008.
- [FOSS17] <https://fosstrak.github.io/epcis/>, Abruf am 21.12.2017.
- [FRIC07] Frick, W.; Kroh, R.: Sensorik und Aktorik in Werkzeug-Systeme integriert. Werkzeuge. 2007 URL: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanalee/produktion/spanendefertigung/werkzeuge/articles/70672/>.
- [GAPP06] Gappmeier, G.: Darstellung OPC UA Protokolle, in: WIKIPEDIA OPC Unified Architecture, ascolab GmbH 7.12.2006, URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/e/e4/Uaprotocols.png>, Abruf am 21.12.2017.
- [GAPP17] Gappmeier, G.: OPC UA Architecture, in: WIKIPEDIA OPC Unified Architecture, ascolab GmbH, URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/f/f0/UA\\_Architecture\\_1024.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/f/f0/UA_Architecture_1024.png), Abruf am 21.12.2017.

- 
- [GEBE95] Gebert, K.: Berührungslose Daten- und Energieübertragung von und zu rotierenden Maschinenelementen bei 50.000 min<sup>-1</sup>. Kolloquium Berührungslose Messdaten und Leistungsübertragung. In: VDI- Berichte Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik Reihe 8 (1995) 515.
- [GEBE97] Gebert, K.: Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnelldrehenden Motorspindeln, Dissertation. Darmstadt 1997.
- [GRUN12] Grundler, E.: Werkzeug-Komplettausstattung für Drehfräszentren. Am Anwender orientiert. In: Werkstatt und Betrieb (2012) 9, S. 66–69.
- [GS114] GS1: [https://www.gs1.org/docs/epc/epcis\\_1\\_1-standard-20140520.pdf](https://www.gs1.org/docs/epc/epcis_1_1-standard-20140520.pdf). GS1 Global Office, Brüssel 2014.
- [HARD17] [www.hardkernel.com](http://www.hardkernel.com), Abruf am 21.12.2017
- [HASS02] Hasselkuss, E.: Intelligente Werkzeuge erhöhen die Genauigkeit. In: Werkstatt und Betrieb (2002) 7-8, S. 40–41.
- [HEIN11] Heinz, R.: Kleine Chips mit großer Wirkung. Werkzeugidentifikation mit RFID. 2011. URL: <http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/42768/Kleine-Chips-mit-grosser-Wirkung>.
- [HEIS12] Heisel, U.; Kang, C.: Aktiver Werkzeughalter zur Formfehlerkompensation. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 1/2, S. 34–37.
- [HOBO11] Hobohm, M.: Ergonomische, flussorientiert und standardisierte Werkzeugbereitstellung. Geliefert wird das Komplettpaket. In: Werkstatt und Betrieb (2011) 12, S. 14–17.
- [HUSE94] Husen, H.: Überwachung paralleler Bohrprozesse. Fortschritts-Berichte VDI-Reihe 2 Nr. 331, VDI-Verlag, Dissertation. Hannover 1994.
- [ISO06] ISO/IEC 15434: Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Syntax for high-capacity ADC media. British Standards Institution. 2006.
- [ISO13] ISO/IEC 18000-6: Information technology – Radio frequency identification for item management, Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz General. British Standards Institution. 2013.

