



Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle

2018

Wolfgang Boos
Christoph Kelzenberg
Jan Wiese
Felix Stracke
Christoph Ebbecke
Tim Graberg
Simon Jakubowski
Sven Lapper





**WBA
WERKZEUGBAU
AKADEMIE**

WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH

Die WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH erarbeitet in einem Netzwerk aus führenden Unternehmen des Werkzeugbaus branchenspezifische Lösungen für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit der Branche Werkzeugbau. Im Mittelpunkt der Aktivitäten stehen die Schwerpunkte Industrieberatung, Weiterbildung sowie Forschung und Entwicklung. Durch einen eigenen Demonstrationswerkzeugbau hat die WBA die Möglichkeit, innovative Lösungsansätze in einer Laborumgebung zu pilotieren und schnell für ihre Partnerunternehmen zugänglich zu machen. Zusätzlich werden Schwerpunktthemen in aktuellen Studien vertieft. Diese geben Auskunft über Trends und Entwicklungen von Markt und Wettbewerb.



Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen steht mit seinen 900 Mitarbeitern weltweit als Synonym für erfolgreiche und zukunftsweisende Forschung und Innovation auf dem Gebiet der Produktionstechnik. In vier Forschungsbereichen werden sowohl grundlagenbezogene als auch an den Erfordernissen der Industrie ausgerichtete Forschungsvorhaben durchgeführt. Darüber hinaus werden praxisgerechte Lösungen zur Optimierung der Produktion erarbeitet. Das WZL deckt mit den vier Lehrstühlen Fertigungstechnik, Werkzeugmaschinen, Messtechnik und Qualität sowie Produktionssystematik sämtliche Teilgebiete der Produktionstechnik ab.

Impressum

Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle

Copyright © 2018

Autoren: Prof. Dr. Wolfgang Boos, Christoph Kelzenberg, Jan Wiese, Felix Stracke, Christoph Ebbecke, Tim Graberg,
Simon Jakubowski, Dr. Sven Lapper

Gestaltung: Karlla Giol

ISBN: 978-3-946612-33-9

Druck: printclub

1. Edition

WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH
Campus-Boulevard 30
D-52074 Aachen

www.werkzeugbau-akademie.de

Werkzeugmaschinenlabor WZL
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
Campus-Boulevard 30
D-52074 Aachen

www.wzl.rwth-aachen.de

Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle

2018

Wolfgang Boos
Christoph Kelzenberg
Jan Wiese
Felix Stracke
Christoph Ebbecke
Tim Graberg
Simon Jakobowski
Sven Lapper





Motivation

Marktveränderung

Die Globalisierung hat zu einer starken Verlagerung der Wirtschaftsmacht von der westlichen Welt in aufstrebende Volkswirtschaften in Osteuropa und Asien geführt. Dieser Trend hat sich aufgrund des weiteren Abbaus von Handelsbeschränkungen, des steigenden Bildungsniveaus und hoher Investitionen in die lokale Infrastruktur in Schwellenländern beschleunigt. Die anhaltenden Vorteile dieser Länder hinsichtlich Arbeitskosten bei gleichzeitig abnehmenden Produktlebenszyklen, steigender Individualisierung und erhöhter Dynamik der Märkte führen zu steigendem Wettbewerbsdruck in westlichen Industrienationen.

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wird Industrie 4.0 derzeit als mögliche Lösung gesehen und durch Industrie und Politik entsprechend gefördert. Die echt-

zeitnahe Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten bietet die Chance, Produktivitätspotenziale zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit zu nutzen. Weiterhin ermöglicht Industrie 4.0 durch die Implementierung neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle Umsatzzuwächse zu erzielen.

Durch die prominente Stellung in der industriellen Wertschöpfung zwischen Produktentwicklung und Serienproduktion trägt der Werkzeugbau maßgeblich zur Innovationsfähigkeit und Produktivität der gesamten produzierenden Industrie bei. Marktseitige Lösungen im Bereich Industrie 4.0 zur Optimierung der Produktion des Kunden sind jedoch im Werkzeugbau bisher kaum oder gar nicht vorhanden. Zukünftig wird eine hohe Qualität als Differenzie-



Wirtschaftswachstum

(2017)

Euro-Raum:

2,4 %

Asien:

6,4 %

rungsmerkmal nicht mehr ausreichen, um sich vor dem Hintergrund der genannten Herausforderungen vom internationalen Wettbewerb abzugrenzen. Hierfür müssen das traditionelle Verständnis des Werkzeugbaus als „reiner“ Produktionsbefähiger überdacht und neue Lösungen erarbeitet werden.

Zur Steigerung des Kundennutzens muss die Integration des Werkzeugbaus in die Kundenprozesse weiter ausgebaut werden. Eine Vertiefung der Zusammenarbeit über klassische Dienstleistungen wie Bauteiloptimierung und Serienbetreuung hinaus ist nur über die intensivere Nutzung von Werkzeug- und Produktionsdaten im Rahmen sogenannter datenbasierter Dienstleistungen möglich. Die Generierung dieser Daten wie-

derum erfordert den Einsatz intelligenter Werkzeuge, die über integrierte Sensorik, Aktorik und Regelungstechnik verfügen. Dies führt nicht nur zur Befähigung der Produktion, sondern ermöglicht die Absicherung und gar Optimierung der Produktion hinsichtlich Qualität und Ausbringungsmenge. Neben einer nachhaltigen Differenzierung vom Wettbewerb kann dadurch auf Basis neuer Ertrags- und Geschäftsmodelle der digitale Wandel im Werkzeugbau gewinnbringend gestaltet werden.



89 %

der Unternehmen erwarten, dass die strategische Bedeutung von Industrie 4.0 in den nächsten Jahren steigen wird



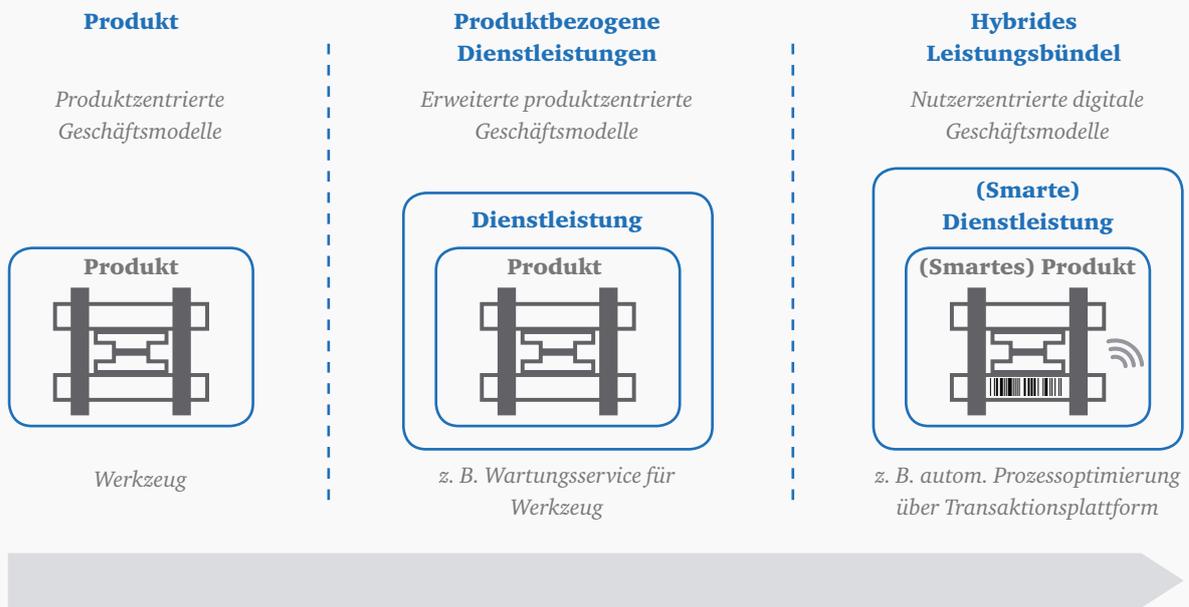
45 %

der Unternehmen setzen derzeit Industrie 4.0-Lösungen ein

Notwendigkeit digitaler Geschäftsmodelle

Geschäftsmodelle des Werkzeugbaus spiegeln das Potenzial datenbasierter Dienstleistungen bisher nicht wider. Die meisten Unternehmen der Branche verstehen sich auch heute noch primär als Produktionsbefähiger, die Werkzeuge entsprechend eines Lastenhefts entwickeln und verkaufen. Vorherrschende Geschäftsmodelle sind entsprechend stark produktzentriert. Hybride Leistungsbündel – flexible und am Kundennutzen ausgerichtete Kombinationen von

Sach- und begleitenden (datenbasierten) Dienstleistungen – werden dem Kunden nur in Ausnahmefällen angeboten. Weder ist die dafür notwendige Technologie in Form von intelligenten Werkzeugen vorhanden, noch sind entsprechende Dienstleistungen definiert und bepreist. Darüber hinaus fehlen Konzepte hinsichtlich Datensicherheit und Datenhandling sowie zur Einbettung intelligenter Werkzeuge ins Leistungsportfolio.



gestern

heute

morgen



\$ 185.000

\$ 89.000

Wertschöpfung pro Mitarbeiter



628

41

Anzahl Patente pro 100.000 Einwohnern



10,0 %

0,9 %

Anteil der Bevölkerung mit IT-Hintergrund

■ Silicon Valley

■ Werkzeugbau

Ein Blick auf das amerikanische Silicon Valley zeigt die Notwendigkeit, auf Ebene der Geschäftsprozesse strategische Weichenstellungen vorzunehmen und nutzerzentrierte Geschäftsmodelle zu implementieren. In den 1950er Jahren als Industriepark zur Herstellung von Elektronikkomponenten gestartet, ist es heute eines der wichtigsten Technologiezentren weltweit. Grund für diese Erfolgsgeschichte sind nicht allein technische Innovationen, sondern vielmehr das Prinzip stetiger Geschäftsmodellinnovation. Beispiele wie Amazon, Apple, Facebook, Google und Microsoft zeigen dies eindrucksvoll. Häufig als reine Hardwarehersteller gestartet, wird heute der Kundennutzen und weniger die reine Hardware in den Fokus gestellt.

Zum Anbieten nutzerzentrierter, datenbasierter Geschäftsmodelle muss der Werkzeugbau zum einen technisches Know-how im Bereich von Sensorik, Aktorik, Algorithmen und Machine Learning erlangen. Darüberhinaus müssen die betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, um intelligente Werkzeuge im Verbund mit datenbasierten Dienstleistungen profitabel am Markt abzusetzen. Hierfür sind digitale Geschäftsmodelle der Schlüssel zum Erfolg. Die Studie stellt die notwendigen Grundlagen für die Umsetzung im Werkzeugbau dar.



Studiendesign

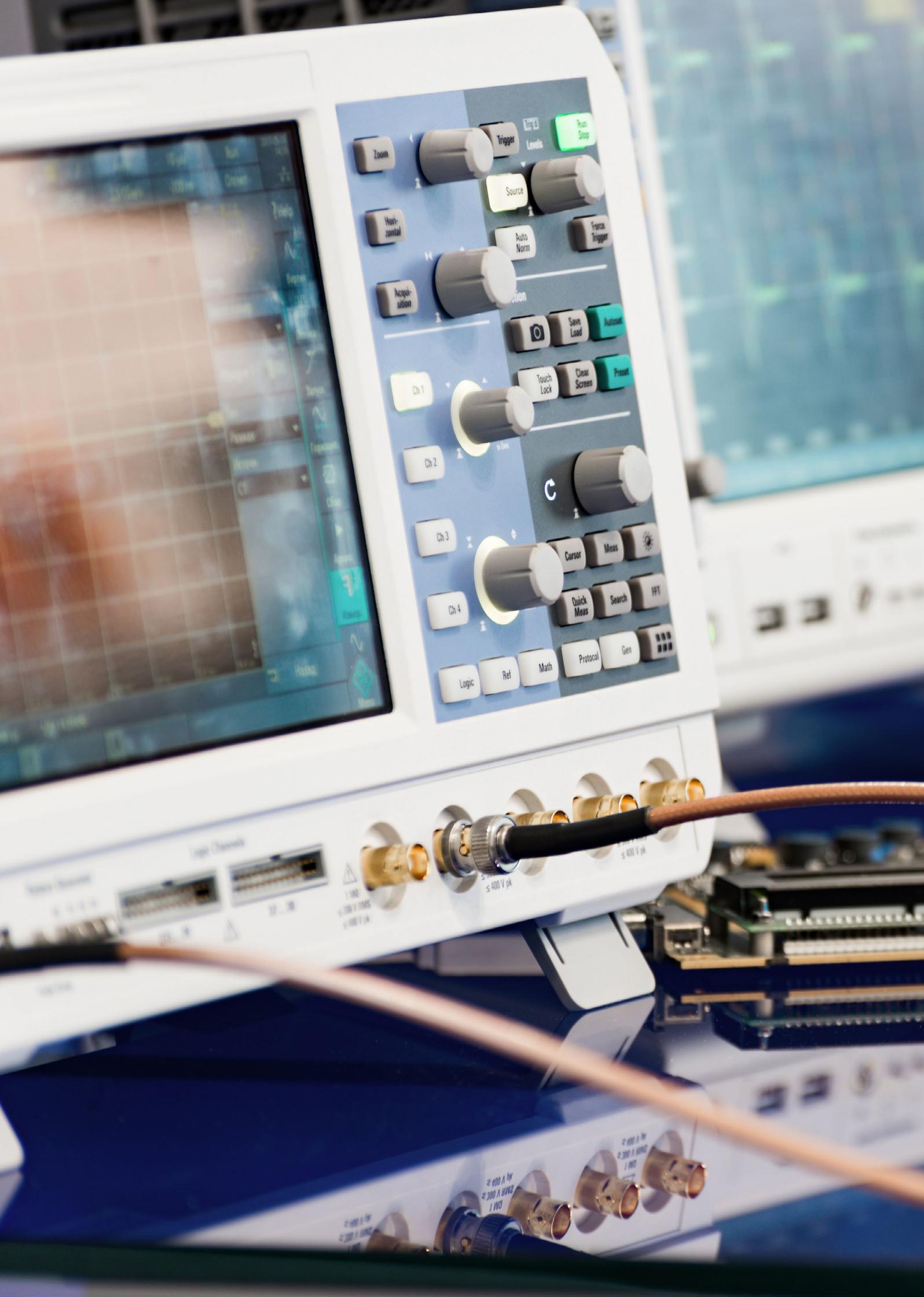
Das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen und die WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH beschäftigen sich in Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Partnern aus der Industrie seit einigen Jahren mit der Entwicklung von intelligenten Werkzeugen in Verbindung mit datenbasierten Dienstleistungen und Geschäftsmodellen. In diesem Zusammenhang sind aus der Vergangenheit vor allem die durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderten Forschungsprojekte Smart Tools und Heat Sensitive Tools zu nennen. In Kooperation mit Unternehmen des Werkzeugbaus und Anbietern von Sensorik und Regelungstechnik wurde im Rahmen dieser Projekte die Auslegung und technische Entwicklung von intelligenten Spritzgießwerkzeugen vorangetrieben. Dies beinhaltet ebenfalls die Erforschung des notwendigen informationstechnischen Umfelds sowie die Grundlagen neuer Geschäftsmodelle. Hierbei wurde vor allem das Ziel verfolgt, die marktseitigen Potenziale der vierten industriellen Revolution im Werkzeugbau nutzbar zu machen. Dies ermöglicht, durch Steigerung der Ausbringungsqualität, Prozesssicherheit und Standzeit, die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen langfristig sicherzustellen.

Zur Unterstützung und Weiterentwicklung der Forschungsaktivitäten wurden 2015 im Rahmen des Netzwerks der WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH unterschiedliche Arbeitskreise gebildet. Dort wurde sich maßgeblich damit beschäftigt, wie die Auslegung intelligenter Werkzeuge gestaltet werden kann. Dazu wurden unter anderem unterschiedliche Sensorik- und Aktoriklösungen zusammen mit Anbietern analysiert und hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit in intelligenten Werkzeugen bewertet.

Ausgangspunkt dieser Studie stellt das Forschungsprojekt „Selbstlernendes mechatronisches Stanzwerkzeug“ (SeMeSta) dar. Ziel des von 2015 bis 2018 durch KMU-innovativ öffentlich geförderten Projekts war

es, die Verfügbarkeit von Stanz- und Umformwerkzeugen durch den Einbau eines intelligenten, selbstlernenden Sensor-Aktor-Regelkreises signifikant zu erhöhen. Das Werkzeug mit integrierter Mechatronik ist damit in der Lage, mittels Sensorik Veränderungen am Werkzeug zu erkennen und diese durch die Justage der Aktorik auszugleichen. Dadurch können sowohl die Standzeit des Werkzeugs optimiert, Ausfallzeit reduziert als auch Anlaufprozesse der Serienproduktion verkürzt und kostengünstiger realisiert werden. Die kundenseitige Realisierung der Potenziale wurde durch die Gestaltung neuer Geschäftsmodelle adressiert. Aktuell forscht das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen zudem im Rahmen des Forschungsprojekts „Datenbasierte Werkzeugverfügbarkeit für die Serienproduktion durch Predictive Maintenance“ (WerkPrima) an der Entwicklung eines datenbasierten Dienstleistungssystems zur Erhöhung der Werkzeugverfügbarkeit für die Serienproduktion.

Das in diesem Zusammenhang generierte Wissen sowie der Austausch mit zahlreichen Unternehmen liefern die Grundlagen der vorliegenden Studie. Diese werden in den Kapiteln „Auslegung Sensorik“, „Auslegung Aktorik“, „Auslegung intelligente Regelung“ sowie „Gestaltung datenbasierter Geschäftsmodelle“ dargestellt. Entsprechend der Komplexität der Thematik sowie einem breiten Spektrum unterschiedlicher Werkzeugtypen und Marktteilnehmer stellt der Leitfaden einen ersten Impuls für zukünftige Entwicklungen dar und kann keine vollständige und tiefgreifende Detaillierung des Themenfeldes leisten. Durch die Aufbereitung der Inhalte anhand des Forschungsprojekts SeMeSta ergibt sich, dass Inhalte an einigen Stellen der Studie spezifisch auf den Blechumformbereich ausgerichtet sind. Zum besseren Verständnis der Thematik werden im Kapitel der Werkzeugauslegung konkrete Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt SeMeSta gezeigt.

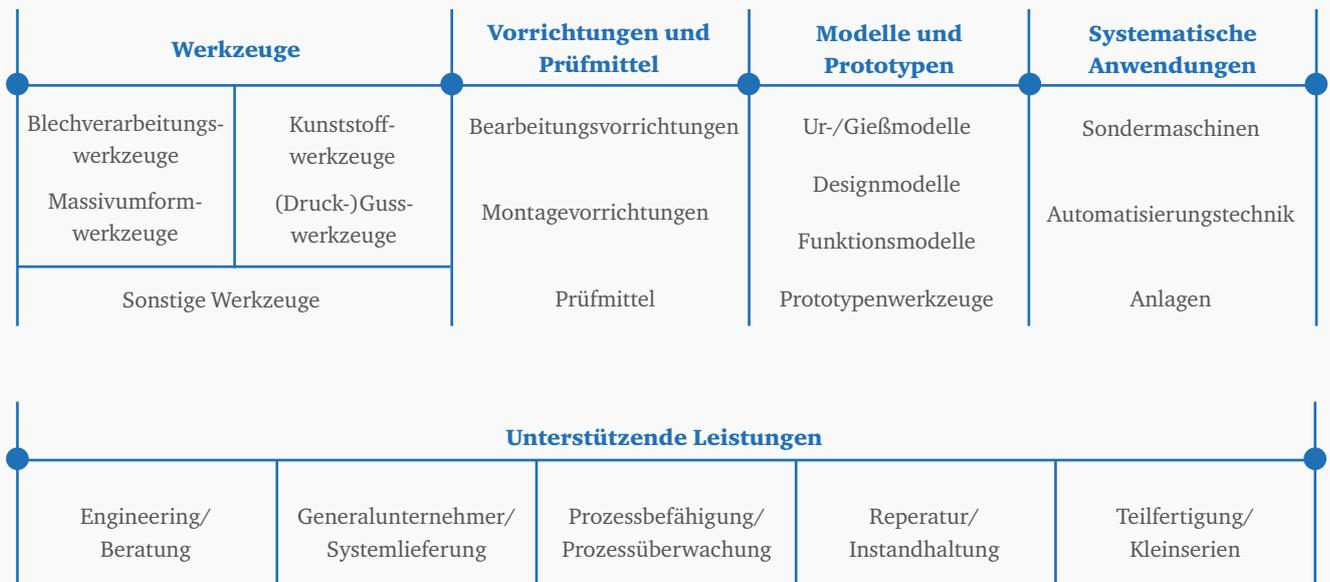




Status quo und Potenziale

Die Branche Werkzeugbau hat durch die zentrale Stellung zwischen Produktentwicklung und Serienproduktion einen wesentlichen Einfluss auf die produzierende Industrie. Ihre gefertigten Werkzeuge werden in nahezu allen produzierenden Branchen eingesetzt, etwa zur Herstellung von Kos-

metikverpackungen oder Außenhautteilen im Automobilbereich. Das Leistungsspektrum reicht von Blechverarbeitungs- und Spritzgießwerkzeugen über Prüfmittel bis hin zu Prototypen und systemischen Anwendungen.



Hochqualitative Werkzeuge schaffen die Grundlage für eine erfolgreiche produzierende Industrie. Zur Schaffung eines klaren Kundenmehrwerts und Differenzierungsmerkmals im Wettbewerb, hat sich für Werkzeugbaubetriebe die Integration in vor- und nachgelagerte Prozessschritte durch Dienstleistungen als erfolgreich erwiesen. Insbesondere datenbasierte Dienstleistungen, etwa auf Basis eines intelligenten Werkzeugs, bieten in Zukunft noch größere Potenziale, um den Nutzen für Kunden und Werkzeugbau zu mehren.

Als wesentliche Erwartungen an intelligente Werkzeuge wurden in einem der genannten Arbeitskreise der WBA das Melden von Produktionsfehlern, das automatische Messen der Critical to Quality (CTQ)-Parameter sowie die Erkennung von Veränderungen

des Materials genannt. Zusätzlich wird die 100 %-Überwachung der Teilequalität angeführt. 42 % der Unternehmen erwarten durch den Einsatz von Sensorik im Werkzeug eine Produktivitätssteigerung von mindestens 10 %. Durch die zusätzliche Verwendung von Aktorik erwarten sogar 3 von 4 Unternehmen eine solche Steigerung. Ebenso sehen die Unternehmen im Hinblick auf Produktionsausfallzeiten und die Dauer von Anlaufprozessen deutliche Potenziale zur Verbesserung des Status quo durch den Einsatz von Sensorik und Aktorik im Werkzeug. 64 % der Unternehmen geben an, dass sie durch den Einsatz von Sensorik im Werkzeug eine Reduzierung der Produktionsausfallzeiten von mindestens 10 % erwarten. Das Potenzial von Sensorik zur Beschleunigung des Anlaufprozesses bewerten sogar 58 % der Unternehmen



**Sensorik
fällt aktuell um**

ca. 8 %

pro Jahr im Preis

mit einer Zeitersparnis von mindestens 10 %. Wird zusätzlich im Werkzeug auch Aktorik verbaut, die datenbasiert Anpassungen am Produktionsprozess vornimmt, gehen sogar 75 % der Unternehmen von einer solchen Beschleunigung des Anlaufprozesses aus. Erste Ansätze zur Sammlung von Daten im Werkzeug während des Anlaufprozesses existieren bereits.

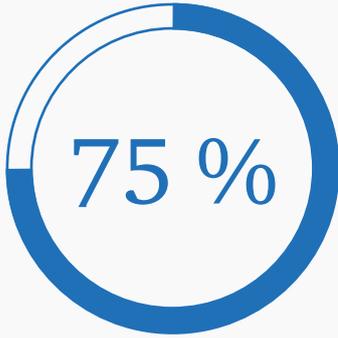
In Bezug auf die Umsetzung intelligenter Werkzeuge und datenbasierter Dienstleistungen stellen die drei Faktoren Kosten, Know-how und Zahlungsbereitschaft der Kunden zentrale Erfolgskriterien dar. Die Kosten für die zu verbauende Hardware sind in den letzten Jahren signifikant gesunken, sodass relevante Sensoren im Hinblick auf den Werkzeugesamtpreis kaum messbare Zusatzkosten verursachen. Ein typisches Thermoelement etwa kostet ca. 10 € und ein üblicher Drucksensor ca. 500 €. Größter Kostentreiber bei der Umsetzung intelligenter Werkzeuge ist der aktuell hohe Aufwand zur Auslegung von Sensorik und Aktorik sowie der Regelparameter und Prozessgrenzen.

Für eine erfolgreiche Auslegung ist insbesondere Wissen bezüglich der Auswertung der aufgenommenen Daten erforderlich. Die zukünftige Bedeutung dieser Kompetenz bewerten 92 % der Werkzeugbaubetriebe als hoch. Dies resultiert vor allem aus der Notwendigkeit einer detaillierten Datenauswertung der durch die verbauten Sensoren aufgenommenen Prozessparameter. Besondere Herausforderung ist neben der technologischen Betrachtung der Prozessparameter auch die Entwicklung eines Geschäftsmodells für den Werkzeugbau. Dabei ist insbesondere zu klären, bei wem die Eigentumsrechte der Produktionsdaten liegen und mit welchen Leistungen der Werkzeugbau welche Margen erzielen kann. Hierbei ist z. B. auch zu hinterfragen, ob anstelle des reinen Werkzeugs mit Dienstleistung nicht auch eine festgelegte Werkzeugproduktivität verkauft werden kann. Den Unternehmen muss jedoch bewusst sein, dass es sich sowohl beim technologischen als auch beim organisatorischen Know-how

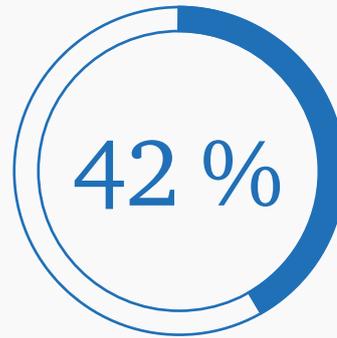
um strategisches Wissen handelt, das nicht kurzfristig erworben und monetarisiert werden kann. Vielmehr muss frühzeitig Know-how aufgebaut werden, um mittelfristig Wettbewerbsvorteile realisieren zu können.

In Hinsicht auf die Zahlungsbereitschaft für die zusätzlichen Dienstleistungen ist ein Wandel zu erkennen. 38 % der Werkzeugbaubetriebe geben eine Bereitschaft zum Preisnachlass von mindestens 5 % an, wenn sie im Gegenzeug umfangreiche Produktionsdaten ihrer Werkzeuge erhalten. Gleichzeitig sind 77 % der Kunden bereit, Daten aus ihren Produktionsprozessen bereitzustellen, um die Werkzeugentwicklung zur Steigerung der Produktivität zu unterstützen. Produzierende Unternehmen akzeptieren außerdem einen höheren Preis für mit Sensorik und Aktorik ausgestattete Werkzeuge. Für ein mit Sensorik ausgestattetes Werkzeug sind 25 % der Unternehmen bereit, einen zwischen 10–20 % höheren Preis zu akzeptieren. Für ein zusätzlich mit Aktorik ausgestattetes Werkzeug geben sogar 67 % der Unternehmen an, eine solche Preissteigerung zu tolerieren.

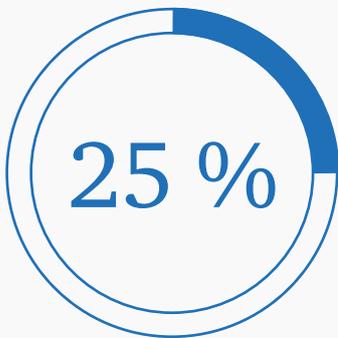
Insgesamt ist festzustellen, dass sowohl das Interesse des Werkzeugbaus als auch der Serienproduzenten an intelligenten Werkzeugen deutlich ansteigt. Erste Anwendungen werden bereits erfolgreich eingesetzt. Für eine vollständige Nutzung der Potenziale ist jedoch ein systematischer Aufbau von technologischem Know-how und passenden Geschäftsmodellen erforderlich.



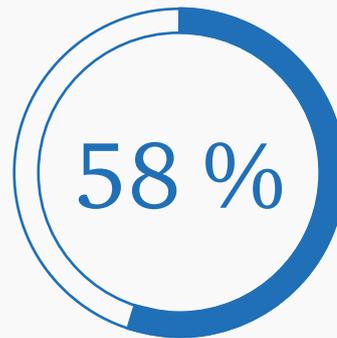
... der befragten Unternehmen erwarten Produktivitätssteigerungen durch Aktorik im Werkzeug



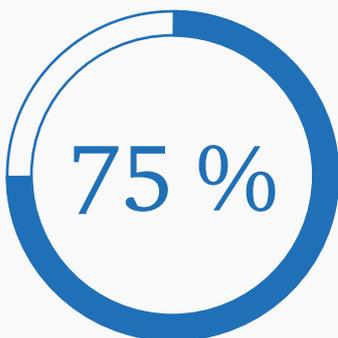
... der befragten Unternehmen erwarten Produktivitätssteigerungen durch Sensorik im Werkzeug



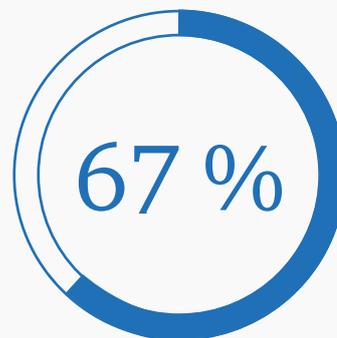
... der befragten Unternehmen sind bereit, 10–20 % mehr für ein mit Sensorik ausgestattetes Werkzeug zu bezahlen



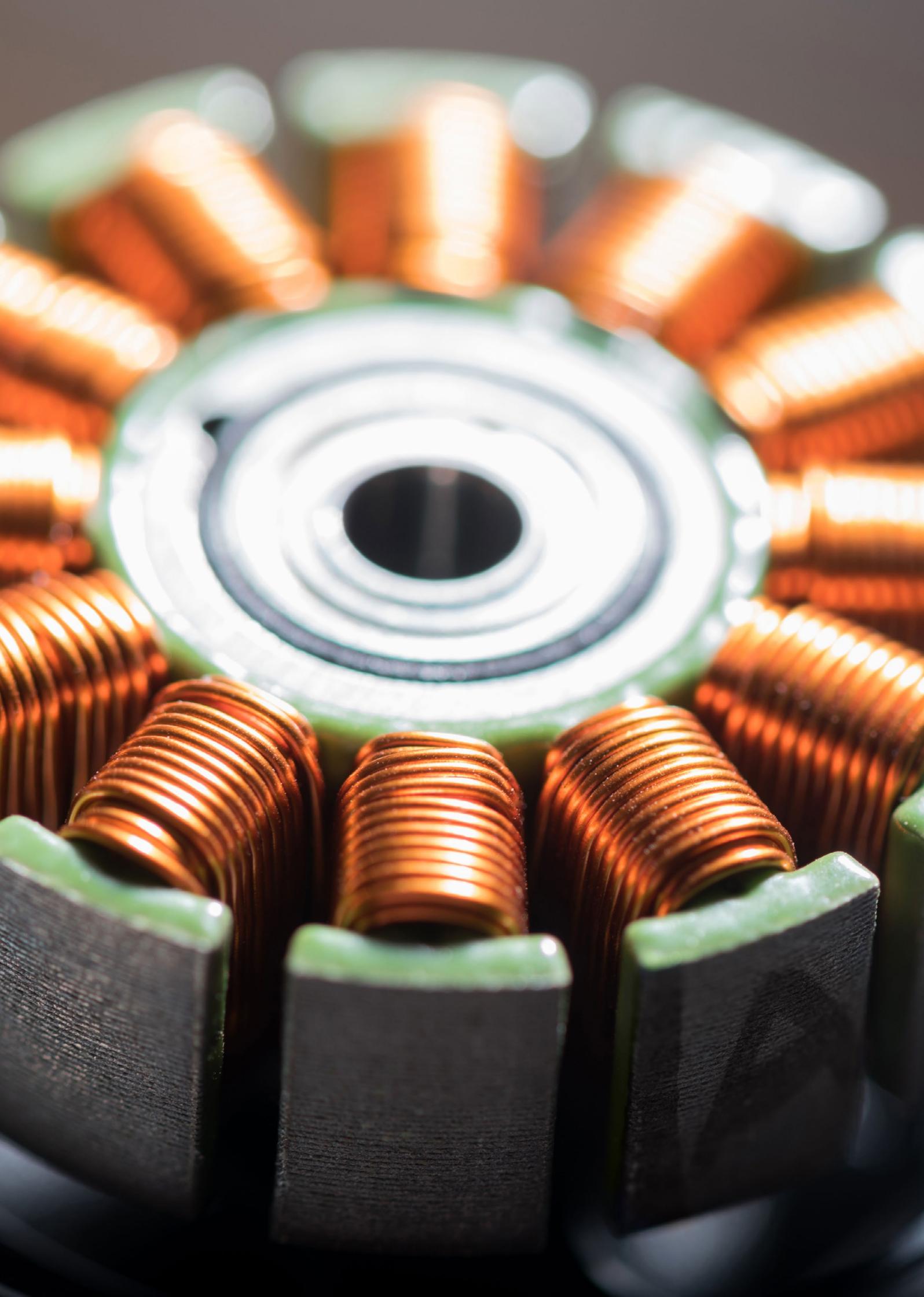
... der befragten Unternehmen erwarten verkürzte Anlaufzeiten durch im Werkzeug verbaute Sensorik



... der befragten Unternehmen erwarten verkürzte Anlaufzeiten durch im Werkzeug verbaute Aktorik



... der befragten Unternehmen sind bereit, 10–20 % mehr für ein mit Aktorik ausgestattetes Werkzeug zu bezahlen





Auslegung intelligenter Werkzeuge

Daten stellen die Basis konkurrenzfähiger Geschäftsmodelle der Zukunft dar. Als technische Grundlage für digitale Geschäftsmodelle bedarf es Intelligenz im Werkzeug, damit die im Werkzeug generierten Daten als digitales Prozessabbild in die digitalisierte Produktion eingebunden werden können.

Hinsichtlich des Leistungsumfangs kann zwischen unterschiedlichen Stufen intelligenter Werkzeuge unterschieden werden. Ein traditionelles Werkzeug verfügt über keinerlei Sensorik und Aktorik, sodass für den Kunden lediglich das Ziel der Befähigung seiner Serienproduktion erreicht werden kann.

Intelligente Werkzeuge der Stufe I, die temporär oder dauerhaft mit Sensorik ausgestattet sind, ermöglichen durch die Nutzung von Data Analytics Methoden (siehe detaillierte Erklärung im Kapitel zur Auslegung einer intelligenten Regelung) eine verbesserte Transparenz über die Vorgänge im Werkzeug. Abweichungen in Form- und Lagetoleranzen oder eine unzureichende Prozessstabilität können auf diese Weise einfacher

einer konkreten Ursache zugeordnet werden. Ebenfalls können über eine zustandsbasierte Wartung (Predictive Maintenance) fest definierte Wartungsintervalle entfallen. Predictive Maintenance ermöglicht auf Basis von Soll-Ist-Abweichungen bestimmter Werkzeugparameter eine bedarfsgerechte Wartung. Neben der automatisierten Bestellauslösung von Ersatzteilen kann auf diese Weise auch ein Werkzeugausfall vermieden werden.

Die zweite Stufe intelligenter Werkzeuge umfasst neben der dauerhaften Integration von Sensorik ebenfalls Aktorik-Komponenten sowie eine intelligente Regelung. Es entfällt somit die manuelle Justage am Werkzeug, da die Regelung basierend auf Soll-Ist-Vergleichen proaktiv auf Parameter des Produktionsprozesses einwirkt. Dank intelligenter Algorithmen kann der Produktionsprozess hinsichtlich Ausbringungsmenge und -qualität zudem fortlaufend optimiert werden. Die vollständige Vernetzung im Produktionsprozess wandelt das Werkzeug zum cyber-physischen System.



10 %
beträgt das jährliche Umsatzwachstum durch Big Data in Deutschland

	Traditionelles Werkzeug	Int. Werkzeug (Stufe I)	Int. Werkzeug (Stufe II)
Sensorik und Datenverarbeitung	X	✓	✓
Aktorik und intelligente Regelung	X	X	✓
Nutzen	Produktionsbefähigung		
		✓	✓
		✓	✓
		✓	✓
		1. Predictive Maintenance	1. Predictive Maintenance 2. Preventive Maintenance 3. Produktivitätssteigerung durch künstliche Intelligenz
		Hohe Prozessstabilität & kontinuierliche Ausbringungsqualität	

Die Auslegung eines intelligenten Werkzeugs stellt die wesentliche Herausforderung für die Unternehmen der Branche Werkzeugbau dar. Um ein intelligentes Werkzeug erfolgreich auslegen zu können, müssen in Schritt 1 zunächst relevante Prozessparameter definiert werden. Diese legen fest, welche Größen als Regel- und Stellgröße verwendet

werden. Daraus resultieren die zur Erfassung und Beeinflussung erforderlichen Sensoren in Schritt 2 und Aktoren in Schritt 3, die jeweils ausgewählt, dimensioniert und im Werkzeug platziert werden müssen. Im letzten Schritt 4 erfolgt die Auslegung und Programmierung der intelligenten Regelung.

Schritt 1 – Definition relevanter Prozessparameter

Für die effektive Auslegung eines intelligenten Werkzeugs ist zunächst die Definition relevanter Prozessparameter erforderlich. Daher muss zu Beginn der Entwicklung eines intelligenten Werkzeugs erarbeitet werden, welche Parameter für die Charakterisierung des zu betrachtenden Umformprozesses relevant sind. Um eine systematische Aufnahme der Größen zu ermöglichen, hat die WBA die vier Dimensionen Produktionsmaschine, Werkzeugzustand, Material und zu fertigendes Bauteil definiert, innerhalb derer die Parameter eingeordnet werden können.

Da es in der Regel unwirtschaftlich ist, alle theoretisch möglichen Prozessparameter zu erfassen, sollten diese einer Klassifizierung unterzogen werden. Basierend auf Fehlerbildern sowie Wartungsintervallen und -kosten vergangener Werkzeugprojekte sollte festgelegt werden, welche Prozessparameter grundsätzlich für eine Erfassung relevant sind. Im Rahmen des Kapitels zur Sensorikauslegung wird dies für einen konkreten Anwendungsfall weiter spezifiziert.

Übersicht

Im Folgenden werden die einzelnen Dimensionen mit möglichen Parametern vorgestellt. Für den Prozess besonders relevante Parameter, die ihren Ursprung in den Spezifikationen der Produktionsmaschine haben, sind die Zieh-, Schließ- und Nennpresskraft sowie die Ziehgeschwindigkeit. Diese bestimmen maßgeblich, welche Werkzeuge auf der betrachteten Maschine zum Einsatz kommen, welche Bauteile hergestellt werden können sowie mit welcher Geschwindigkeit der jeweilige Prozessschritt ablaufen kann. Zu diesen Parametern zählt ebenfalls die Blechhalterpressung. Diese determiniert, in welchem Umfang mit der betrachteten Produktionsmaschine tiefgezogen werden kann. Abhängig von der Stärke der maximal möglichen Anpressung ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen hinsichtlich Ziehtiefe und -geschwindigkeit.

Ein Großteil der Parameter lässt sich auf das Werkzeug und dessen Zustand zurückführen, der einen substantiellen Einfluss auf die Qualität des Umformprozesses ausübt. Zunächst

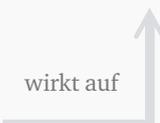
ist der Stanzabfall zu berücksichtigen bzw. wie gut dieser aus dem Werkzeug abgeführt werden kann. Weiterhin ist von Bedeutung, dass das Werkzeug keine Schäden aufweist. Ein Werkzeugbruch ist in jedem Fall zu vermeiden. Auch die Steifigkeit des Werkzeugs ist ein relevanter Parameter, da sich die Form des Werkzeugs beim Schließen unter Aufbringung der zum Umformen erforderlichen Kraft nicht verändern darf. Ebenfalls spielen Verschleißerscheinungen eine Rolle, da diese bestimmen, wie wartungsintensiv das betreffende Werkzeug ist. Auch die richtige Blechposition sowie ein zum Anwendungsfall passendes tribologisches System sind eine Notwendigkeit für einen funktionierenden Umformprozess. Zuletzt ist die Schnittkraft als Voraussetzung für einen fehlerfreien Stanzvorgang zu beachten.

Hinsichtlich des Materials können z. B. Daten wie die Ausgangsblechdicke, das Einzugs- oder Fließverhalten erfasst werden. Auch das zu fertigende Bauteil bestimmt durch seine geometrische Komplexität und Gestaltung maßgeblich den Umformprozess. Zu betrachtende Parameter sind der Schnittgrat, der je nach Bauteilgeometrie variieren kann, sowie das Ausmaß der Rückfederung des Bauteils nach dem Umformvorgang.

Korrelationsmatrix

Die Prozessparameter des Blechumformungsprozesses weisen eine starke Korrelation untereinander auf. So führt die Veränderung eines Parameters zwangsläufig zu einer Veränderung eines oder mehrerer anderer Parameter. Um den Regelkreis eines intelligenten Werkzeugs effektiv auslegen zu können, ist daher im Vorfeld eine detaillierte Ursache-Wirkungs-Analyse der einzelnen Prozessparameter durchzuführen. Nur so kann sichergestellt werden, dass ein umfangreiches Verständnis für den Prozess und das Werkzeugverhalten vorhanden ist und positiv initiierte Veränderungen eines Parameters nicht zu einer negativen Beeinflussung eines anderen Parameters führen.

Eine Korrelationsmatrix ist eine etablierte Methode, um solche Beeinflussungen in Form von vorhandenen Abhängigkeiten zwischen zwei Größen qualitativ (0=keine Abhängigkeit, 1=Abhängigkeit) darzustellen und kann auch als Hilfsmittel bei der Festlegung der Stellgrößen des intelligenten Werkzeugs verwendet werden. Die untenstehende Matrix zeigt einen Auszug einer solchen Untersuchung für ein Blechumformwerkzeug.



	Ziehkraft	Schließkraft	Ziehgeschwindigkeit	Nennpresskraft	Blechhaltepressung	Schnittgrat/Glattschnitt	Rückfederung	Stanzabfall	Werkzeugbruch
Ziehkraft		0	0	0	0	0	0	0	0
Schließkraft	1		0	0	1	0	1	0	0
Ziehgeschwindigkeit	0	0		0	0	0	1	0	0
Nennpresskraft	1	1	0		0	0	1	0	0
Blechhaltepressung	1	0	0	0		1	0	0	0
Schnittgrat/Glattschnitt	0	0	0	0	0		0	0	0
Rückfederung	0	0	0	0	0	0		0	0
Stanzabfall	0	0	0	0	0	0	0		1
Werkzeugbruch	1	1	0	1	0	1	0	0	

Schritt 2 – Auslegung Sensorik

Zur Erfassung relevanter Prozessparameter stehen unterschiedliche Sensortypen zur Verfügung, die sich für unterschiedliche Anwendungen mehr oder weniger gut eignen. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick.