- 
- [ISO14] ISO/IEC 15459: Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Unique identification. British Standards Institution. 2014.
- [ISO16] ISO/IEC 15418: Information technology – Automatic identification and data capture techniques – GS1 Application Identifiers and ASC MH10 Data Identifiers and maintenance. British Standards Institution. 2016.
- [IWF09] IWF TU Braunschweig (Hrsg.): Abschlusskolloquium der DFG. Braunschweig 2009.
- [JUSC16] Juschkat, K.: Unternehmen beschließen Standard für IIoT-Anwendungen, in: Internetseite Internet of Things, 25.11.2016, URL: <https://www.industry-of-things.de/unternehmen-beschliessen-standard-fuer-iiot-anwendungen-a-562280/?cmp=nl-345&uuid=6C08C818-34DC-4DB9-9ED3-1F29D510E77C>, Abruf am 21.12.2017
- [KLOC08] Klocke, F.; Wirtz, G.; Totis, G.; Veselovac, D.: Entwicklung eines mehrschneidigen Messerkopfstirnfräasers mit Einzelschneidenkraftmessung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103 (2008) 11, S. 762–765.
- [LANZ10] Lanza, Gisela; Peter, Kathrin; Jondral, Annabel: Anwenderfreundliche und komplexitätsreduzierte Bewertung und Robustheitsuntersuchung von Lean-Methoden bei kleinen und mittleren Unternehmen. Karlsruher Institut für Technologie. wbk Institut für Produktionstechnik. 2010.
- [LITW11] Litwinski, K. M.: Sensorisches Spannsystem zur Überwachung von Zerspanprozessen in der Einzelteilmontage, Dissertation. Hannover 2011.
- [MARC10a] Marczyński, G.: Toolmanagement. Integrativer Ansatz. In: Fertigung (2010) 8, S. 44–45.
- [MARC11a] Marczyński, G.: Ersatzteilmanagement aus der Wolke?, EMO Hannover 2011. In: MaschinenMarkt (2011) 220, S. 64–65.
- [MARC11b] Marczyński, G.: So passt die Theorie zur Praxis. Fehlende Buchungsdisziplin mit RFID-Technik ausgleichen. In: Werkstatt und Betrieb (2011) 7-8, S. 104–106.
- [MARC11c] Marczyński, G.: Toolmanagement "der nächsten Generation". RFID-Technik gewinnbringend einsetzen. In: VDI-Z 2011 (2011) II, S. 50–51.
- [MÖLL05] Möller, B.: Intelligente Spindeleinheit (ISPI). BMBF-Verbundprojekt, Abschlussbericht 2005.

- 
- [MUMM98] Mumm, A.: Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spannenden Fertigung, Dissertation. Dortmund 1998.
- [NOWY08] Nowy, M.; Heß, G.; Marczinski, G.: Überzeugendes Toolmanagement der anderen Art. Von der Prozessauslegung bis zur Werkzeugversorgung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103 (2008) 7-8, S. 531–535.
- [OPEN17a] <https://open62541.org/doc/current/>, Abruf am 21.12.2017
- [OPEN17b] <https://open62541.org>, Abruf am 21.12.2017
- [SCHM09] Schmitz, R.: Messen von Zerspankräften durch werkzeugseitige Sensorintegration, Dissertation. Aachen 2009.
- [SCHO05] Schoblick, R.; Schoblick, G.: RFID Radio Frequency Identification. Grundlagen, Eingeführte Systeme, Einsatzbereiche, Datenschutz, Praktische Anwendungsbereiche. Poing 2005.
- [SIEM13] Siemens AG: SINUMERIK 840D sl NC-Variable und Nahtstellensignale. Siemens AG, Dokumentenbestellnummer 6FC5397-3CP40-3AA1, 05/2013
- [SPAT02] Spath, D.: Accomat – Die Genauigkeitsgeregelte Maschine. Abschlussbericht BMBF Leitprojekt Accomat 2002.
- [TDM12] n.n.: tdm systems - Integriertes Toolmanagement. Von der Komponentenverwaltung bis zur NC-Simulation. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 11, S. 853–855.
- [TECN16] Tecnomatix (2016): Plant Simulation. Produktübersicht. Online verfügbar unter [https://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml), Abruf am 22.12.2017.
- [THOM12] Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Umfassende Einführung aus amanagerorientierter Sicht, 7. Auflage. Wiesbaden 2012.
- [VDI98] VDI 4416: Betriebsdatenerfassung und Identifikation – Identifikationssysteme. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1998
- [VERS04] Versch, A.: Steigerung der Prozesssicherheit durch sensorintegrierte Werkzeugaufnahmen, Dissertation. Darmstadt 2004.
- [VOGE94] Vogelbacher, E.: Werkzeuge in Bearbeitungszentren berührungslos überwachen. In: Werkstatt und Betrieb 127 (1994) 5, S. 390–394.

- 
- [WECK03] Weck, M.; Possel-Dölken, F.: Vertikale Integration. Vom ERP-System zur Werkzeugmaschine und zurück. In: wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 5, S. 366–373.
- [XERA17] <http://www.xerafy.com/en/catalogue/product/dot-in-xs/3>, Abruf am 22.12.2017.