Relevante Sensoriktypen

Um die beschriebenen Prozessparameter erfassen und damit die Transparenz über Vorgänge im Umformprozess verbessern zu können, ist der anforderungsgerechte Einsatz von Sensorik erforderlich. Wesentlicher Erfolgsfaktor bei der Auswahl der einzusetzenden Sensorik ist die Kenntnis über deren Charakteristika. Grundsätzlich können Sensoren in den sechs Dimensionen statische Genauigkeit, dynamisches Verhalten, Messbereich, Überbelastbarkeit, Umwelteinflüsse sowie Zuverlässigkeit charakterisiert werden.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Sensorarten ist darüber hinaus die verwendete Signalform, mit der das Ausgangssignal des Sensors die Messgröße darstellt. Hier wird zwischen amplituden- und frequenz-analogen Signalen sowie digitalen Messsignalen unterschieden. Analoge Ausgangssignale zeichnen sich insbesondere durch eine hohe statische Genauigkeit aus, während digitale Signale hierbei durch die Länge (Bit-Anzahl) der Messvariable limitiert sind. In dem dynamischen Verhalten, d. h. der darstellbaren Auflösung des sich zeitlich ändernden Messsignals, weisen amplituden-analoge Signale das schnellste Verhalten auf. Frequenz-analoge Signale sind hierbei durch die Umsetzbarkeit der Frequenzsteigerung limitiert, während digitale Signale durch die Abtastfrequenz des Sensors beschränkt sind. Die Störempfindlichkeit aufgrund externer Einflüsse auf den Sensor sind bei frequenz-analogen und digitalen Signalen am geringsten.

Neben der Signalform eines Sensors wird dieser durch die Messgröße selber beschrieben. Die für den Werkzeugbau im Zusammenhang mit der Auslegung intelligenter Werkzeuge relevantesten Sensorarten messen Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft & Druck, Drehmoment, Temperatur, Rauheit, Schichtdicke, Strukturdefekte, To-

pografie oder Farbe. Nachfolgend werden die Charakteristika der verschiedenen Sensorarten kurz vorgestellt.

Wegsensoren

Wegsensoren gehören zu den elementarsten und bereits am weitesten verbreiteten Sensorarten. Durch eine Vielzahl verschiedener Messverfahren existieren Sensoren für nahezu jeden Mess- und Einsatzbereich. Die verschiedenen Messverfahren unterscheiden sich dabei wesentlich durch die zur Messung verwendeten physikalischen Effekte, aus denen wiederum die spezifischen Charakteristika resultieren. Resistive Sensoren haben zwar eine verhältnismäßig geringe Genauigkeit, sind dafür jedoch das günstigste Messverfahren und können aufgrund ihrer gekapselten Bauweise auch in anspruchsvollen Einsatzumgebungen verwendet werden. Kapazitive Sensoren weisen im Vergleich hierzu eine hohe Genauigkeit auf, haben jedoch einen vergleichsweise beschränkten Messbereich. Dehnmessstreifen zählen ebenfalls zu den Wegsensoren, obwohl sie eigentlich nur eine Längenänderung anzeigen können. Aufgrund der vielfältigen Gestaltungsweisen der Messstreifen können sie in einer Vielzahl verschiedener Anwendungsfälle eingesetzt werden. Neben den bisher vorgestellten Messverfahren, die allesamt analoge Ausgangssignale besitzen, existieren auch digitale Messverfahren, zu denen inkrementelle Sensoren zählen. Der Messbereich ist hierbei prinzipbedingt relativ groß, jedoch ist das Verfahren insbesondere gegenüber Verschmutzung vergleichsweise empfindlich. Ebenfalls zu den Wegsensoren zählen die konduktiven Sensoren. Diese eignen sich insbesondere zur Messung der Füllhöhe einer Flüssigkeit oder der Bewegung eines Festkörpers.

Geschwindigkeitssensoren

Zur Erfassung der Geschwindigkeit werden häufig die bereits zur Wegmessung verwendeten Sensorarten differenziert. Da durch die Differenzierung höherfrequente Störanteile verstärkt werden, wird für besonders exakte Geschwindigkeitsmessungen teilweise auf weitere Messverfahren zurückgegriffen. Hierzu zählt insbesondere die Nutzung des



Doppler-Effekts, der z. B. bei der Geschwindigkeitsmessung durch Verkehrsradaranlagen zum Einsatz kommt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es vollständig berührungslos erfolgen kann, ist dafür jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden.

Beschleunigungssensoren

Ebenso wie die Erfassung der Geschwindigkeit, lässt sich auch die Beschleunigung durch Differenzierung anderer Messgrößen bestimmen. Für die Erzielung einer maximalen Genauigkeit haben sich jedoch piezoelektrische Verfahren auf Basis der Kraftmessung etabliert. Mit diesem Messverfahren lässt sich ein Messbereich von $\pm 500\text{g}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01\text{g}$ abdecken. Umgekehrt können diese Sensoren außerdem durch Integration entsprechend auch die Geschwindigkeit eines Objekts bzw. dessen zurückgelegten Weg bestimmen.

Da Körperschall als die Verbreitung einer Schwingungsanregung in festen Materialien ebenfalls in Beschleunigungen resultiert, kommen zur Erfassung von Körperschall die beschriebenen Beschleunigungssensoren zum Einsatz. Hiermit lassen sich beispielsweise eine mangelhafte Schmierung im Werkzeug oder ein Werkzeugbruch detektieren. Häufig wird für solche Sensoren die Bezeichnung Körperschallsensor verwendet, dabei handelt es sich jedoch in der Regel um die hier beschriebenen piezoelektrischen Beschleunigungssensoren.

Kraft- & Drucksensoren

Kraft- und Drucksensoren bestimmen die aufgebrachte Kraft häufig über die Auslenkung einer Feder oder über die Anwendung des piezoelektrischen Effekts. Die Berechnung des Drucks kann dann über die Kenntnis der Wirkfläche einfach erfolgen. Für die Bestimmung einer anliegenden Kraft mithilfe einer Feder (z. B. in einer Kraftmessdose) werden die bereits vorgestellten Wegsensoren verwendet, um unter Kenntnis der Federkonstanten die anliegende Kraft bestimmen zu können. Genauso können auch Dehnmessstreifen verwendet werden, um basierend auf der gemessenen Längenänderung die Krafteinwirkung zu bestimmen. Die

Genauigkeit und der Messbereich hängen entsprechend von den Charakteristika des Wegsensors ab. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu Sensoren, die auf dem piezoelektrischen Effekt beruhen, ist außerdem der nutzbare Dynamikbereich. Aufgrund der über die Zeit abklingenden Spannung piezoelektrischer Materialien, sind entsprechende Sensoren nur für dynamische Kraftmessungen geeignet. Während die bisher genannten Sensoren anliegende Kräfte und Drücke lediglich an definierten Punkten messen, ist die Druckmessfolie für die Bestimmung von Flächenpressungen geeignet.

Drehmomentsensoren

Drehmomentsensoren erfassen ein anliegendes Moment häufig, indem die Verdrehung einer Welle gemessen wird. Zur Erfassung dieser Verdrehung kommen in den meisten Fällen die vorgestellten Dehnmessstreifen zum Einsatz. Als zweites relevantes Verfahren ist der Einsatz von Drehmomentmesswellen zu nennen. Dabei werden zwei zueinander verdrehbare Scheiben an die Welle angeflanscht und mithilfe induktiver Wegsensoren die Änderung des Drehwinkels zueinander erfasst. Mit diesem Verfahren kann üblicherweise ein Messbereich bis 20.000 Nm abgedeckt werden. Dabei ist eine Genauigkeit von $0,2\%$ des Endwerts möglich, für kleinere Messbereiche sogar eine Genauigkeit von $0,05\%$.

Temperatursensoren

Für die Messung von Temperaturen stehen Widerstandssensoren aus Platin- oder Nickeldraht, Thermoelemente und Infrarotsensoren zur Verfügung. Für Sensoren auf Nickelbasis ergibt sich dabei eine maximale Messtemperatur von 150 °C , auf Platinbasis von 500 °C . Daneben besteht außerdem die Möglichkeit, Halbleitermaterialien einzusetzen. Hierdurch ergibt sich ein möglicher Messbereich von -10 °C – 500 °C beim Einsatz von Kaltleitern, bzw. 100 °C – 1.000 °C beim Einsatz von Heißleitern. Widerstandssensoren auf Halbleiterbasis zeichnen sich außerdem durch eine sehr geringe Größe von weniger als $0,5\text{ mm}$ aus. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind Widerstandstemperatursensoren insbesondere für die Messung von

Oberflächentemperaturen und dynamischen Temperaturverläufen geeignet. Mit Thermoelementen lässt sich ein Messbereich von -220 °C – 2.400 °C erfassen. Die Sensoren sind dabei ebenfalls sehr klein ($0,25\text{–}3\text{ mm}$) und verhältnismäßig günstig (ca. 10 €). Beide Sensorarten können aufgrund einer geringen Wärmekapazität auch sehr dynamische Vorgänge abbilden. Infrarotsensoren messen die Temperatur, indem sie die Eigenstrahlung eines Körpers im Infrarotbereich erfassen und durch einen IR-Detektor in eine Spannung umsetzt. Vorteile der auch Pyrometer genannten Sensoren ist eine schnelle, berührungslose Messung ($<1\text{ }\mu\text{s}$) sowie ein breiter Messbereich (-40 °C – 3.500 °C). Allerdings ist es problematisch, dass für eine exakte Messung der Emissionsgrad des zu messenden Objekts bekannt sein muss. Dieser schwankt jedoch insbesondere für Metalle stark in Abhängigkeit der aktuellen Oberflächenbeschaffenheit (poliert, oxidiert) sowie der Temperatur.

Optoelektronische Sensoren

Optoelektronische Sensoren wandeln sichtbares Licht, Infrarotstrahlung und ultraviolettes Licht in elektrisch auswertbare Signale um. Der bekannteste Anwendungsfall optoelektronischer Sensoren ist die Lichtschranke, die auf Messung des Abstandes basiert. Genauso können sie aber auch zur Messung von Topografie, Position, Farbe und Kontrast verwendet werden. Aufgrund der verschiedenen Lichtarten, die zum Einsatz kommen, sind diese Messsysteme flexibel an den erforderlichen Mess- und Einsatzbereich anpassbar. Neben der Lichtschranke ist das am häufigsten eingesetzte Messsystem die Kamera. Es existiert eine Vielzahl verschiedener Kameraarten, die beispielsweise Abstandsänderungen (Stereokamera) erfassen können oder 3D-Bilder (Streifenprojektion) erzeugen und mit CAD-Daten vergleichen.

Rauheitssensoren

Die Rauheit einer Oberfläche wird mithilfe von konfokalen Sensoren bestimmt. Durch das Vermessen eines Objekts in allen drei Dimensionen erhält man eine dreidimensionale Darstellung der Oberfläche des Objekts und kann so die Rauheit mit einer Genauig-

keit von ca. 1 nm bewerten. Nutzt man eine synchronisierte, zweiseitige Messung, kann mithilfe konfokaler Sensoren auch die Dicke eines Blechs bestimmt werden.

Ultraschallsensoren

Wesentliches Einsatzgebiet von Ultraschallsensoren ist die zerstörungsfreie Prüfung von Materialien auf Strukturfehler im Inneren von Bauteilen. Da solche Strukturfehler, wie z. B. Hohlräume oder Risse, die Ultraschallsignale anders reflektieren als die intakten Materialbereiche, entsteht beim Vermessen eines Objekts eine Darstellung mit allen Fehlstellen, die größer als $0,6\text{ mm}$ sind. Neben der Erkennung von Strukturdefekten, können Ultraschallsensoren außerdem auch für die Messung von Strukturdrücken verwendet werden. Der Vorteil gegenüber optoelektronischen Sensoren ist insbesondere die Robustheit gegenüber Verschmutzung des Einsatzortes.

Um für den spezifischen Anwendungsfall anforderungsgerechte Sensoren auswählen zu können, muss zunächst untersucht werden, welche Sensoren sich grundsätzlich zur Messung der in Schritt 1 identifizierten Prozessparameter eignen. Darauf aufbauend kann dann unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen ein Sensorik-konzept erarbeitet werden.

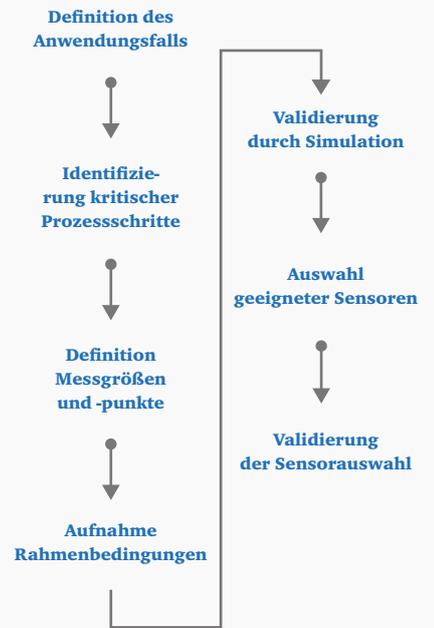
Vorgehen

Um relevante Prozessparameter erfolgreich erfassen zu können, ist eine anforderungsgerechte Auslegung der zur Datenaufnahme verwendeten Sensorik erforderlich. Die WBA hat dafür einen siebenstufigen Auslegungsprozess entwickelt, der die relevanten Messgrößen und -punkte festlegt und somit eine hohe Qualität der Datenerfassung sicherstellt.

Der erste Schritt der Auslegung erfolgt im Rahmen des Projektstarts, indem der Anwendungsfall des intelligenten Werkzeugs definiert wird. Dies kann bspw. die Überwachung des Werkzeugzustands oder der Bauteilqualität sein und bestimmt alle nachfolgenden Schritte des Auslegungsprozesses. Hierfür sollten Wartungsintervalle und -kosten, Fehlerbilder sowie entsprechende Fehlerkosten

vergängerer Werkzeugprojekte analysiert werden, um eine anforderungsgerechte Festlegung des Anwendungsfalls sicherzustellen. Ebenfalls ist der Kunde hinsichtlich seiner Anforderungen zu befragen. Im zweiten Schritt werden die einzelnen Teilprozesse der Bauteilfertigung durch das Werkzeug betrachtet, um die für den Anwendungsfall kritischen Prozesse zu identifizieren. Hierfür ist eine detaillierte Kenntnis der Werkzeugfunktion erforderlich, um den Einfluss der einzelnen Teilprozesse auf den Anwendungsfall valide bewerten zu können. Im ersten Schritt festgestellte Fehlerbilder werden hierfür in Bezug auf deren Ursache und die charakterisierenden physikalischen Größen untersucht. Aus diesen Erkenntnissen werden anschließend Messgrößen und -punkte abgeleitet. Diese bestimmen bereits wesentlich die Charakteristika der erforderlichen Sensorlösungen, werden jedoch durch zusätzliche Rahmenbedingungen eingeschränkt, die insbesondere aus den Bedingungen am Messort sowie den Anforderungen der Regelung hinsichtlich Messfrequenz- und -auflösung resultieren. Sensoren müssen in der Regel wirkstellennah positioniert sein, um die zu messende physikalische Größe valide zu erfassen. Um die Auslegung der Sensorik möglichst effizient durchführen zu können und eine iterative Anpassung der Sensoraus-

wahl zu vermeiden, wird im nächsten Schritt eine Validierung auf Basis einer Simulation durchgeführt. Hierbei werden die zu erwarteten Werte für die Messgrößen ermittelt und mit den Rahmenbedingungen abgeglichen. Die entlang des Auslegungsprozesses gewonnenen Informationen über die Messgrößen und Randbedingungen sowie die Simulationsergebnisse werden abschließend für eine Auswahl geeigneter Sensoren für die Erfüllung des Anwendungsfalls verwendet. Hierfür ist eine umfangreiche Kenntnis über die am Markt verfügbaren Messprinzipien und Sensoriklösungen erforderlich, um eine den abgeleiteten Anforderungen entsprechende Sensorauswahl treffen zu können. Sobald das intelligente Werkzeug fertiggestellt ist, ist im Rahmen von Versuchsreihen die Sensorauswahl zu validieren und gegebenenfalls die Festlegung weiterer Messgrößen und -punkte oder eine Anpassung der verwendeten Sensoren zur Erfassung der Messgrößen erforderlich.



Sensor Parameter	Kraftsensor (DMS, Piezo)	Druckfolie/ Messdose	Induktiver Wegsensor	Radarsensor	Wirbelstrom- sensor	Abstandssensor/ Lichtschanke
Ziehkraft	●	○	○	○	○	○
Schließkraft	●	●	○	○	○	○
Zieh- geschwindigkeit	○	○	●	○	○	●
Nennpress- kraft	●	●	○	○	○	○

○ Keine Eignung

○ Geringe Eignung

○ Mittlere Eignung

● Hohe Eignung

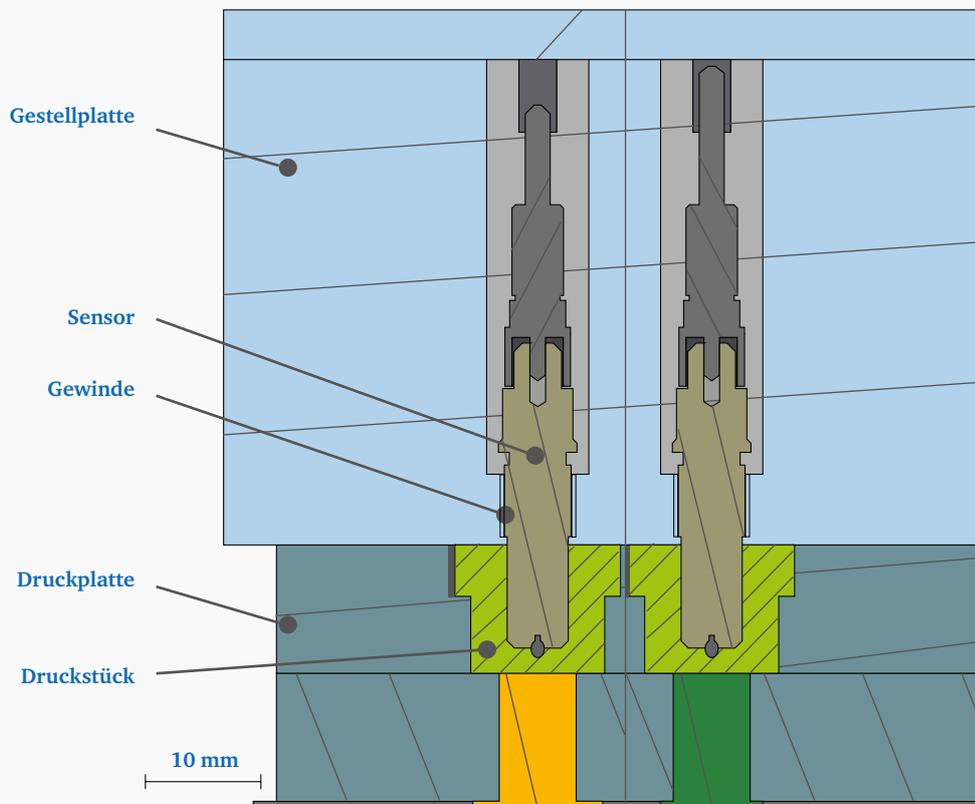
Sensorauslegung im Forschungsprojekt SeMeSta

Im Rahmen des SeMeSta-Forschungsprojekts sollten mit Hilfe verschiedener Sensoren der Werkzeugzustand sowie die produzierten Bauteile in Echtzeit überwacht werden, um Qualitätsmängel frühzeitig zu erkennen.

Die für den Werkzeugverschleiß kritischen Prozessschritte sind im vorliegenden Anwendungsfall von Folgeverbundwerkzeugen in der Stanztechnik die Schnitt- und Umformoperationen. Dort liegen die höchsten Prozesskräfte an, sodass hier ebenfalls der größte Werkzeugverschleiß auftritt. Gleichzeitig erfolgt bei Umformprozessen aufgrund von innerer Reibung eine Erwärmung des Bauteils. Diese Wärme wird teilweise über die mit dem Werkstück im Kontakt befindlichen Komponenten des Werkzeugs abgeleitet. Zusätzlich kommt es zu einer Erwärmung des Werkzeugs durch Reibung zwischen dem Bauteil und angrenzenden Werkzeugwirkflächen. Diese Erwärmung lässt Rückschlüsse

auf die Schmierung und den Werkzeugverschleiß zu. Aus diesen Gründen wurden im Demonstratorwerkzeug exemplarisch eine Schnittstation und eine Umformstation mit Temperatur- und Kraftsensoren versehen. Anhand von Finite-Elemente-Simulationen wurden die maximal am Einbauort zu erwartenden Kräfte bestimmt, woraus der erforderliche Messbereich der Sensoren abgeleitet wurde. Als weitere limitierende Randbedingung musste der geringe verfügbare Bau- raum am Messort berücksichtigt werden.

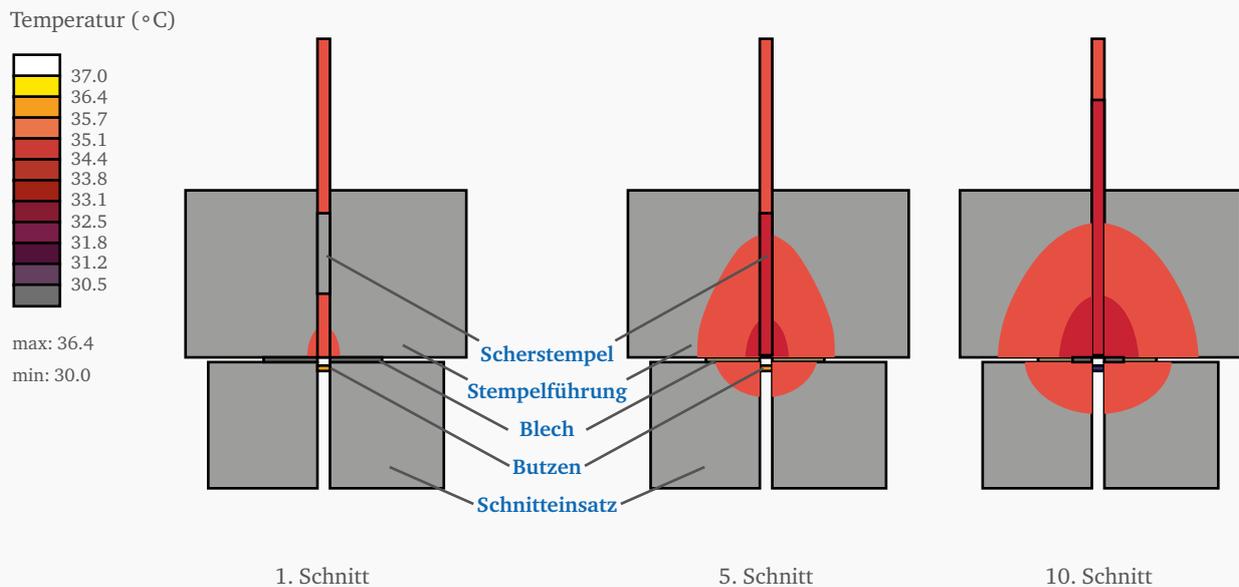
Anhand der Vorüberlegungen bezüglich der Baugröße und des Kraftbereichs zeigte sich, dass piezoelektrische Sensoren für die Verwendung in einem Stanzwerkzeug am besten geeignet sind. Darüber hinaus zeichnen sich diese durch eine hohe Steifigkeit aus und sind besonders für dynamische Anwendungen geeignet. Die untenstehende Abbildung zeigt die Positionierung der Sensoren im Werkzeug.





Der Sensor ist im oberen beweglichen Teil des Stanzwerkzeugs verbaut. Er wird in die Gestellplatte eingeschraubt, welche mit der Druckplatte fest verbunden ist. Die Stirnseite des Sensors ist über ein in der Druckplatte befindliches Druckstück vorgespannt. Gleichzeitig ist durch diese Anordnung der Sensor vor Überlast geschützt. Die Messung der Kraft erfolgt hierbei indirekt über Dehnung des Druckstücks im Kraftnebenschluss.

Für die Auswahl der Temperatursensoren wurden ebenfalls Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt. Ziel dabei war es die Größenordnung der Erwärmung sowie die bestmögliche Position für die Temperatursensoren zu finden. Die untenstehende Abbildung zeigt die Erwärmung der dem Blech angrenzenden Werkzeugkomponenten nach dem ersten, dem fünften und dem zehnten Schnitt.



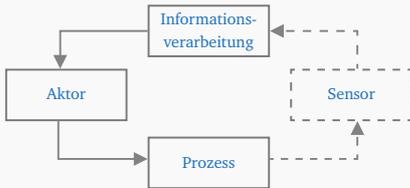
Auf Basis der Ergebnisse konnte festgestellt werden, dass für den Temperatursensor ein Temperaturbereich bis ca. 150 °C ausreichend ist. Unter Berücksichtigung des Messorts wurden Thermolemente ausgewählt, da diese speziell in der kleinsten Bauform als Mantelthermometer kleinere Durchmesser verglichen mit Widerstandsthermometern aufweisen, weshalb sie für die Platzierung im Schnitteinsatz besonders geeignet sind.

Für die Erfüllung des zweiten Anwendungsfalls, der Erkennung von Qualitätsmängeln an den gefertigten Bauteilen, hat sich gezeigt, dass optische Verfahren im Hinblick auf Bauteilgröße, Messzeit und Auflösung am geeignetsten sind. Ein Messsystem, welches Bauteilmaße im Werkzeug erfasst, muss sehr kompakt sein und einen kurzen

Arbeitsabstand aufweisen. Darüber hinaus sind die Bedingungen zur mikrometergenauen Messung sehr anspruchsvoll. Sowohl Bauteil als auch Werkzeug vibrieren und zusätzlich erschweren Schmierfilm und Ölnebel die Messung. Zur Auswahl einer geeigneten Sensorik wurden Leihgeräte verschiedener Hersteller getestet. Es zeigte sich, dass die Messergebnisse unter Laborbedingungen gerade noch ausreichend waren, aber es war davon auszugehen, dass diese unter realen Bedingungen im Werkzeug ungenügend sein würden. Aus diesen Gründen wurde das Messsystem letztendlich zur Anbringung am hinteren Ende des Werkzeugs konzipiert. Die fertigen Werkstücke werden zunächst durch Abblasen von Öl befreit und anschließend mittels zweier Durchlichtmesssysteme, welche von der Stanzpresse entkoppelt sind, vermessen.

Schritt 3 – Auslegung Aktorik

Ein Aktor ist eine mechanische oder elektromechanische Maschinenkomponente, die in der Lage ist, ein elektrisches Signal aufzunehmen und eine mechanische Bewegung, wie eine Rotation oder eine lineare Bewegung, zu initiieren. Diese Bewegungen ermöglichen intelligenten Werkzeugen, Werkzeugeinstellungen durch personenunabhängiges Nachstellen zu verändern. Der Aktor dient somit als Bindeglied zwischen der Informationsverarbeitung und dem realen, zu steuernden Prozess.



Ein Aktor besteht aus verschiedenen Komponenten, welche im Zusammenspiel ein Eingangssignal in eine fest definierte Bewegung umwandeln. Das Eingangssignal, auch Stellsignal genannt, stammt hierbei von einem oder mehreren Sensoren und wird durch die den Prozess regelnde Steuereinheit zur Verfügung gestellt. Das Stellsignal wird im Aktor durch den Signalumformer aufgenommen und in eine Steuergröße umgewandelt. Die physische Übersetzung der Steuergröße in einen Bewegungsvorgang erfolgt anschließend durch den Stellantrieb, welcher Hilfsenergie in die gewünschte Translations- oder Rotationsbewegung umsetzt. Die hierzu benötigte Energie wird entweder elektrisch oder in Form von Strömungsenergie zur Verfügung gestellt. Aktoren können dementsprechend anhand der verwendeten Energiequelle in zwei Klassen unterteilt werden.

Im Folgenden werden relevante Aktoriklösungen in den zwei zu unterscheidenden Klassen vorgestellt. Hierbei wird zunächst das jeweilige Grundprinzip erläutert. Anschließend werden die spezifischen Charakteristika vorgestellt und in Beziehung zu praktischen Einsatzmöglichkeiten gesetzt.

Relevante Aktoriklösungen

Die am weitest verbreiteten Aktoriklösungen verwenden elektrische Energie als Antrieb. Gründe hierfür sind, neben einem hohen Wirkungsgrad und guten Regeleigenschaften, das breite Leistungs- sowie Geschwindigkeitsspektrum, welche eine Vielzahl von Anwendungsszenarien ermöglichen. Die geringe Geräuschentwicklung sowie die hohe

Stellgenauigkeit zählen neben einer kompakteren Bauform als beispielsweise pneumatische oder hydraulische Aktoren zu weiteren Vorteilen elektrisch angetriebener Aktoren. Nachfolgend werden zunächst auf Basis elektrischer Energie wirkende Aktoren vorgestellt. Diese umfassen elektromechanische, elektromagnetische sowie piezoelektrische Aktoren. Anschließend wird auf durch Strömungsenergie angetriebene Aktoren eingegangen.

Elektromechanische Aktoren

Der klassische Elektromotor bildet die Gruppe der elektromechanischen Aktoren. Diese sind in zahlreichen Ausführungsvarianten verfügbar und erlauben so eine große Anzahl verschiedener Einsatzmöglichkeiten in intelligenten Werkzeugen. Vorteile elektromechanischer Aktoriklösungen sind die hohe Positioniergenauigkeit und gute dynamische Eigenschaften, welche insbesondere im Bereich kleiner bis mittlerer Stelleistungen zu einer weiten Verbreitung geführt haben. Grenzen sind elektromechanischen Aktoren jedoch gesetzt, wenn hohe Stellkräfte im Bereich von 1.000 N erforderlich sind. Zudem sind Einsatzfähigkeit und Lebensdauer elektromechanischer Aktoriksysteme bei hohen Temperatur- und Vibrationsbeanspruchungen begrenzt.

Elektromagnetische Aktoren

Elektromagnetische Aktoren verwenden einen Hubmagneten, welcher durch elektromagnetische Krafteinwirkung kontinuierlich bewegt werden kann. Besonders geeignet sind elektromagnetische Aktoriklösungen für dynamische Positionieraufgaben bei geringen Gegenkräften. Durch sogenannte Betätigungsmagnete lassen sich hohe Zugspannungen für kurze Stellstrecken bei einer äußerst kompakten Bauform realisieren. Gleichzeitig ist der Stellbereich jedoch auf Strecken zwischen 10 und 25 mm begrenzt. Nachteilig wirkt sich auch die ausschließliche mechanische Führung des Aktors aus, welche bereits bei geringen Querkräften zu Reibung und damit Verschleiß oder sogar Verklemmen führen kann. Dies erfordert eine entsprechende konstruktive Berücksichtigung in der Auslegung.

Piezeoelektrische Aktoren

Piezeoelektrische Aktoren verwenden piezeoelektrische Materialien, die beim Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Länge verändern. Durch die schnelle Reaktionszeit piezeoelektrischer Materialien können im Vergleich zu anderen Aktoriklösungen auch große Stellkräfte bis 5.000 N bei einer sehr hohen Stelldynamik realisiert werden. Zudem entsteht bei piezeoelektrischen Aktoriklösungen nahezu kein Verschleiß. Jedoch erlauben piezeoelektrische Aktoriklösungen lediglich sehr kleine Stellstrecken und weisen eine hohe Temperaturabhängigkeit auf, sodass sich lediglich ein begrenzter Einsatzbereich ergibt.

Durch Strömungsenergie angetriebene Aktoren, auch fluidtechnische Aktoren genannt, zeichnen sich im Allgemeinen durch einen robusten Aufbau, eine sehr hohe Leistungsdichte und sehr große Stellbereiche aus, besitzen jedoch Nachteile hinsichtlich der Positioniergenauigkeit, die lediglich im Bereich von einigen 10 µm liegt. Ein weiterer Nachteil dieser Aktoren ist der im Vergleich zu elektrisch angetriebenen Aktoren niedrige Wirkungsgrad. Nicht zu vernachlässigen ist zudem, dass stets eine entsprechende Hilfsenergie benötigt wird, welche den Aktoriklösungen zur Verfügung gestellt werden muss. Folgend werden pneumatische und hydraulische Aktoren vorgestellt.

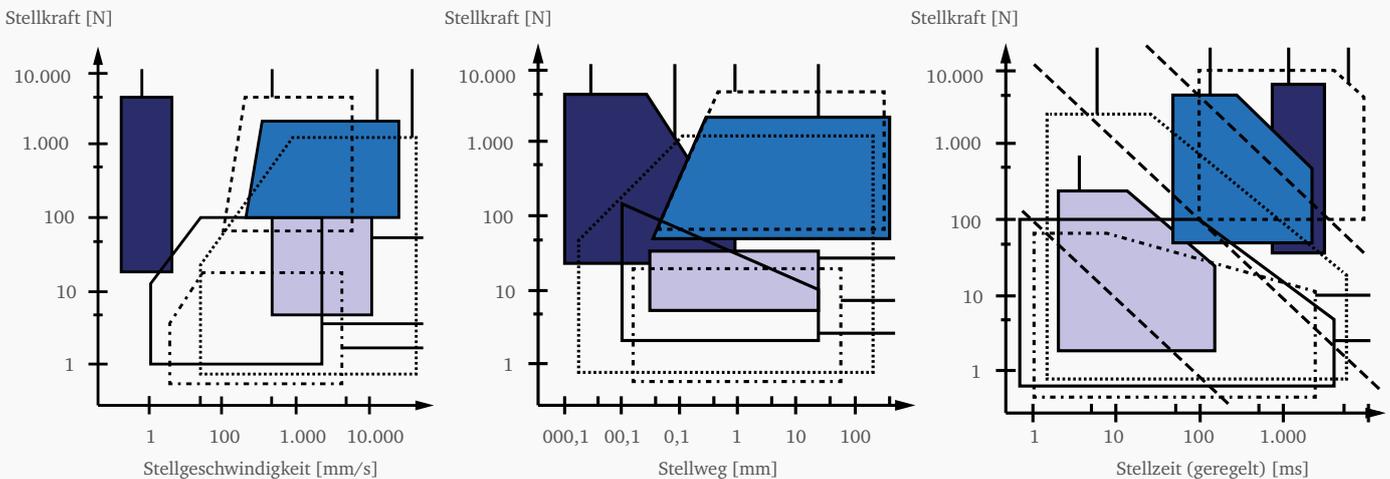
Pneumatische Aktoren

Pneumatische Aktoren wandeln die pneumatische Stellenergie der Druckluft in eine mechanische Bewegung um. Die hohe Kompressibilität und Energiespeicherfähigkeit dieser Aktoriklösungen ermöglichen leistungsfähige und dynamische Stellantriebe. Im Bereich mittlerer Stellkräfte von 0,1 bis 5 kN können pneumatische Aktoriklösungen hohe Stellgeschwindigkeiten und große Stellstrecken realisieren. Hierbei wird eine hohe Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit erreicht, sodass ein Einsatz auch bei hohen Umgebungstemperaturen und Verschmutzung möglich ist. Reibung und Kompressibilität im pneumatischen System führen jedoch zu einer eingeschränkten Positioniergenauigkeit. Außerdem sind teilweise große Abmessungen in der konstruktiven Gestaltung vorzusehen.

Hydraulische Aktoren

Das Arbeitsmedium hydraulischer Aktoren ist überwiegend Öl, das mit einer elektrisch angetriebenen Kolbenpumpe verdichtet und einem Stellglied zugeführt wird. Vorteilhaft ist der Einsatz hydraulischer Aktoriklösungen, wenn hohe und dynamische Stellkräfte bei gleichzeitig kleinem Bauraum erforderlich sind. Aufgrund der geringen Eigenmasse bei großer Kraftaufbringung ermöglichen hydraulische Aktoriklösungen eine dynamische Positionierung. Zudem bieten sie eine hohe Steifigkeit und Stoßfestigkeit, welche durch pneumatische Aktoriklösungen nicht

- 1. Piezoaktor
- 2. DC-Motor/Spindel
- 3. hydr. Stellzylinder
- 4. pneu. Stellzylinder
- 5. Unterdruckaktor
- 6. Schrittmotor
- 7. Elektromagnet



erreicht wird. Jedoch weisen auch hydraulische Aktoren aufgrund von Reibung und komplexer Dynamik eine geringere Positioniergenauigkeit als elektrische Aktoriklösungen auf. Zudem entstehen häufig hohe Systemkosten.

Vorgehen

Die anforderungsgerechte Auslegung der Aktorik eines intelligenten Werkzeugs erfordert, wie auch die Auslegung der Sensorik, ein systematisches Vorgehen, um sicherzustellen, dass der Fertigungsprozess gezielt und erfolgreich gesteuert werden kann. Analog zur Auslegung der Sensorik kommt hierzu der durch die WBA entwickelte siebenstufige Auslegungsprozess zum Einsatz.

Die ersten beiden Schritte zur Auslegung der Aktorik erfolgen analog zur Auslegung der Sensorik und können daher aus der vorhergehenden Betrachtung übernommen werden. Im Unterschied zur Sensorikauslegung werden die als kritisch identifizierten Prozessschritte im Zuge der Aktorikauslegung dahingehend analysiert, durch welche Stellgrößen der zu regelnde Zustand beeinflusst werden kann. Hierzu ist die Werkzeugfunktion detailliert zu untersuchen, um jene Parameter herauszuarbeiten, welche durch die Aktorik zu steuern sind. Zudem ist zu eruieren, welche Stellgrößen eine effektive Beeinflussung des Fertigungsprozesses sowie des Fertigungsergebnisses ermöglichen und an welchen Stellenorten eine Anpassung dieser Stellgrößen im Werkzeug möglich ist. Denkbar ist hierbei beispielsweise die Anpassung des Fahrwegs eines bestimmten Schiebers. Anschließend sind die Rahmenbedingungen zur Realisierung der Aktoriklösung entsprechend der definierten Stellgrößen und -orte zu ermitteln. Mithin werden beispielsweise notwendige Stellbereiche, Stellgeschwindigkeiten und Stellkräfte ermittelt, welche durch die Aktoriklösung umzusetzen sind. Um eine hohe Lebensdauer der Aktoriklösung sicherzustellen, müssen zudem die Randbedingungen am geplanten Stellort ermittelt werden, wie beispielsweise das anfallende Temperaturniveau, auf den Aktor einwirkende Kräfte oder im Werkzeugbetrieb auftretende Vibrationen. Nach einer

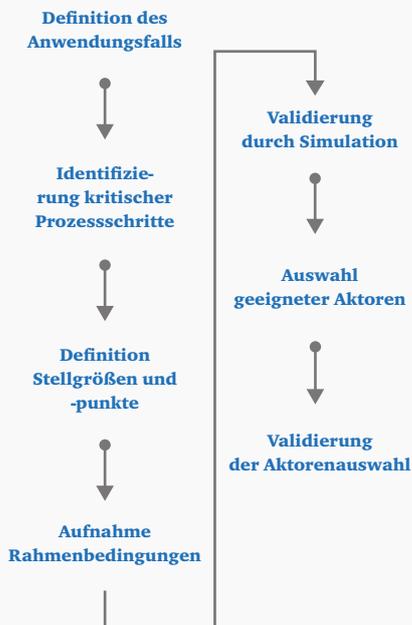
Simulation der ermittelten Lösung erfolgt die eigentliche Auswahl geeigneter Aktoren zur Realisierung der Aktoriklösung. Den Abschluss bildet die Validierung der Lösung in Versuchsreihen, um die Serienreife der ausgewählten Aktorik sicherzustellen.

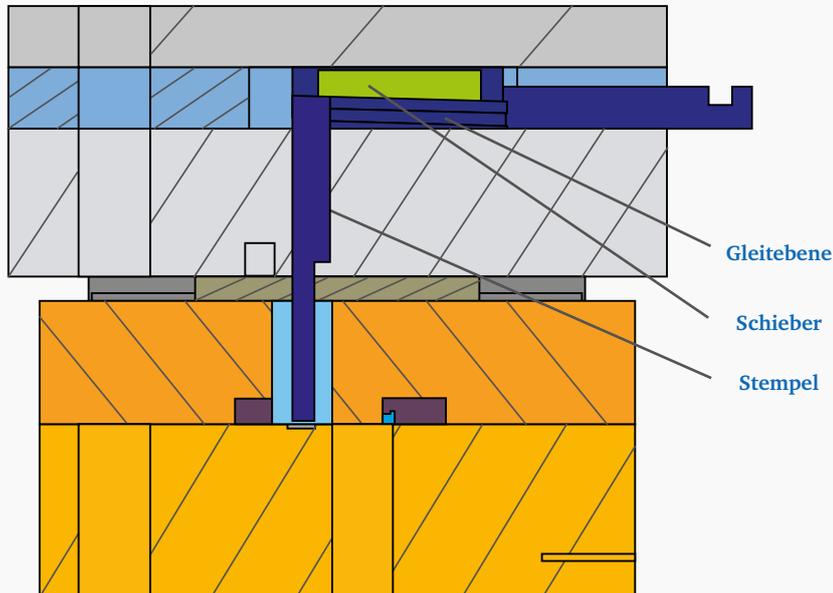
Auslegung der Aktorik im Forschungsprojekt SeMeSta

Neben der Überwachung des Werkzeugzustands mithilfe von Sensoren, wurden im Rahmen des SeMeSta-Forschungsprojekts Aktoren in das Werkzeug integriert, welche eine automatische Nachjustierung erlauben und somit die langfristige Prozesssicherheit gewährleisten sowie die Qualität der Bauteile erhöhen.

Im Anwendungsfall wird zur Anpassung der Werkzeugeinstellung in den meisten Fällen lediglich der Hub von Stempeln verändert, was eine rein translatorische Bewegung darstellt. Aufgrund der hohen auf den Stempel einwirkenden Kräfte, wurde eine elektromechanisch angetriebene Mechanik zur Realisierung der Aktorik verwendet. Hierbei dient eine Nut im Stempel und ein dazugehöriges Gegenstück am Schieber als Führungslager, welches eine horizontale Bewegung des Schiebers in eine vertikale Bewegung des Stempels umwandelt. Der Winkel der Führungsflächen bestimmt dabei das Kraft-Weg-Verhältnis. Die Integration der Aktorik in das intelligente Werkzeug ist auf der rechten Seite dargestellt. Die Abbildung zeigt die Realisierung einer umlenkenden Mechanik zur Variierung des Stempelhubes mittels Stellmotor.

Aus den geometrischen Rahmenbedingungen der verwendeten Mechanik sowie der am Stempel auftretenden Reaktionskräfte lassen sich die Anforderungen an die Aktoren ableiten. Anhand von Finite-Elemente-Simulationen wurde die maximal auftretende Reaktionskraft auf ungefähr 100 N taxiert. Der maximale Stellweg liegt bei 200 µm, die dazugehörigen Winkel liegen zwischen 1° und 2,5°.





Mit diesen Angaben konnten folgende Anforderungen hergeleitet werden:

1. Notwendiger Stellweg: 10 mm
2. Minimale Belastungsgrenze: 20 N
3. Minimale Positioniergenauigkeit: 50 μm

Antriebe, die das Positionieren des Stempels realisieren sollen, müssen im Oberteil des Stanzwerkzeugs untergebracht werden. Hier sind die verwendeten Aktoren aufgrund von 600–1.200 Hub pro Minute und einer Gesamthubzahl von 10 Mio. über die Lebensdauer des Werkzeugs großen Belastungen ausgesetzt. Der Einsatz von Aktoren mit möglichst geringer Masse und mit möglichst wenigen beweglichen Komponenten ist daher vorteilhaft. Zudem ist die Berücksichtigung von Möglichkeiten zum aufwandsarmen Austausch des Aktors in der konstruktiven Auslegung vorzusehen. Aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten, des kleinen benötigten Bauraums und der guten Positioniergenauigkeit wurden elektromechanische

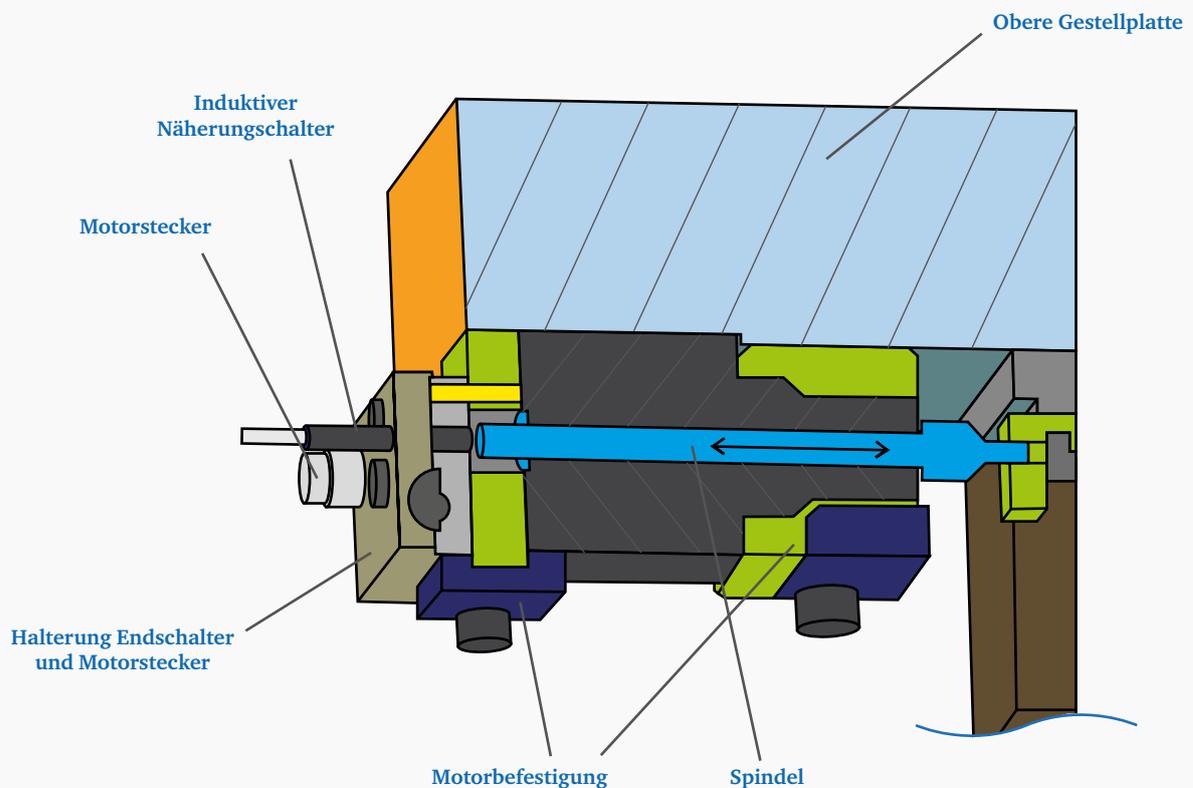
Aktoren zur Positionierung des Schiebers ausgewählt. Pneumatische und hydraulische Aktoren stellen wegen ihrer großen Baugröße und mangelnder Positioniergenauigkeit keine veritablen Alternativen dar. Piezoelektrische Antriebe können zwar hochgenau positionieren, weisen allerdings einen hohen Anschaffungspreis auf.

Die meisten elektromechanischen Aktoren realisieren eine rotatorische Bewegung, welche für den Anwendungsfall des SeMeSta-Forschungsprojekts durch eine entsprechende Mechanik in eine translatorische Bewegung umgesetzt werden musste. Im einfachsten Fall wird dies über eine direkt mit dem sich drehenden Rotor verbundene Spindelmutter realisiert. Bei Drehung des Rotors wird hierbei eine Gewindespindel, die sich in einem Führungslager befindet, vor- bzw. zurückgeschoben. Der maximale Verstellweg wird hierbei über die Länge der Spindel vorgegeben, während die Spindel- bzw. Gewindesteigung die Positioniergenauigkeit und Verfahrgeschwindigkeit bestimmt.

Als Antrieb wurde im Rahmen des SeMeSta-Forschungsprojekts ein Schrittmotor ausgewählt. Ausschlaggebend hierzu waren die hohe Positioniergenauigkeit, die Robustheit des Antriebs, das vorhandene Haltemoment in der Ruhelage sowie ein niedriger Anschaffungspreis. Hierbei wird durch den Antrieb ein maximaler Hub von 19,05 mm bei einer linearen Auflösung von 0,003 mm erreicht. Die maximale lineare Verstellgeschwindigkeit beträgt 0,25 mm/s, andere Varianten erlauben jedoch bis zu 1,5 mm/s.

Zur Aufnahme der aktuellen Zustandsinformation der Aktoriklösung wurden induktive Näherungsschalter verwendet. Diese sind sehr robust und verwenden keinerlei bewegliche Teile. Ausgerichtet auf die Spindel des

Antriebs wird somit die Erreichung eines bestimmten Punktes im Verfahrweg registriert, welcher als Input für die Steuerung des intelligenten Werkzeugs dient. In der nachfolgenden Abbildung ist die vollständige konstruktive Einbindung des Schrittmotors im Anwendungsfall des SeMeSta-Forschungsprojekts inklusive induktivem Näherungsschalter dargestellt.





Schritt 4 – Auslegung intelligente Regelung

Im folgenden Kapitel wird die Verbindung der Sensorik- mit der Aktoriklösung des Werkzeugs mithilfe einer intelligenten Regelung behandelt. Hierzu sind die durch die Sensorik aufgenommenen Informationen zu analysieren und auf mögliche Abweichungen zum definierten Sollzustand zu überprüfen. Erkannte Abweichungen sind durch eine zielgenaue Ansteuerung der Aktorik zu korrigieren. Zur Vermittlung der notwendigen Grundlagen werden zunächst die Themen Regelungstechnik und Data Analytics beschrieben. Im Anschluss wird auf die Auslegung der intelligenten Regelung eingegangen.

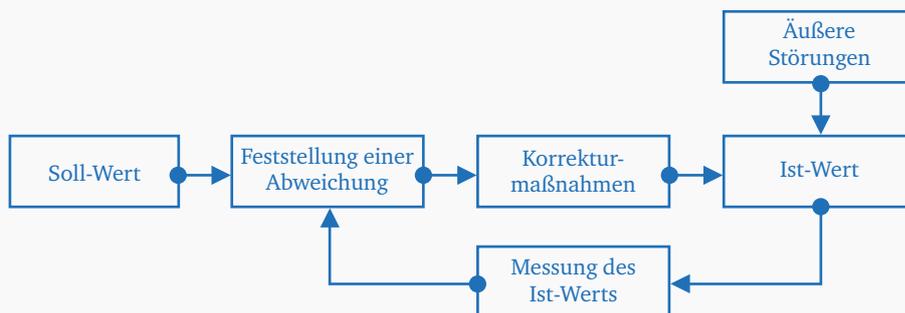
Regelungstechnik

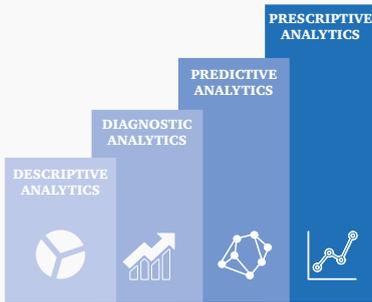
Das Bindeglied zwischen der Informationsaufnahme mithilfe von Sensoren und der Beeinflussung des realen Prozesses durch Aktoren bildet die Regelungstechnik. Die Regelungstechnik behandelt die zielgerichtete Beeinflussung eines dynamischen Systems, dessen Parameter auch unter dem Einfluss externer Größen in bestimmten Prozessgrenzen gehalten werden. Hierzu müssen Abweichungen in den aufgenommenen Messgrößen erkannt und in ausgleichende Stellsignale übersetzt werden. Regler folgen demnach dem grundsätzlichen Regelkreis Messen, Vergleichen und Stellen. Die Regelungstechnik ist damit ein unum-

gänglicher Bestandteil der Automatisierung und ermöglicht neben der Regelung anhand von Optimalitätskriterien Anpassungen an zeitlich veränderlichen Strukturen.

Ein Regelkreis dient dazu, eine vorgegebene physikalische Größe (Regelgröße) auf einen gewünschten Wert (Sollwert), auch Führungsgröße genannt, zu bringen und dort unabhängig von auftretenden externen Einflüssen zu halten. Dies erfordert eine Messung des aktuellen Werts der Regelgröße und einen Vergleich mit dem vorgegebenen Sollwert. Die Differenz aus Regel- und Führungsgröße bildet eine Regelabweichung, aus welcher unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften des Systems eine Stellgröße erzeugt wird. Die Wirkungsweise ist in untenstehender Abbildung schematisch aufgeführt.

Die Aufgabe der Regelungstechnik in intelligenten Werkzeugen ist die technische Umsetzung gewünschter Regelaufgaben. Hauptaufgabe hierzu ist die mathematische Beschreibung des zu regelnden Systems anhand eines Modells. Zur Modellierung und Beschreibung von Systemen werden schematisch sogenannte Blockschaltbilder verwendet, welche bei der Strukturierung realer Zusammenhänge im Sinne der Modellierung unterstützen.

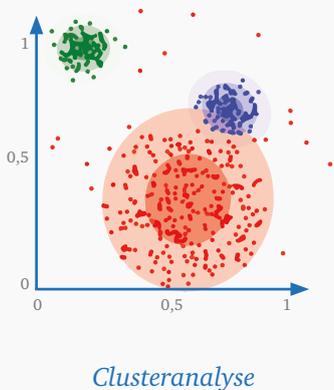
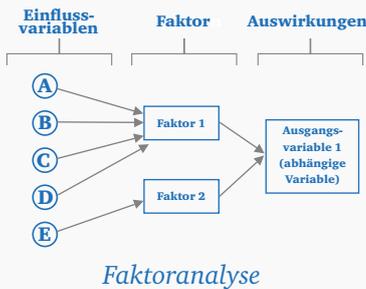




Data Analytics

Zur Auslegung der Regelung intelligenter Werkzeuge wird fundiertes Wissen über den zu regelnden Prozess benötigt. Oftmals ist die frühzeitige Erkennung von Abweichungen oder Unregelmäßigkeiten in den Messgrößen intelligenter Werkzeuge ebenso wie die darauf basierende Ableitung entsprechender Reaktionen hochkomplex. Das hierzu notwendige Wissen kann mit den Methoden der Data Analytics erzeugt werden. Data Analytics bezeichnet die Analyse von Daten zur Generierung von Informationen und die Kombination sowie Vernetzung größerer Informationsmengen zur Entstehung von Wissen.

Die Analysemethoden von Data Analytics lassen sich in vier Stufen einteilen, welche deutlich voneinander abgrenzbar sind und auf unterschiedlichen Fragestellungen basieren. Unterschieden wird hierbei zwischen Descriptive, Diagnostic, Predictive und Prescriptive Analytics. Descriptive Analytics befasst sich mit der Analyse vergangener oder gegenwärtiger Daten, indem diese kategorisiert, charakterisiert und klassifiziert werden, um aussagekräftige Informationen zu erzeugen. Diagnostic Analytics gibt Antworten auf die Fragen nach Gründen, Auswirkungen, Wechselwirkungen oder Folgen von Ergebnissen. Predictive Analytics versucht auf Basis historischer Daten Aussagen über zukünftige Ereignisse zu treffen. Die Verwertung der Ergebnisse der Descriptive und Predictive Analytics zur Erzeugung von Entscheidungsempfehlungen in komplexen Situationen wird als Prescriptive Analytics bezeichnet.



fenden Methoden bereits eine zu prüfende Hypothese über Zusammenhänge zwischen den untersuchten Daten besteht, werden strukturerkennende Methoden verwendet, um Zusammenhänge in Daten erst zu identifizieren. Im Folgenden werden die relevantesten strukturerkennenden und strukturprüfenden Methoden vorgestellt.

Strukturerkennende Methoden

Sind in einem vorliegenden Datensatz keine Gesetzmäßigkeiten bekannt, so können strukturerkennende Methoden verwendet werden, um Wirkzusammenhänge und Muster zwischen Variablen zu identifizieren. Nachfolgend werden die Methoden Faktoranalyse und Clusteranalyse sowie künstliche neuronale Netze vorgestellt.

Faktoranalyse

Faktoranalysen werden eingesetzt, um komplexe Zusammenhänge zwischen einer großen Anzahl von Variablen mithilfe sogenannter Erklärungsfaktoren zu beschreiben. Faktoranalysen sind vor allem in Anwendungsfällen interessant, in welchen eine Vielzahl von Variablen mit mehreren Merkmalen vorliegt, welche auf wenige zentrale, erklärende Faktoren reduziert werden sollen. Hierzu wird zunächst eine Korrelationsmatrix für alle zu untersuchenden Variablen gebildet. Eine vorangehende Unterteilung der Variablen in abhängige und unabhängige Variablen ist nicht erforderlich, da minimal korrelierende Variablen für die weitere Analyse ausgeschlossen werden. Auf dieser Basis findet anschließend die Extraktion der die Korrelation abbildenden Faktoren statt, wodurch die beabsichtigte Informationsreduktion stattfindet und die Komplexität des analysierten Sachverhalts reduziert wird.

Clusteranalyse

Ziel von Clusteranalysen ist das Gruppieren und Zusammenfassen von miteinander verwandten Untersuchungsobjekten in übergeordnete Gruppen, sogenannten Clustern. Die Gruppierung wird dabei derart durchgeführt, dass die Objekte innerhalb der Cluster eine möglichst hohe Homogenität aufweisen und gleichzeitig eine möglichst hohe Heterogenität zwischen den einzelnen

Clustern erreicht wird. Hierbei können eine Vielzahl von Merkmalen der Untersuchungsobjekte berücksichtigt werden. Die Clusteranalyse wird initiiert durch die Quantifizierung der Ähnlichkeit der Untersuchungsobjekte mithilfe des Proximitätsmaßes, auf dessen Basis eine Ähnlichkeitsmatrix gebildet wird. Im Anschluss findet durch die Verwendung eines sogenannten Fusionsalgorithmus die Gruppierung der Objekte statt. Die hierdurch gebildeten Cluster erlauben in der Auswertung die Identifizierung bislang unbekannter Muster und Wirkzusammenhänge.

Künstliche neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze dienen der selbstständigen und konstanten Weiterentwicklung von linearen und nichtlinearen Zusammenhängen zwischen einer Vielzahl von Variablen. Mithilfe maschineller Lernalgorithmen können Strukturen identifiziert und zukünftige Ereignisse prognostiziert werden. Das durch die Algorithmen aufgestellte Modell ist dynamisch, indem selbstständig auf Veränderungen reagiert wird, Zusammenhänge gewichtet und falsche Verbindungen aufgehoben werden. Zu beachten ist jedoch, dass die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen des abgebildeten Zusammenhangs nicht transparent sind, sondern lediglich in ihrer Gesamtheit durch das künstliche neuronale Netz abgebildet werden. Die Erstellung des Netzes erfolgt, indem in einer historischen Datenbasis vorliegende Beziehungen zwischen Input- und Output-Werten empirisch ermittelt werden. Hierzu werden die Algorithmen so lange angepasst, bis als Reaktion auf einen spezifischen Input ein entsprechender Output ausgegeben wird, welcher den Werten der Datenbasis möglichst genau entspricht.

Strukturprüfende Methoden

Regressionsanalysen, Varianzanalysen und Strukturgleichungsmodelle zählen zu den strukturprüfenden Methoden. Sie werden verwendet, um aufgestellte Hypothesen bezüglich Wirkzusammenhängen oder Gesetzmäßigkeiten zwischen Variablen zu bestätigen oder zu widerlegen.

Regressionsanalyse

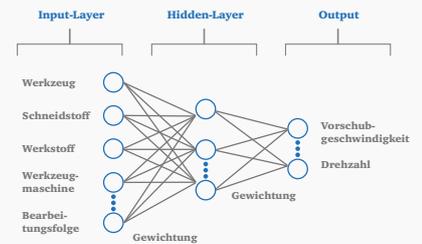
Das Ziel von Regressionsanalysen ist die Überprüfung von Kausalbeziehungen zwischen einer abhängigen Zielvariable und einer Vielzahl unabhängiger erklärender Variablen. Hierzu werden die vorliegenden Daten in Beziehung zur Zielvariable und einer weiteren Variable aufgetragen. Anschließend wird eine approximierte Funktion ermittelt, welche den Verlauf der Daten in Abhängigkeit der Zielvariable bestmöglich wiedergibt. Da die Regressionsanalyse notwendigerweise lediglich auf in der Vergangenheit liegenden Werten basiert, muss die Annahme gelten, dass zukünftige Daten identischen Rahmenbedingungen unterliegen. Überschreitet das Bestimmtheitsmaß einen definierten Wert, so kann ein Zusammenhang zwischen den beiden Zielvariablen bestätigt werden. Die in der Regressionsanalyse ermittelte Funktion kann in Zukunft zur Prognose der Zielvariable auf Basis der erklärenden Variablen verwendet werden.

Varianzanalyse

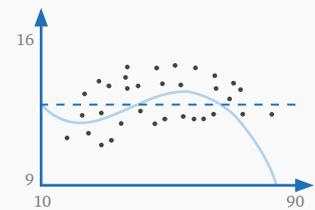
Varianzanalysen untersuchen die Wirkung unabhängiger Variablen auf eine oder mehrere abhängige Variablen. Zur Überprüfung der aufgestellten Vermutung wird der Mittelwert mehrerer Gruppen oder Stichproben der unabhängigen Variablen verglichen. Somit wird bei der Anwendung von Varianzanalysen die Divergenz von Variablen zu einem aggregierten Mittelwert untersucht, um den Zusammenhang einer oder mehrerer Einflussvariablen auf eine oder mehrere Zielvariablen zu überprüfen. Hierzu werden die zu prüfenden Variablen entsprechend der vermuteten Wirkzusammenhänge in Gruppen unterteilt. Das Verhältnis zwischen der Varianz innerhalb der aufgestellten Gruppen und zwischen den Gruppen gibt Aufschluss über den Erklärungsgehalt der untersuchten unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable.

Strukturgleichungsmodelle

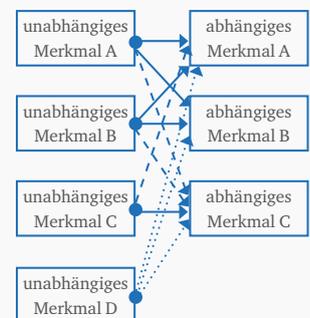
Ziel von Strukturgleichungsmodellen ist die Prüfung und Quantifizierung von komplexen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen mehreren Variablen. Im Gegensatz zu



Künstliche neuronale Netze

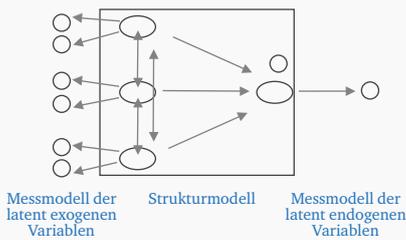


Regressionsanalyse



Varianzanalyse

anderen Verfahren können hierbei mehrere Hypothesen simultan überprüft werden. Strukturgleichungsmodelle finden insbesondere dann Anwendung, wenn mehrere Variablen untersucht werden sollen, die untereinander ebenfalls kausale Zusammenhänge aufweisen. Die vermuteten Wirkzusammenhänge zwischen den zu überprüfenden Variablen werden anhand der Korrelation der Variablen untereinander überprüft und ermittelte Korrelationen werden zu einem vollständigen Strukturgleichungsmodell kombiniert. Anschließend wird die Güte des aufgestellten Strukturgleichungsmodells ermittelt. Die Schätzung eines Strukturgleichungsmodells zur Vorhersage der zukünftigen Ausprägung der gesuchten Variable erfolgt mithilfe einer multiplen Regressionsanalyse.



Strukturgleichungsmodelle

Auslegung intelligente Regelung im Forschungsprojekt SeMeSta

Im folgenden Kapitel wird am Beispiel des Forschungsprojekts SeMeSta die Anwendung von Data Analytics in der Praxis verdeutlicht. Hierbei wird der gesamte Prozess der Datenverarbeitung, von Aufnahme über Aufbereitung und Analyse bis zur Nutzung der Daten, beschrieben.

Datenaufnahme

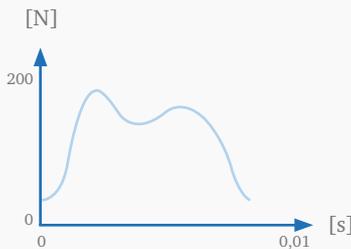
Ausgangspunkt des Prozesses der Datenverarbeitung ist die Festlegung aufzunehmender Daten im Rahmen der Definition relevanter Prozessparameter und Auslegung der entsprechenden Sensorik (vgl. Schritt 1 – Definition relevanter Prozessparameter und Schritt 2 – Auslegung Aktorik). Als grundsätzliche Regel im Schritt der Datenaufnahme gilt, dass lediglich für die Überwachung und Steuerung des Prozesses notwendige Daten aufgenommen werden sollten, um den Aufwand von Speicherung und Handling der Daten möglichst gering zu halten. Gleichzeitig ist jedoch bei der Datenaufnahme darauf zu achten, dass eine ausreichend große Datenbasis der als relevant identifizierten Parameter geschaffen wird, um durch Zufallseffekte entstehende Ausreißer eindeutig zu identifizieren und verfälschende Einflüsse ausschließen zu können. Die aufgenommenen Daten sollten mit einem Zeitstempel

oder einer einheitlichen (z. B. bei jedem Hub eines Stanzwerkzeugs) fortlaufenden Nummerierung versehen werden, um die spätere Synchronisation verschiedener Datensätze zu ermöglichen. Ein Zeitstempel ist hierbei üblicherweise eine Angabe in (Milli-) Sekunden in Bezug zu einem festgelegten Referenzzeitpunkt. Hierbei ist zu beachten, dass ein Zeitstempel mit einer ausreichenden Genauigkeit verwendet wird. Ebenso ist die im Unternehmen vorhandene Infrastruktur entsprechend anzupassen. Insbesondere Latenzzeiten in der Datenweiterleitung oder Verarbeitung können dazu führen, dass die Funktionalität der Regelung negativ beeinflusst wird. Ebenso ist die Verwendung der Schrittweite „Sekunden“ in vielen Fällen nicht ausreichend, um hohe Abtastraten von Sensoren zu erfassen. So wurden im Rahmen des Forschungsprojekts SeMeSta rund 300 kontinuierliche Messdaten pro Hub, bei 1.400 Hüben pro Minute, im prototypisch aufgebauten Stanzwerkzeug erfasst.

Datenaufbereitung

Die Ziele der Datenaufbereitung sind die Vereinheitlichung der aufgenommenen Daten und die Entfernung von für die Analyse nicht benötigten oder fehlerhaften Daten. Durch diese Reduzierung und Strukturierung der Datenbasis wird sichergestellt, dass die folgende Analyse unter möglichst geringem Aufwand zuverlässige Ergebnisse liefert.

Am Beispiel aufgenommenener Werte im Forschungsprojekt SeMeSta, konnte die zu verarbeitende Datenmenge erheblich reduziert werden, indem redundante Messdaten entfernt wurden. So konnten die in der nebenstehenden Abbildung aufgezeichneten Messpunkte eines Kraftverlaufs über einen Hub des Presswerkzeugs, auf den maximalen Kraftwert reduziert werden, da die aufgezeichneten Messkurven hinsichtlich ihres Verlaufs identisch und lediglich in der Positionierung unterschiedlich waren. Demzufolge konnten bis auf den maximalen Kraftwert alle übrigen Messwerte aus der Datenbasis entfernt werden. Derartige redundante Werte können auch durch automatisierte Korrelationsanalysen ermittelt werden. Trotzdem ist eine Durchsicht der Datenbasis



Kraftverlauf über Werkzeughub



in Verbindung mit einer manuellen Entfernung logisch unschlüssiger Daten durch Experten unerlässlich. Die aufgenommene Datenbasis setzt sich in vielen Fällen aus verschiedenen Messreihen an verschiedenen Produktionsmaschinen zusammen. Bevor eine Analyse der Daten möglich ist, ist es erforderlich, durch eine Synchronisierung der Datensätze eine einheitliche Datenbasis zu erzeugen.

Datenanalyse

Nach der Aufbereitung der Daten folgt die explorative Datenanalyse. Hierzu wird zunächst eine grafische Aufbereitung der Daten durchgeführt, um die Erkennung von Hypothesen hinsichtlich Zusammenhängen in der Datenbasis zu ermöglichen. Im Rahmen des SeMeSta-Forschungsprojekts wurde eine sogenannte Scatterplot-Matrix erstellt, welche Messwerte in Abhängigkeit der Stellung von jeweils vier Aktoren sowie Sensoren darstellt. Bereits ohne genaue Kenntnis des Aufbaus des Werkzeugs oder der Art der Aktorik und Sensorik, ist zu erkennen, dass Aktorik 1 eine direkte Auswirkung auf die Messwerte von Sensor 2 hat.

Mithilfe von Box-Plot Diagrammen können generelle Ausprägungen eines Messwertes oder einer Stellgröße dargestellt werden. Die Box ergibt sich hierbei aus jenen Werten, die zwischen dem oberen und unteren Quartil liegen und entspricht dem Bereich, indem die mittleren 50 % der Daten liegen. Die Quartile kennzeichnen die 25 % niedrigsten und die 25 % höchsten Werte in der Datenbasis. Sogenannte Antennen stellen die außerhalb der Box liegenden Werte dar. Box-Plot Diagramme eignen sich insbesondere für die Erkennung von Ausreißern in den aufgenommenen Daten.

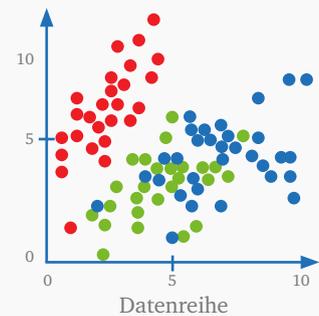
Datennutzung

Sind Wirkzusammenhänge zwischen verschiedenen Daten identifiziert und validiert, so können im folgenden Schritt statistische Modelle für Vorhersagen erstellt werden. Hierbei werden entsprechende Modelle mit den bereits vorhandenen Messdaten so trainiert, dass diese auch für neu aufgenommene Daten Entscheidungen treffen können.

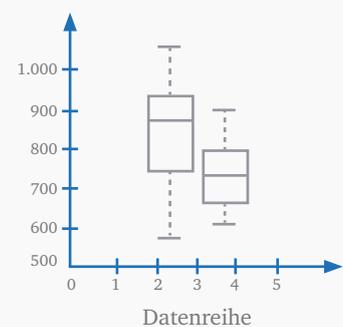
Insbesondere dieser Anlernvorgang (im englischen Sprachgebrauch auch Teaching genannt) zur Festlegen von Prozess- oder Eingriffsgrenzen stellt aktuell im Werkzeugbau eine große Herausforderung dar. Dies ist insbesondere der Tatsache geschuldet, dass Werkzeuge Unikate darstellen und damit Prozessgrenzen oder Prozessmuster vorangegangener Werkzeuge praktisch nicht genutzt werden können. Daher müssen Prozessgrenzen durch Erfahrungswissen und das Try- and Error-Prinzip aufwendig ermittelt werden.

Mögliche Eingriffsgrenzen können beispielsweise anhand von Assoziationsregeln aufgestellt werden. Assoziationsregeln beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Eintreten bestimmter Ereignisse auf Basis aufgetretener Voraussetzungen. So kann beispielweise das Überschreiten bestimmter Temperaturwerte im Werkzeug darauf hindeuten, dass die gefertigten Bauteile die geforderten Maßtoleranzen nicht einhalten. Solche Assoziationsregeln lassen sich mit geringem Aufwand in Hardware übersetzen und können zur Prozessüberwachung verwendet werden. Bereits durch einfache statische Assoziationsregeln kann ein Werkzeug so auf Grundlage bestimmter Ereignisse geregelt werden. Allerdings ist diese Art der Regelung nicht in allen Fällen ausreichend genau. Zudem ist eine Anpassung des Modells im laufenden Betrieb auf Grundlage neuer Daten nur unter großem Aufwand realisierbar.

Eingriffsgrenzen, welche auch im laufenden Betrieb angepasst und laufend trainiert werden können, können mithilfe sogenannter Klassifikationsalgorithmen abgebildet werden. Beispielhaft hierfür sind Modelle, die genaue Vorhersagen über numerische Werte treffen können, wie beispielsweise die Abmessungen eines gestanzten Bauteils auf Basis aufgenommener Fertigungsparameter. Derartige Modelle erlauben eine kontinuierliche Regelung des Fertigungsprozesses mit entsprechender Aktorik, ohne dass festgelegte Toleranzen erst überschritten werden müssen. Dies ermöglicht die Sicherstellung einer konstanten Bauteilqualität.



Scatterplot-Matrix



Box-Plot Diagramm

BUSINESS MODEL





Datenbasierte Geschäftsmodelle durch intelligente Werkzeuge

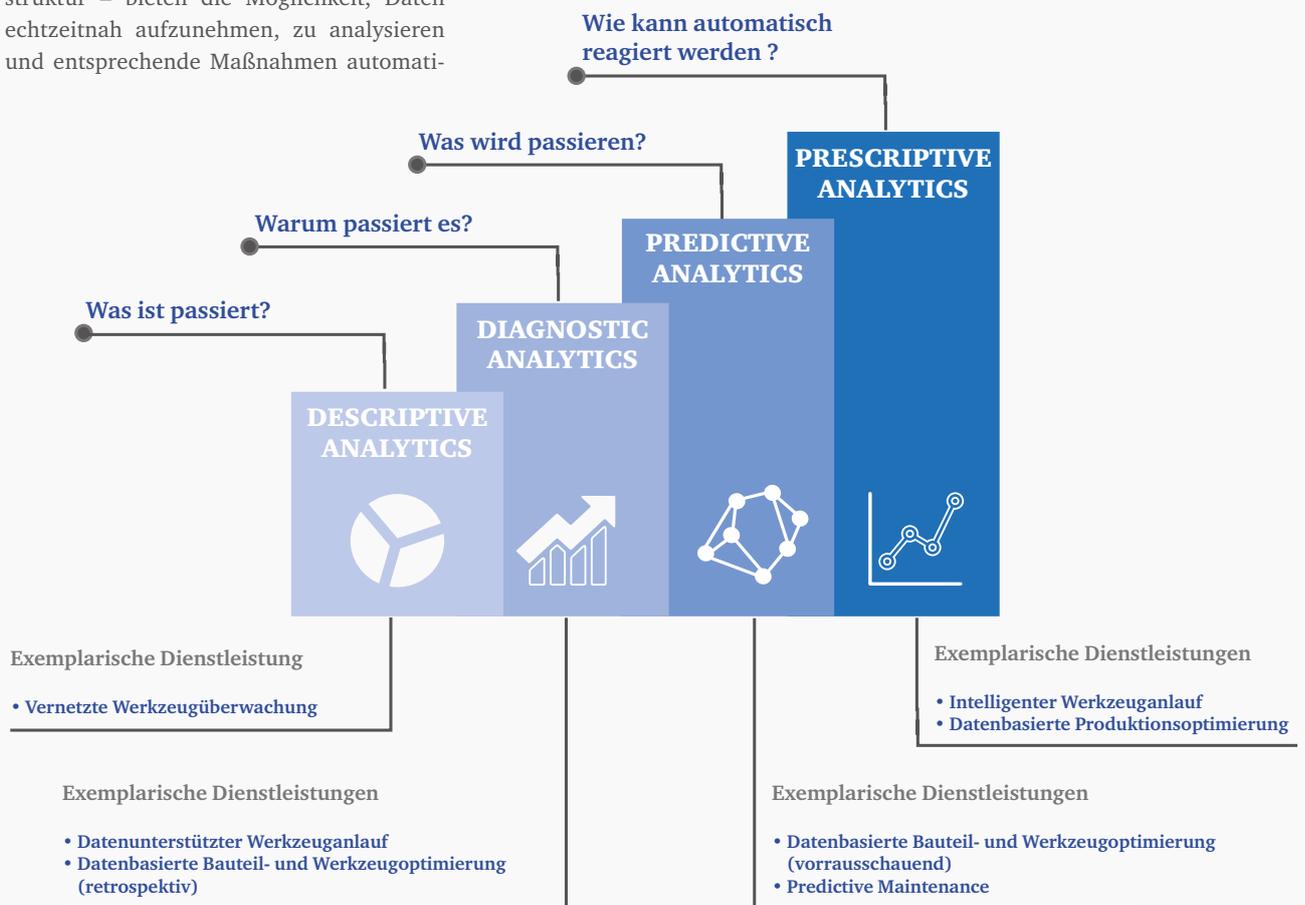
Datenbasierte Dienstleistungen

Daten stellen zukünftig die Basis konkurrenzfähiger Geschäftsmodelle dar. Dieses Kapitel beschreibt neben der Vorstellung neuer datenbasierter Dienstleistungen ebenfalls darauf aufbauende datenbasierte Geschäftsmodelle. Dienstleistungen gelten als datenbasiert, wenn Daten ein charakteristischer Teil der verwendeten Ressourcen für diese Dienstleistungen darstellen. Datenbasierte Geschäftsmodelle bauen auf datenbasierten Dienstleistungen auf. Im Gegensatz zu klassischen Geschäftsmodellen wird ein (Groß-)Teil des Kundennutzens über die Aufnahme, Verarbeitung und Nutzbarmachung von Daten generiert.

Intelligente Werkzeuge – eingebunden in eine echtzeitfähige, cloudbasierte IT-Infrastruktur – bieten die Möglichkeit, Daten echtzeitnah aufzunehmen, zu analysieren und entsprechende Maßnahmen automati-

siert abzuleiten. Darauf aufbauend können intelligente, datenbasierte Dienstleistungen entwickelt werden, die sich entsprechend der Stufen der Data Analytics in vier Gruppen mit steigendem Kundennutzen gliedern lassen.

Im Rahmen dieses Abschnitts werden zunächst relevante Voraussetzungen beschreiben, um im Anschluss datenbasierte Dienstleistungen im Werkzeugbau zu beschreiben. Da entsprechende Dienstleistungen im Werkzeugbau bisher kaum vorhanden sind, zeigt dieses Kapitel zukünftig notwendige Entwicklungen auf. Zum besseren Verständnis wird jede Stufe anhand exemplarischer Anwendungsbeispiele beschrieben.



Voraussetzungen

Auf dem Weg zu datenbasierten Dienstleistungen gibt es einige Rahmenbedingungen, welche es vor deren Umsetzung zu berücksichtigen gilt. Diese sind nachfolgend kurz dargestellt.

Datentransparenz

Um Datentransparenz sinnvoll realisieren zu können, ist eine leistungsfähige digitale Infrastruktur und Systemlandschaft unumgänglich. Viele Daten befinden sich heute in komplexen Datenstrukturen, die historisch gewachsen sind. Zur Identifikation korrelativer Zusammenhänge in Daten wird ein systemübergreifender Zugriff auf große Datenmengen benötigt. Aufgrund nicht abgestimmter Schnittstellen ist dies aktuell häufig nicht ohne Weiteres realisierbar. Einige Unternehmen experimentieren in diesem Zusammenhang mit sogenannten Data Lakes. Diese stellen einen zentralen Speicherort für alle Daten dar, die in einem Unternehmen erzeugt werden. Unerheblich ob Produktions-, Entwicklungs- oder Logistikkdaten, alle Daten werden an einem virtuellen Ort zusammengeführt, um deren maximale Verfügbarkeit und Transparenz zu gewährleisten.

Datenexpertise

Datentransparenz kann nur geschaffen werden, wenn Unternehmen über die notwendigen Experten verfügen, die mit komplexen Datenstrukturen umgehen können. Sie verfügen über die Kenntnis, wie die Daten zustande kommen und was sie repräsentieren. Daten können nicht zielführend ausgewertet werden, wenn die fachlichen Kenntnisse der Daten und der dahinter liegenden Prozesse nicht vorhanden sind.

Datenhoheit

Im Zusammenhang mit Daten stellt sich schnell die entscheidende Frage bezüglich des Eigentumsrechts und daraus resultierend des Zugriffsrechts der anfallenden Daten.

Diese Fragestellungen müssen zu Beginn eindeutig beantwortet werden, da der ungeklärte Besitz der Daten häufig ein zentrales Hindernis auf dem Weg zu datenbasierten Dienstleistungen darstellt. Zusätzlich verlangt die gemeinschaftliche Nutzung von Daten die Bildung von Plattformen, über die beteiligte Parteien ihre Daten austauschen können.

Datensicherheit

Im Zuge der Klärung der Datenhoheit muss auch die Datensicherheit geklärt werden. Je sensibler die aufgenommenen und auf Plattformen bereitgestellten Daten sind, desto höher ist die systemtechnische Absicherung über z. B. Firewalls und Verschlüsselung vorzusehen.

Datenqualität

“Wer misst, misst Mist!” ist einer der bekannten Aussagen, die sich aufgrund einer häufig unzureichenden Qualität der Daten im IT-Sprachgebrauch etabliert hat. Daher sind Mechanismen vorzusehen, die durch Identifikation und Ausschluss fehlerhafter Daten eine dauerhaft hohe Datenqualität sicherstellen.

Datenaktualität

Die heute zunehmend schnelllebige Umwelt erfordert, dass Daten zur Entscheidungsfindung stets aktuell sind. Echtzeitsysteme oder In-Memory Datenbanken gewinnen an Beliebtheit, da immer mehr Daten in Echtzeit verarbeitet werden müssen. Auch hierfür eignet sich der unter Datentransparenz vorgestellte Data Lake maßgeblich.

Zusammen stellen diese sechs Voraussetzungen wichtige Erfolgsfaktoren auf dem Weg zu datenbasierten Dienstleistungen dar. Die erfolgreiche und nachhaltige Umsetzung dieser Voraussetzungen sollte regelmäßig und kontinuierlich evaluiert werden.



Datenbasierte Dienstleistungen durch Descriptive Analytics

Die „einfachsten“ datenbasierten Dienstleistungen sind der Stufe der Descriptive Analytics zuzuordnen und basieren auf der Gewinnung von Daten, um Transparenz über bestimmte Vorgänge im Werkzeug zu erzeugen. Für das Anbieten von entsprechenden Dienstleistungen bedarf es neben im Werkzeug implementierter Sensorik ebenfalls der Anbindung an eine Cloud oder eine unternehmensübergreifende Plattform. Darüber ist die ortsunabhängige Bereitstellung und Überwachung bestimmter Werkzeugparameter möglich. Hierfür ist ebenfalls die visuelle Darstellung der Parameter vorzusehen. Die Definition von Eingriffsgrenzen oder die entsprechende Erfahrung der Mitarbeiter ermöglichen das abweichungsbasierte Unterbrechen der Produktion. Die Überwachung kann entweder übergreifend durch den Werkzeugbau (z. B. als Leitstelle) oder einen Mitarbeiter der Serienproduktion vorgenommen werden.

Vernetzte Werkzeugzustandsüberwachung

Der Werkzeugbau kann eine erhöhte Prozesstransparenz durch eine vernetzte Werkzeugzustandsüberwachung realisieren. Durch im Werkzeug verbaute Sensorik kann der Werkzeugzustand in Echtzeit erfasst und in einer Cloud gespeichert werden, auf die Kunde und Werkzeugbau zugreifen können. Das Resultat ist eine erhöhte Transparenz hinsichtlich des werkzeugspezifischen Outputs, den Betriebsstunden des Werkzeugs oder den bisher durchgeführten und zukünftig notwendigen Reparaturen. Ebenfalls können durch die Echtzeit-Überwachung bestimmter Werkzeugparameter Anomalien und Ausreißer durch den Maschinenbediener bzw. die Software identifiziert („Anomaly Detection“) werden. Basierend hierauf können Fertigungsparameter angepasst (z. B. Adaptation der Schmierung oder Kühlung) oder eine notwendige Wartung vorgenommen werden.

Datenbasierte Dienstleistungen durch Diagnostic Analytics

Die zweite Stufe stellen die Diagnostic Analytics dar. Über die reine Datentransparenz hinaus basieren Dienstleistungen dieser Stufe auf der sinnvollen Verknüpfung von Daten, um Korrelationen und Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufzuzeigen. Somit kann das Verständnis über Produktionsprozess und innere Wirkvorgänge im Werkzeug signifikant verbessert werden. Dies kann z. B. dazu dienen, die Suche nach Fehlerursachen oder Verbesserungspotenzialen zu vereinfachen. Neben der Implementierung entsprechender Sensorik ins Werkzeug ist der Aufbau von Know-how nötig, um mithilfe von Algorithmen signifikante Strukturen und Zusammenhänge in den historischen Fertigungsdaten erkennen zu können. Clusteralgorithmen eignen sich hierbei vor allem für das Detektieren bekannter Zusammenhänge, während künstliche neuronale Netze unbekannte Zusammenhänge identifizieren können. Diagnostic Analytics können entgegen den Descriptive Analytics ausschließlich von Fachpersonal des Werkzeugbaus geleistet werden.

Datenunterstützter Werkzeuganlauf

Beim datenunterstützten Werkzeuganlauf erfolgt eine Verknüpfung von Fehlerbildern in der Einarbeitung mit Betriebsdaten aus dem Inneren des Werkzeugs, z. B. in Form von Temperatur- und Kraftverläufen oder auftretenden Vibrationsmustern. So können Fehlerbilder besser einer entsprechenden Ursache im Werkzeug zugeordnet werden. Hierdurch können neben der Anpassung von Betriebsparametern der Produktionsmaschine ebenfalls Anpassungen im Werkzeug durch Nachbearbeitung einzelner Komponenten oder der Nachjustage einzelner Abstimmeelemente vorgenommen werden. Insgesamt lassen sich Iterationsschleifen so durch eine schnellere Ursachenfindung nicht nur zeitlich, sondern durch zielgerichtetes Ableiten einer Korrekturstrategie auch in der Anzahl reduzieren.

Datenbasierte Bauteil- und Werkzeugoptimierung (retrospektiv)

Die Kenntnis von Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch Analyse von Vergangenheitsdaten kann dazu genutzt werden, eine rückblickende, integrierte Bauteil- und Werkzeugoptimierung durchzuführen. So kann die starke Abnutzung bestimmter Komponenten im Werkzeug dazu genutzt werden, bei Folgewerkzeugen das Material der Werkzeugkomponente entsprechend anzupassen, Härtevorgänge zu optimieren oder ein anderes Verfahren der Oberflächennachbehandlung zu wählen. Auch kann durch Analyse und Abgleich mit anderen Werkzeugen festgestellt werden, ob beispielsweise bestimmte geometrische Formen des Kundenbauteils mit der Erzeugung bestimmter Schwingungsmuster einhergehen, die im weiteren Verlauf mit einer entsprechend hohen Fehler- und Ausschussrate korrelieren. Werden sowohl Bauteil als auch Werkzeug entsprechend der Erkenntnisse aus Vergangenheitsdaten optimiert, können neben der Verlängerung von Wartungsintervallen und der Reduktion von Zykluszeiten ebenfalls Werkzeugausfälle minimiert werden.

Datenbasierte Dienstleistungen durch Predictive Analytics

Auf der dritten Stufe stehen die Predictive Analytics. Entsprechende datenbasierte Dienstleistungen dieser Art gehen über die Erfassung und Analyse gegenwärtiger Zustände hinaus. Die historischen Daten werden genutzt, um Modelle zu bilden, welche die Prognose zukünftiger Zustände ermöglichen. Die infrastrukturellen bzw. wissensbezogenen Voraussetzungen entsprechen denen der Diagnostic Analytics. Entscheidend ist der Einsatz von intelligenten Algorithmen, um auf Basis von Vergangenheitsdaten Prognosemodelle erstellen zu können.

Datenbasierte Bauteil- und Werkzeugoptimierung (vorausschauend)

Die Möglichkeit zur Prognose von Zuständen kann z. B. im Rahmen einer datenbasierten Bauteil- und Werkzeugoptimierung genutzt werden. Durch die genaue Kenntnis des Zusammenspiels von Bauteil- und Werkzeugattributen können Optimierungen am Bauteil

vorgeschlagen werden, die kosten-, qualitäts- oder funktionsbezogene Auswirkungen auf Bauteil und Werkzeug haben. So kann dem Kunden echtzeitnah die Veränderung relevanter Bauteil- und Werkzeugkosten mitgeteilt werden. Auf diese Weise kann die Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Gestaltungsvariante des Bauteils vereinfacht werden.

Predictive Maintenance

Mittels Predictive Maintenance ist es möglich, Wartungsintervalle dynamisch auszuwählen, sodass eine Wartung am Werkzeug nur durchgeführt wird, wenn eine entsprechende Abnutzung oder abnehmende Bauteilqualität vorliegt. Ebenfalls können Predictive Analytics dabei helfen, Werkzeugbrüche vorherzusagen und die Produktion vorbeugend zu unterbrechen, um eine meist zeit- und kostenintensive Reparatur zu vermeiden. Wird ein entsprechender Wartungsbedarf vorausgesagt, können die Wartungsarbeiten in der Fertigungsplanung berücksichtigt und benötigte Ersatzteile beim Werkzeugbau bestellt werden. Dies wirkt sich neben einer Senkung der Kapitalbindung ebenfalls positiv auf den Instandhaltungsaufwand durch Realisierung dynamischer Wartungsintervalle aus. Durch die Reduktion des Werkzeugausfalls oder ungeplanter Wartungsarbeiten werden Produktivität und Planungssicherheit für den Kunden signifikant verbessert.

Datenbasierte Dienstleistungen durch Prescriptive Analytics

In der höchsten Stufe, der Prescriptive Analytics, werden die Prognosemodelle zu Entscheidungsmodellen erweitert. Dies bedeutet, dass Zustände nicht nur prognostiziert, sondern Maßnahmen zur Erreichung eines Zielzustandes automatisiert eingeleitet werden können. Intelligente Werkzeuge können dadurch selbstlernend und selbstoptimierend agieren. Entsprechende Dienstleistungen bedürfen im Vergleich zu den bisher beschriebenen Dienstleistungen ebenfalls einer im Werkzeug verbauten Aktorik und Regelungstechnik. Außerdem ist die Implementierung von zugehörigen Entscheidungsmodellen nötig, welche das Werkzeug automatisch adaptieren bzw. entsprechende Maßnahmen-



empfehlungen aussprechen. Neben der Programmierung der Steuerungsalgorithmen ist hierfür die Festlegung von Eingriffsgrenzen notwendig. Dies erfolgt im Rahmen des Teachings zu Beginn der Werkzeugnutzung. Häufig ist dieser Vorgang aufwendig, da Erfahrungen vorhergehender Werkzeuge aufgrund der Einzigartigkeit jedes Werkzeugs nicht oder nur unzureichend übertragen werden können.

Intelligenter Werkzeuganlauf

Vorrangiges Ziel des intelligenten Werkzeuganlaufs ist die Reduktion von Korrekturschleifen, die Verkürzung der Durchlaufzeit einzelner Korrekturschleifen sowie die Reduktion der Abhängigkeit vom Kenntnisstand einzelner Mitarbeiter. Er geht über den datenunterstützten Werkzeuganlauf insofern hinaus, als dass der Anlauf wesentlich vom Werkzeug durch Justieren der Parameter von Produktionsanlage und Werkzeug selbst übernommen wird. Zur Realisierung des intelligenten Werkzeuganlaufs wird neben einer notwendigen Inline-Erfassung der Werkzeugparameter ebenfalls eine Inline-Erfassung relevanter Bauteilparameter (Form- und Lagetoleranzen sowie Oberflächenkennwerte der Komponenten) vorgenommen.

Die integrierte Überwachung der Bauteilparameter muss dabei nicht permanent vorgesehen werden und kann entsprechend mobil ausgelegt sein. Durch Produktion erster Bauteile, deren geometrischer Erfassung sowie dem Abgleich mit Sollvorgaben, kann die Regelungstechnik des intelligenten Werkzeugs Anlagen- und Werkzeugparameter automatisch anpassen. Dies geschieht einerseits durch den Rückgriff auf entsprechende Erfahrungswerte vergangener Werkzeuge, andererseits durch ein Data-Analytics gestütztes Try- and Error-Prinzip, um die optimale Abstimmung von Werkzeug und Produktionsmaschine zu ermitteln. Durch kontinuierliches Erfassen der produzierten Bauteile und Anpassung der Parameter von Werkzeug und Anlage nähert sich das Produkt iterativ der Produktreife an. Sobald diese gegeben ist sowie eine ausreichende Anzahl an Bauteilen diese reproduzierbar und konstant erreicht, ist ebenfalls die Prozessreife gegeben und der

intelligente Anlauf kann abgeschlossen werden.

Datenbasierte Produktionsoptimierung

Ebenfalls ermöglichen Prescriptive Analytics eine datenbasierte Produktionsoptimierung. Ähnlich des intelligenten Werkzeuganlaufs werden bei einem sich in der Produktion befindlichen Werkzeugs Bauteil- und/oder Prozessparameter erfasst. Durch die Analyse der Daten können mögliche Verbesserungspotenziale, z. B. in Bezug auf Ausbringungsgüte, Ausbringungsmenge oder Haltbarkeit des Werkzeugs, identifiziert werden. Basierend auf diesen Verbesserungspotenzialen kann beispielsweise die Kühlleistung im Spritzgießprozess erhöht werden, um eine Zykluszeitverkürzung zu erreichen. Im Blechumformprozess kann analog die Schmierung angepasst werden, um die Hubzahl bei konstanter Prozesssicherheit zu steigern. Neben einer Erhöhung der Ausbringungsmenge ist ebenfalls eine Verlängerung von Wartungsintervallen möglich, da Abnutzungserscheinungen im Werkzeug durch die Nachjustierung von z. B. Formbacken oder Schnittmessern teilweise kompensiert werden können.

Zusammenfassend zeigen die beschriebenen Dienstleistungen, dass der Kundennutzen über den reinen Verkauf des Werkzeugs hinausgehend signifikant gesteigert werden kann. Der Kunde profitiert von einer höheren Werkzeugverfügbarkeit bei gesteigerter Prozess- und Bauteilqualität. Auch der Werkzeugbau kann die neuen Dienstleistungen nutzen, um neben der datenbasierten Verbesserung seiner Produkte den Zusatznutzen des Kunden ertragsseitig abzubilden. Diese Entwicklung von Ertragsmodellen sowie die Einbettung der neuen Dienstleistungen in Geschäftsmodelle des Werkzeugbaus wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

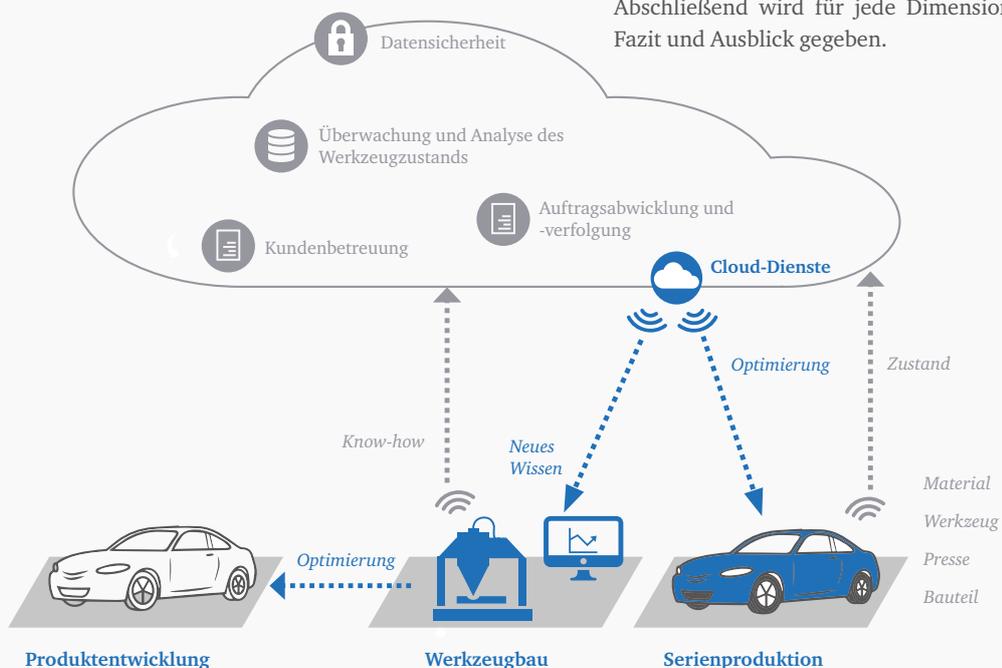
Datenbasierte Geschäftsmodelle durch intelligente Werkzeuge

Im Vergleich zu traditionellen Geschäftsmodellen ist bei datenbasierten Geschäftsmodellen das potenzielle Leistungsangebot erweitert. Ebenfalls können sich Ertragsmodelle, notwendige Infrastruktur und die Beziehung zum Kunden signifikant unterscheiden. Aufgrund der Unterschiede in diesen Dimensionen können „traditionelle“ Geschäftsmodelle nicht einfach unverändert beibehalten werden, sondern müssen teilweise von Grund auf neu konzipiert werden. Der „Business Model Canvas“ bietet einen verbreiteten Ansatz, um bestehende Geschäftsmodelle zu evaluieren sowie neue Geschäftsmodelle zu entwickeln. Dazu wird ein Geschäftsmodell in vier Dimensionen beschrieben, die folgende Fragen beantworten:

1. Marktdimension: Was ist das Angebot an den Kunden?
2. Kundendimension: Wer ist der Kunde und wie erfolgt die Kommunikation?
3. Wertschöpfungsdimension: Wie wird die Leistung erbracht?
4. Finanzdimension: Wie wird der Umsatz generiert und wie erfolgen Transaktionen?

Auch für ein digitales Geschäftsmodell müssen diese vier Grundsatzfragen beantwortet werden – jedoch vor dem Hintergrund fortgeschrittener technologischer Möglichkeiten. Selbiges gilt auch für Geschäftsmodelle im Werkzeugbau, deren aktuelle Ausprägungen (dunkelblaue Markierung auf Seite 43) sowie mögliche Veränderungen durch den Einsatz intelligenter Werkzeuge (hellblaue Markierung auf Seite 43) hinsichtlich oben genannter vier Dimensionen in einem morphologischen Kasten dargestellt werden. Die Übersicht dient nicht der vollständigen Ausgestaltung digitaler Geschäftsmodelle im Werkzeugbau, sondern soll die neuen Möglichkeiten durch den Einsatz intelligenter Werkzeuge und darauf basierender datenbasierter Dienstleistungen verdeutlichen. Die hellblau markierten Ausprägungen stellen neue Leistungen oder Voraussetzungen in den jeweiligen Dimensionen dar, wobei mehr als eine Ausprägung innerhalb eines Kriteriums zutreffend sein kann.

Nachfolgend werden die vier Dimensionen datenbasierter Geschäftsmodelle im Werkzeugbau beschrieben. Dazu wird jeweils der Status quo dargestellt, um anschließend mögliche Geschäftsmodellinnovationen durch intelligente Werkzeuge darzustellen. Abschließend wird für jede Dimension ein Fazit und Ausblick gegeben.





Marktdimension

Einführung und Status quo

Die Marktdimension bezieht sich auf das Leistungsangebot in Form von Produkten und Dienstleistungen des Werkzeugbaus. Außerdem adressiert sie die Frage, über welche Vertriebskanäle der Werkzeugbau seine Kunden ansprechen kann. Nach traditionellem Selbstverständnis des Werkzeugbaus besteht der Wertbeitrag seiner angebotenen Leistungen für den Kunden darin, ihn zu einer robusten Produktion zu befähigen. Es handelt sich somit aktuell um vorrangig produktzentrierte Geschäftsmodelle, die durch klassische Dienstleistungen erweitert werden.

Geschäftsmodellinnovation durch intelligente Werkzeuge

Durch nutzerzentrierte Geschäftsmodelle kann der Kundennutzen wesentlich über die reine Produktionsbefähigung hinaus gesteigert werden. Durch entsprechende Sensorik kann der Werkzeugzustand permanent aufgezeichnet (Descriptive Analytics) und die Fertigungshistorie mittels Data Analytics auf signifikante Einflüsse und Fehlerursachen (Diagnostic Analytics) untersucht werden. Auf diese Weise wird das Prozessverständnis sowohl auf Seiten des Kunden als auch des Werkzeugbaus erhöht. Internet und Cloud-Plattformen ermöglichen, jederzeit auf die Daten zuzugreifen, sodass eine Echtzeit-Überwachung realisierbar wird. Entsprechende Modelle befähigen zur Vorhersage von kritischen Werkzeugzuständen (Predictive Analytics) und damit zur Predictive Maintenance. Der Werkzeugbau kann dem Kunden damit eine erhöhte Zuverlässigkeit in der Produktion oder gar definierte Standzeiten zusagen. Letztlich ermöglichen selbstlernende Modelle (Prescriptive Analytics) gar eine Optimierung von Produkt bzw. Prozess im laufenden Betrieb.

In Bezug auf Vertriebskanäle haben Werkzeugbaubetriebe dank der Digitalisierung umfangreiche Möglichkeiten, datenbasierte Dienstleistungen zukünftig online über Kundenplattformen anzubieten. Kunde und Werkzeugbau können über die Plattform alle benötigten Daten und Informationen (Werkzeugtyp, Standzeit, Produktionsvo-

lumen, erfolgte Wartungen, etc.) standardisiert und medienbruchfrei einsehen und austauschen. Ebenfalls werden Leistungen zukünftig in steigendem Umfang über die Plattformen abgewickelt. So wird z. B. im Rahmen von Predictive Maintenance der Wartungsauftrag auf der Plattform erzeugt und in Abstimmung mit den verfügbaren Kapazitäten beim Werkzeuganbieter eingeplant. Die Kundenplattform kann somit ebenfalls zur Verfolgung des Wartungsstatus dienen, wodurch der Kunde über eine erhöhte Transparenz verfügt und seine Serienproduktion entsprechend besser planen und steuern kann.

Fazit und Ausblick

Neben neuen Möglichkeiten, den Kundennutzen zu steigern, entstehen durch die Digitalisierung in der Marktdimension auch Herausforderungen, die es zu antizipieren gilt. Neben der Definition und Implementierung neuer Dienstleistungen müssen die dafür notwendigen Kompetenzen aufgebaut, vertragliche Regelungen ausgestaltet und eine entsprechende Infrastruktur etabliert werden. Außerdem impliziert die Erweiterung des Leistungsversprechens, dass Markteintrittsbarrieren für neue Wettbewerber aus anderen Branchen sinken, da branchenfremdes Know-how an Bedeutung gewinnt. Insbesondere deutsche Werkzeugbaubetriebe, die sich durch hohes fertigungstechnisches Know-how auszeichnen, könnten durch unzureichende Kompetenzen im Bereich der Digitalisierung Wettbewerbsvorteile gegenüber digitalen Vorreitern verlieren.

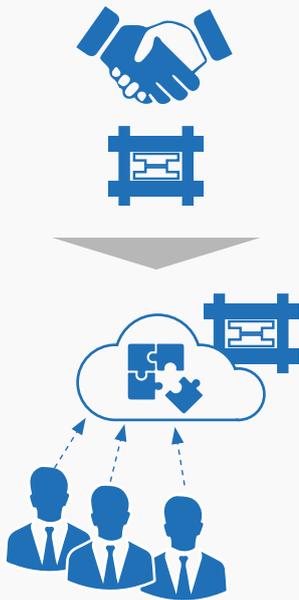


Trotz des digitalen Wandels als Wachstumstreiber, kennen nur

41 %

der befragten Geschäftsführer den Begriff „Digitale Plattformökonomie“

Kundendimension



Einführung und Status quo

In der Kundendimension wird erstens die Frage adressiert, welche Kundensegmente der Werkzeugbau mit seinen angebotenen Leistungen bedienen will. Zweitens geht es um die Ausgestaltung des Verhältnisses zwischen Werkzeugbau und Kunde. Beim traditionellen Verständnis dominiert die Zielsetzung, dem Kunden leistungsfähige Werkzeuge für eine effizientere Serienproduktion bereitzustellen. Kommunikation und Kundeninteraktion beschränken sich hierbei auf den Austausch von Informationen während des Auftragsabwicklungsprozesses und ggf. während des Betriebs des Werkzeugs.

Geschäftsmodellinnovation durch intelligente Werkzeuge

Datenbasierte Dienstleistungen ermöglichen die Erschließung neuer Kundensegmente. Das durch intelligente Werkzeuge erzeugte tiefgreifende Prozesswissen ermöglicht dem Werkzeugbau, stärker als bisher als Impulsgeber für innovative Unternehmen zu fungieren. So können beispielsweise Bauteilgeometrien realisiert werden, die durch den Einsatz konventioneller Werkzeuge nicht herstellbar sind. Ebenfalls ist die Verarbeitung neuer Materialien denkbar, die sehr hohe Anforderungen an z. B. Tiefziehprozesse stellen. Für Kunden, die eine intensivere Betreuung als bisher wünschen, können seitens des Werkzeugbaus sogenannte „Convenience-Lösungen“ angeboten werden. Im Rahmen einer Convenience-Lösung verantwortet der Werkzeugbau die Betreuung über den gesamten Produktlebenszyklus – nach Werkzeugerstellung insbesondere Wartung und Instandhaltung. Dies ist vor allem für Kunden interessant, die aufgrund des internen Betreuungsaufwands von Werkzeugen Fertigungsaufträge derzeit zu großen Teilen extern vergeben. Notwendige Wartungen meldet das Werkzeug selbstständig an den Werkzeugbau, sodass der Kunde lediglich das Rüsten des Werkzeugs übernehmen muss. Eine echtzeitfähige Erfassung und Überwachung aller werkzeugrelevanten Daten ermöglicht die vollständige Integration des Werkzeugbaus, welcher ebenfalls den vollständigen Betrieb und die Optimierung des Werkzeugs bzw. des dazugehörigen Produktionsprozesses verantwortet.

Die Kundenbindung kann mittels einer Online-Kundenplattform im Sinne einer langfristigen Zusammenarbeit vertieft werden. Die effiziente Bereitstellung von Wissen über die Online-Plattform kann beiderseitig zur Verbesserung der eigenen Produkte und Prozesse dienen. Ebenfalls können datenbasierte Dienstleistungen seitens des Kunden bestellt, verändert oder storniert werden. Im Rahmen der stärker werdenden „Co-Creation“ verwischen die Grenzen zwischen Werkzeugbau und Kunde nicht nur auf technischer, sondern auch auf strategischer Ebene. Beide Parteien verstehen sich als Entwicklungspartner auf Augenhöhe, die ihre Produkte gemeinsam (weiter-)entwickeln. Die gemeinsame strategische Perspektive befähigt den Werkzeugbau, neue Trends und Entwicklungen seiner Kunden zu identifizieren und entsprechendes Know-how, z. B. im Bereich Data Analytics und künstlicher Intelligenz, frühzeitig aufzubauen. Die direkte Verwertung von Kundenerfahrungen und das Übernehmen gemeinsamer Verantwortung für Entwicklungsziele führt dazu, dass die klassische Aufteilung in Käufer und Verkäufer aufgehoben wird und sich langfristige Partnerschaften etablieren.

Fazit und Ausblick

Die Digitalisierung der Kundendimension birgt neben vielen Potenzialen auch Herausforderungen. Durch die stärkere Interaktion über Plattformen sinkt z. B. die persönliche Interaktion, was durchaus zu einer Abnahme der Problemerkennung des Kunden führen kann. Des Weiteren kann durch die zunehmende Informationstransparenz hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der verbundenen Lebenszykluskosten eines Werkzeugs der Rechtfertigungsdruck zunehmen. Das Angebot vollständiger Convenience-Lösungen schafft zwar neue Kunden, jedoch ist mit einem hohen Koordinierungs- und Planungsaufwand bezüglich Wartung und Instandhaltung zu rechnen. Ebenfalls sollte ein korrekter Umgang des Kunden mit dem Werkzeug sichergestellt werden, damit häufige Reparaturen nicht zu einer Überlastung der eigenen Leistungsfähigkeit führen.



Der Anteil von E-Commerce am Einzelhandelsumsatz beträgt derzeit knapp

10 %

und wächst seit Jahren kontinuierlich



Wertschöpfungsdimension

Einführung und Status quo

Die Wertschöpfungsdimension beinhaltet die Aspekte Kernaktivitäten, Ressourcen und Technologien sowie strategische Partner. Entsprechend des traditionellen Selbstverständnisses als Produktionsbefähiger greift der Werkzeugbau hauptsächlich auf Fertigungstechnologien und produktionstechnisches Know-how zurück. Strategische Partnerschaften konzentrieren sich auf Anbieter für die technologische Grundausstattung, Lieferanten für (Standard-) Materialien sowie externe Dienstleister zum Ausgleich von Kompetenz- und Kapazitätsengpässen.

Geschäftsmodellinnovation durch intelligente Werkzeuge

Durch das Angebot datenbasierter Dienstleistungen werden die Kernaktivitäten über die Werkzeugentwicklung und -fertigung hinaus erweitert. Dienstleistungen wie Echtzeitüberwachung oder Unterstützung der Kundenmitarbeiter durch Remote-Zugriff auf das Werkzeug intensivieren die Betreuung der Serienproduktion und machen sie zur Kernaktivität eines datenbasierten Dienstleisters. Dementsprechend gilt, dass (fertigungs-)technisches Wissen und entsprechende Technologien allein nicht mehr ausreichen und digitales Know-how aufgebaut werden muss. Dieses liegt zum einen im Bereich der Vernetzung von Werkzeug und Produktionsmaschine, zum anderen im Umgang mit Data Analytics und maschinellem Lernen zur Optimierung des Werkzeugeinsatzes. Ebenfalls bedarf es an Wissen in den Bereichen Sensorik, Aktorik, Regelungstechnik sowie moderner IT-Infrastruktur als eine der entscheidenden Ressourcen des datenbasierten Geschäftsmodells. Die bestehende IT-Infrastruktur muss dazu auf die Verwertung großer Datenmengen angepasst und für einen sicheren externen Austausch ausgelegt werden. Im Zuge dieser Vervielfältigung der Kernaktivitäten sowie der benötigten Technologien und Ressourcen wächst auch die Anzahl wichtiger strategischer Partner an: Anbieter für Sensorik, Aktorik und Datenübertra-

gung werden wichtige Lieferanten im Zuge der Entwicklung intelligenter Werkzeuge. Bei der Entwicklung und Implementierung von datenbasierten Dienstleistungen kann der Werkzeugbau Anbieter für Datenanalyse und Regelungstechnik hinzuziehen. Im Kontext dieses technologischen Wandels können außerdem Kooperationen mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen dazu verhelfen, die Übertragung neuer Technologien in die Praxis des Werkzeugbaus erfolgreich zu gestalten.

Fazit und Ausblick

Die mit dem Wandel der Wertschöpfung einhergehenden Herausforderungen sind bestimmt durch rechtliche Aspekte bzw. Fragen zur Datensicherheit. Je größer der Grad an Partizipation im Geschäftsmodell, desto höher gestaltet sich der Bedarf an Datenaustausch zwischen Kunde und Werkzeugbau. Dazu sind die eingangs genannten Voraussetzungen zu schaffen. Weiterhin nimmt in diesen digitalisierten Wertschöpfungsnetzwerken die Abhängigkeit untereinander aufgrund der Notwendigkeit interdisziplinären Wissens stark zu. Im Extremfall entstehen neue Rollen wie die des Integrators, dessen Plattform die Leistungen aller Akteure verknüpft und auch den Kunden einbindet. Der Werkzeugbau muss seine digitalen Kompetenzen ausbauen, um sich selbst als Integrator etablieren zu können.



Während Marriot International Inc. Eigentümer von weltweit ca. 6.520 Hotels ist und einen Börsenwert von

46,0 Mrd. \$

aufweist, kommt Airbnb Inc. auf einen Börsenwert von

31,0 Mrd. \$,

obwohl es keine eigenen Hotels besitzt und "nur" eine Plattform zur Zimmervermittlung betreibt

Kostendimension

Einführung und Status quo

Die Kostendimension definiert, auf welche finanzielle Basis das Geschäftsmodell im Werkzeugbau gestellt wird. Dies umfasst neben den Ertragsströmen ebenfalls die Kostenstruktur. Klassisch werden Leistungen einmalig in Form des Werkzeugverkaufs oder der Bereitstellung einer Dienstleistung abgerechnet. Die Kostenseite ist entsprechend geprägt durch die klassischen Kernaktivitäten und umfasst u. a. Produktionskosten, Personal- und Materialkosten sowie Kosten für Miete und externe Vergaben.

Geschäftsmodellinnovation durch intelligente Werkzeuge

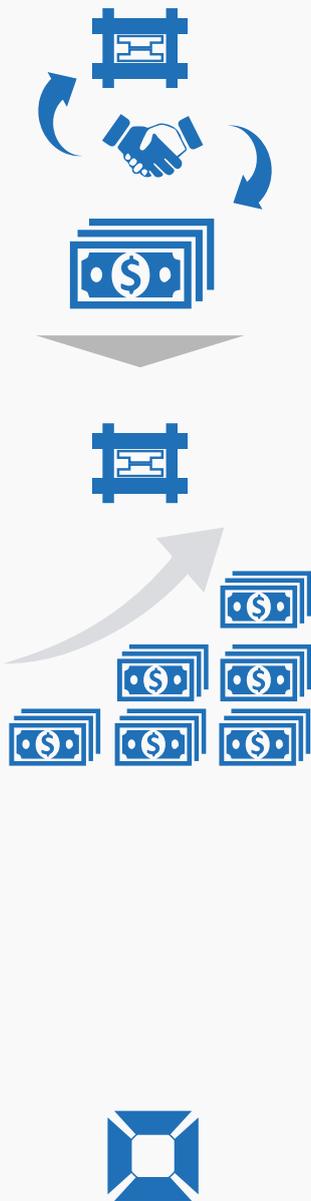
Datenbasierte Geschäftsmodelle können die Art und Weise der Umsatzgenerierung maßgeblich verändern – nicht nur, was die Quellen für Ertragsströme betrifft, sondern auch hinsichtlich der zeitlichen Perspektive. Grund ist der Wandel von der Produkt- zur Nutzerzentrierung in digitalen Geschäftsmodellen. Die Ausgestaltung intelligenter „Produkt-Service-Systeme“ ist an den traditionellen Servicevertrag angelehnt. Es werden langfristige Verträge für datenbasierte Dienstleistungen geschlossen. Allerdings muss der Kunde keine Auslösung des Auftrags mehr tätigen. Durch eine durchgängige Informationstransparenz wird der Wartungs- oder Reparaturbedarf durch den Werkzeugbau selbstständig erkannt, sodass entsprechende Kapazitäten geplant und der Auftrag durchgeführt werden kann. Der Werkzeugbau profitiert neben gesicherten Umsätzen ebenfalls durch eine frühzeitige Berücksichtigung in der Kapazitätsplanung, was zu einer stabilen und nivellierten Grundlast führt.

Die hohe Transparenz kann ebenfalls dazu genutzt werden, völlig neue Abrechnungsmodelle in Form sogenannter Nutzungsentgelte zu entwickeln. Beim Product-as-a-Service wird nicht das Werkzeug als solches verkauft, sondern es erfolgt eine nutzungsbasierte Abrechnung beim Kunden. Im Rahmen eines Pay-per-Piece Vertrags wird beispielsweise pro produziertem Teil, bei Pay-per-Shot wird pro Werkzeugschuss abgerechnet und die

Pay-per-Hour stellt dem Kunden die tatsächliche Nutzungsdauer in Rechnung. Diese im Werkzeugbau bisher sehr riskante Art der Abrechnung wird erstmalig aufgrund gesteigerter Transparenz über den Werkzeugeinsatz möglich. Durch den Einsatz von Intelligenz im Werkzeug kann ein sachgemäßer Umgang des Kunden sichergestellt und durch Einsicht in die aufgenommenen Parameter nachverfolgt werden. Für den Kunden besteht der Vorteil darin, dass er nur die Leistung bezahlt, die er tatsächlich abrufen und Entwicklungsaufwände in Form von Werkzeugkosten nicht einmalig fällig werden, sondern über den Produktlebenszyklus verrechnet werden. Der Werkzeugbau profitiert dadurch, dass die tatsächliche Leistung inklusive Leistungssteigerungen seines Werkzeuges finanziell honoriert wird. Auf der Kostenseite entstehen zusätzliche Ausgaben für die notwendige digitale IT-Infrastruktur und Vernetzung der Produktion. Ebenso sind Kosten für die Bereitstellung neuer digitalen Know-hows zu berücksichtigen.

Fazit und Ausblick

Dem Zusatznutzen für Werkzeugbau und Kunde stehen in der Kundendimension umfangreiche Herausforderungen gegenüber. Bezüglich der leistungsabhängigen Nutzungsentgelte beim Abrechnungsmodell des Product-as-a-Service müssen kapitalbezogene Risiken beachtet werden. Wegen der nutzungs- oder zeitabhängigen Zahlungen anstatt des einmaligen Werkzeugkaufs, müssen Werkzeugkosten vorfinanziert werden, was sich wiederum negativ auf Kapitalbindung und -bedarf auswirkt. Ebenso muss mit dem Kunden ein Mindestnutzungsumfang definiert und vertraglich festgehalten werden, sodass eine vollständige Gegenfinanzierung des Werkzeugs gesichert ist. Dies kann gegebenenfalls mit Preisstaffelungen kombiniert werden, um eine lange Nutzung des Werkzeugs beim Kunden zu motivieren. Dennoch sind Nutzungsentgelte risikobehaftet, da sinkende Umsätze oder gar eine Insolvenz des Kunden schlimmstenfalls deren Ausbleiben bedeuten.



Der Umsatzanteil von Services aus iTunes und App Store am Gesamtumsatz beträgt bei Apple derzeit

18 %

(April bis Juni 2018) und steigt seit Jahren kontinuierlich an



Insgesamt ist festzustellen, dass datenbasierte Geschäftsmodelle einen verbindenden und partizipativen Charakter aufweisen und somit die Integration des Werkzeugbaus in die Prozesse des Kunden weiter intensivieren. Ebenfalls können die Interessen von Werkzeugbau und Kunde durch den Einsatz intelligenter Werkzeuge in Verbindung mit digitalen Geschäftsmodellen gleichgerichtet werden, indem Produktivitätsgewinne durch Optimierung der Werkzeuge in der Serie finanziell auf beide Parteien aufgeteilt werden. Dank höherer Datenverfügbarkeit und -transparenz können die Risiken in der Kooperation zwischen Werkzeugbau und Kunde erstmalig besser abgegrenzt werden, da Fehlerursachen einfacher identifiziert und eindeutig dem Verursacher zugeordnet werden können. So ist unter anderem die Frage, ob das Werkzeug fehlerhaft ausgelegt oder beim Kunden falsch eingesetzt wurde,

im Rahmen datenbasierter Geschäftsmodelle leichter zu beantworten.

Die zunehmende Nachfrage datenbasierter Dienstleistungen bedeutet nicht, dass alle Elemente des Geschäftsmodells transformiert und die im morphologischen Kasten dargestellten Ausprägungen realisiert werden müssen. Welche Elemente des Geschäftsmodells in welchem Ausmaß digital transformiert werden, hängt vor allem von den Kundenanforderungen, den Zielsetzungen des Werkzeugbaus sowie dessen Möglichkeiten und Fähigkeiten ab. Zur Ableitung einer Digitalisierungsstrategie sollten neben der Erfassung des Status quo und der Definition unternehmerischer Zielsetzungen ebenfalls brancheneigene und branchenfremde Best Practices sowie relevante Befähiger identifiziert werden.

Kriterium		Ausprägungen				
Marktdimension	Wertbeitrag/ Kundennutzen	Produktionsabsicherung und Produktoptimierung	Produktionsbefähigung durch Werkzeugbereitstellung	Erhöhte Transparenz und Verständnis der Produktionsprozesse	Erhöhte Prozessqualität durch Überwachung	Laufende Produktionsoptimierung durch maschinelles Lernen
	Vertriebskanäle	Physischer Direktvertrieb	Online über Kundenplattform			
Kundendimension	Kunden-segmente	Kostenoptimierer	Qualitätsoptimierer	Zeitoptimierer	Innovationstreiber	Convenience Kunde
	Kundenbindung	Persönliche Betreuung	Interaktion über Kundenplattform	Co-Creation		
Wertschöpfungsdimension	Kernaktivitäten	Unterstützung des Kunden bei Produktentwicklung	Werkzeugentwicklung und -fertigung	Betreuung der Serienproduktion	Werkzeug- und Produktionsoptimierung	
	Ressourcen/ Technologien	(Fertigungs-) Technisches Wissen	Fertigungstechnologien	Klassische IT-Infrastruktur	Digitales Know-How	Digitale Technologien
	Strategische Partner	Anbieter für technologische Grundausstattung	Verlängerte Werkbank	Hardware Anbieter für Sensorik, Aktorik und Datenübertragung	Anbieter für Datenanalyse und Regelungstechnik	Hochschulen/ Forschungseinrichtungen
Finanzdimension	Ertragsströme	Klassischer Werkzeugverkauf	Einzelne Abrechnung von klassischen Dienstleistungen	Service Contract: Serviceverträge für klassische Dienstleistungen	Product-Service-System: Serviceverträge für datenbasierte Dienstleistungen	Product-as-a-Service: Nutzungsentgelte
	Kostenstruktur	Lohnkosten für traditionelle Tätigkeiten im Werkzeugbau	Kosten für Material und traditionelle externe Vergaben	Kosten für Miete, Anlagentechnik und Betriebsmittel	Kosten für Notwendige Industrie 4.0 IT-Infrastruktur	Kosten für digitales Know-How

■ Bestehende Ausprägungen ■ Zukünftige Möglichkeiten



Fazit und Ausblick

Fakt ist: Die produzierende Industrie und der Werkzeugbau als dessen zentraler Befähiger stehen vor umfangreichen Herausforderungen im Zieldreieck von Zeit, Kosten und Qualität, die sich in Zukunft weiter intensivieren werden. Fakt ist auch: Unternehmen, die nachhaltig erfolgreich am Markt agieren wollen, müssen diese Herausforderungen nicht nur antizipieren, sondern sie erfolgreich gestalten.

Industrie 4.0 wird derzeit als prominente Lösung zur Bewältigung dieser Herausforderungen gesehen. Industrie 4.0 kann dabei sowohl wertschöpfungsseitig zur Verbesserung der internen Auftragsabwicklung eingesetzt werden, als auch dem Kunden einen marktseitigen Nutzen durch das Angebot intelligenter Produkte und Dienstleistungen generieren. Für die erfolgreiche Positionierung im Wettbewerb ist die zielführende Gestaltung beider Felder notwendig. Dies bedingt neben der Schaffung der technischen Voraussetzungen ebenfalls die Entwicklung neuer Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle, um vom technischen Wandel finanziell profitieren zu können.

Für den Werkzeugbau bedeutet dies, dass neben einer digitalen Vernetzung des Shopfloors zukünftig intelligente Werkzeuge angeboten werden müssen, um den marktseitigen Nutzen zu erhöhen und steigende Kundenerwartungen befriedigen zu können. Die heute vielfach praktizierte Differenzierung über hohe Qualität und Standzeit der Werkzeuge wird nicht mehr ausreichend sein, um eine Abgrenzung vom Wettbewerb erfolgreich zu gestalten. Zwar sind intelligente Werkzeuge aufgrund fehlender Kompetenzen und Geschäftsmodelle bisher kaum verbreitet, die hohe Komplexität der Thematik erfordert jedoch eine frühzeitige Auseinandersetzung und Erforschung. Insbesondere der zeitaufwen-

dige Aufbau relevanter Kompetenzen und Partnerschaften verhindert das kurzfristige Anbieten derartiger Lösungen und bedingt eine entsprechende Vorlaufzeit.

Die vorliegende Studie soll den Ausgangspunkt einer erfolgreichen Gestaltung der digitalen Transformation im Werkzeugbau durch den Einsatz intelligenter Werkzeuge bereitstellen. Neben dem Aufbau neuer Kompetenzen in den Bereichen Sensorik, Aktorik und Datenverarbeitung sowie der Konzeption neuer Dienstleistungen und Ertragsmodelle muss sich das Selbstverständnis des Werkzeugbaus vom traditionellen Produktionsbefähiger hin zu einem Produktionsoptimierer weiterentwickeln. Sein Leistungsangebot besteht zukünftig zunehmend aus kompletten, intelligenten Produkt-Service-Systemen, die die Potenziale intelligenter Werkzeuge monetarisieren und den Kunden und seinen langfristigen Nutzen in den Mittelpunkt stellen.

Mittel- bis langfristig ist eine starke Zunahme an Intelligenz im Werkzeug zu erwarten. Dies ist einerseits der Tatsache geschuldet, dass relevante Sensorik leistungsfähiger und gleichzeitig kostengünstiger in der Beschaffung wird. Andererseits steigen Anforderungen hinsichtlich Qualität, Leichtbau und Formgebung weiter an, sodass komplexe Bauteile mit konventionellen Werkzeugen kaum mehr in hoher Prozessqualität und Ausbringungsmenge hergestellt werden können. Durch die Ausweitung von Funktionalitäten in bestehenden Simulationslösungen wird die Auslegung von Sensorik und Aktorik in Zukunft weiter vereinfacht. Ebenfalls sind aktuell große Fortschritte im Bereich Data Analytics und künstlicher Intelligenz zu verzeichnen, sodass Anlernvorgänge und das Festlegen von Eingriffgrenzen zukünftig kosteneffizienter realisiert werden können.

Autoren



Prof. Dr. Wolfgang Boos

Geschäftsführer WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH



Christoph Kelzenberg

Leiter Abteilung Unternehmensentwicklung
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



Jan Wiese

Gruppenleiter Abteilung Unternehmensentwicklung
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



Felix Stracke

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung Unternehmensentwicklung
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



Christoph Ebbecke

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung Unternehmensentwicklung
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



Tim Graberg

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung Unternehmensentwicklung
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



Simon Jakobowski

Softwareentwickler
WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH



Dr. Sven Lapper

Entwicklungsingenieur
Fritz Stepper GmbH & Co. KG

Unsere Studien – Strategische Entwicklung



Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle
2018



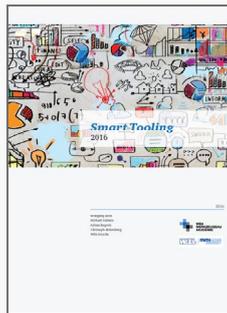
Corporate Tooling – Agile Tool Development
2017



Corporate Tooling – Flexible Tooling Organization
2017



Corporate Tooling – Intelligent Tool Manufacturing
2017



Smart Tooling
2016



Fast Forward Tooling
2015



F3 Fast Forward Factory
2015

Unsere Studien – Erfolgreich ...



**Erfolgreich
Lieferanten Managen**
2018



**Erfolgreich CAx-
Prozessketten Gestalten**
2018



**Erfolgreich
Fräsen**
2018



**Erfolgreich
Automatisieren**
2017



**Erfolgreich
Restrukturieren**
2017



**Erfolgreich
Performance Messen**
2017



**Erfolgreich Fertigungs-
technologien Einsetzen**
2017



**Erfolgreich
Finanzieren**
2016



**Erfolgreich Digital
Vernetzen**
2016



**Erfolgreich
Mitarbeiter Motivieren**
2016

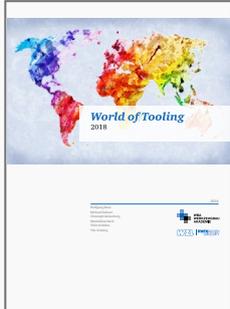


**Erfolgreich
Kalkulieren**
2015



Erfolgreich Planen
2015

Unsere Studien – Tooling in ...



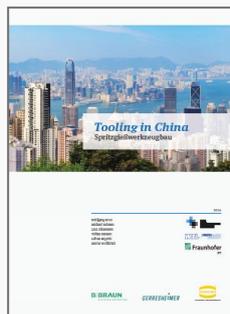
World of Tooling
2018



Tooling in Czech Republic
2018



Tooling in Germany
2018



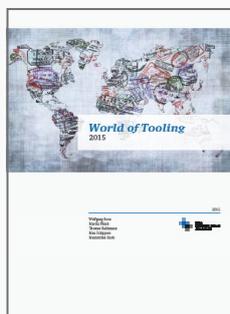
Tooling in China
2016



Tooling in Turkey
2016



Tooling in Germany
2016



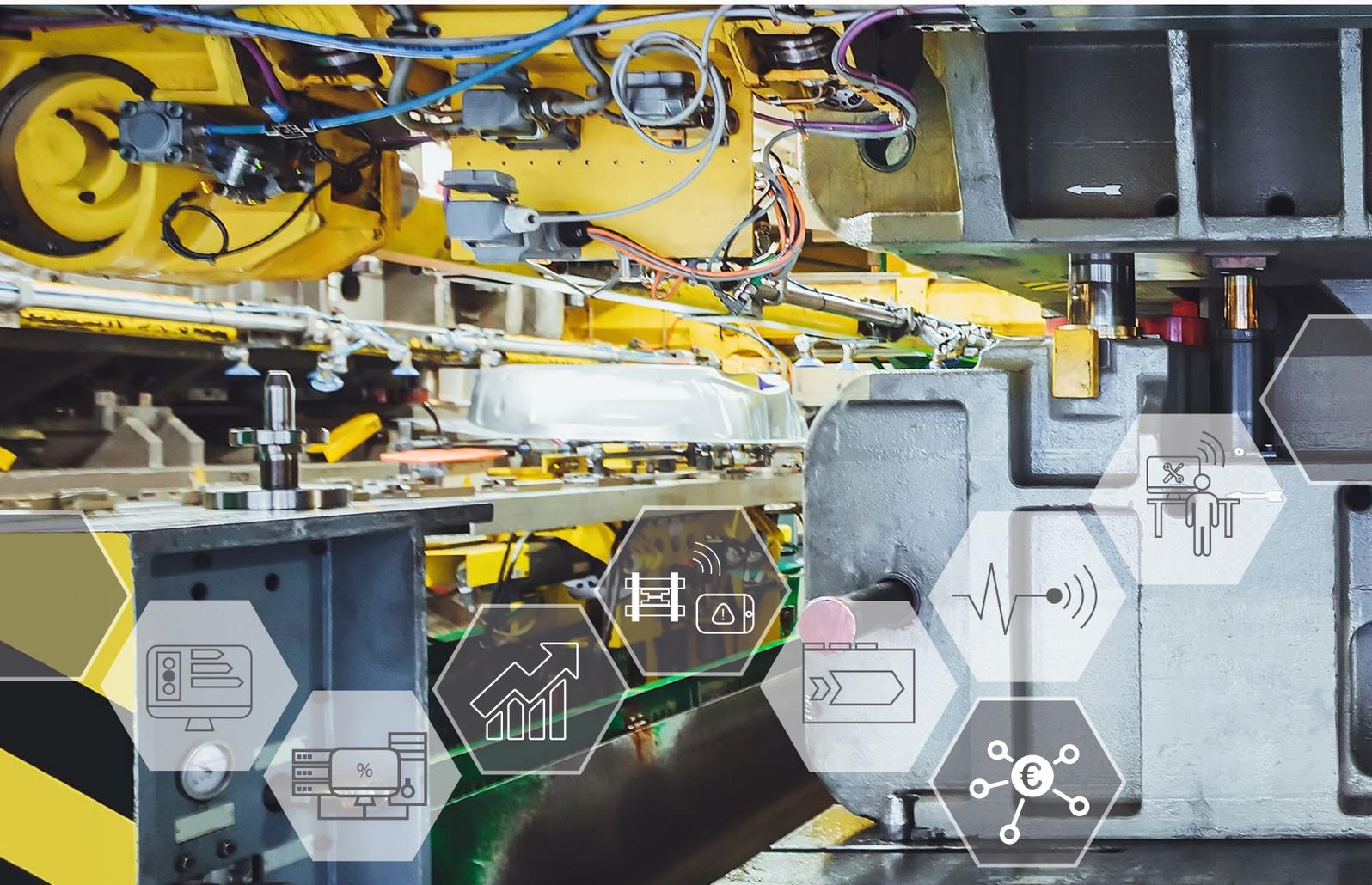
World of Tooling
2015



Tooling in China
2015



Tooling in South Africa
2014



Herausgeber

WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH

Campus-Boulevard 30
52074 Aachen

www.werkzeugbau-akademie.de

Werkzeugmaschinenlabor WZL

der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
Campus-Boulevard 30
52074 Aachen

www.wzl.rwth-aachen.de

978-3-946612-33-9



9 783946 612339