

# Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 2

Fertigungstechnik

Nr. 696

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Aachen  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger (Hrsg.), Berlin  
Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann (Hrsg.), Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl, Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm, Stuttgart  
Dr.-Ing. Armin Lechler, Stuttgart

## Industrie 4.0 – Vision und Realität





# Fortschritt-Berichte VDI

## Reihe 2

### Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Aachen  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger (Hrsg.), Berlin  
Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann (Hrsg.), Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl, Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm, Stuttgart  
Dr.-Ing. Armin Lechner, Stuttgart

## Nr. 696

### Industrie 4.0 – Vision und Realität

VDI verlag

Brecher, Christian; Krüger, Jörg; Uhlmann, Eckart; Verl, Alexander; Klemm, Peter; Lechler, Armin

## **Industrie 4.0 - Vision und Realität**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 696. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

96 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-18-369602-4, ISSN 0178-9406,

€ 38,00/VDI-Mitgliederpreis € 34,20.

**Für die Dokumentation:** Automatisierung – Cloud – Cyber-physische Systeme – Engineering – Industrie 4.0 – Intelligente Vernetzung – Produktion – Steuerung – Virtualisierung

Die produktionstechnischen Institute aus Aachen (WZL/IPT), Berlin (IWF/IPK) und Stuttgart (ISW) tragen mit Ihren Forschungsarbeiten dazu bei, Industrie 4.0 auf den betrieblichen Hallenboden zu bringen und praktikable Lösungen insbesondere auch für kleine und mittlere Unternehmen zu entwickeln. Der vorliegende Band dokumentiert die Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Thema Industrie 4.0 und gibt einen Überblick zu Konzepten und Visionen sowie bereits realisierten Implementierungen mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Diese Ausgabe stellt Forschungsarbeiten auf den Gebieten Digitaler Zwilling, Cloudbasierte Steuerung und Programmierung, Drahtloskommunikation im industriellen Umfeld, Qualitätsüberwachung auf Basis steuerungstechnischer Daten, Hardware-in-the-Loop Simulation, Virtualisierung von Steuerungen und steuerungstechnisches Engineering dar und zeigt das Spannungsfeld zwischen zukünftigen Lösungsansätzen und bereits heute praktikablen Methoden und Technologien auf.

### **Bibliographiche Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9406

ISBN 978-3-18-369602-4

## Vorwort

Seit mehreren Jahren beherrscht das Thema Industrie 4.0 die Forschung und Entwicklung im Bereich der Produktionstechnik. Der Wandel der Informations- und Kommunikationstechnik in der Fabrik, die Digitalisierung von Produkt und Prozess und die Integration cyber-physischer Systeme in Produktionsabläufe ermöglichen eine flexiblere Produktion und eröffnen neue Wertschöpfungspotenziale.

Während die ersten Jahre dieser Entwicklung noch davon geprägt waren, die vielfältigen Perspektiven von Industrie 4.0 mit innovativen Forschungsansätzen zu erkunden, gewinnen Lösungen aktuell zunehmend an Reife. Die produktionstechnischen Institute aus Aachen (WZL/IPT), Berlin (IWF/IPK) und Stuttgart (ISW) tragen mit Ihren Forschungsarbeiten dazu bei, Industrie 4.0 auf den betrieblichen Hallenboden zu bringen und praktikable Lösungen insbesondere auch für kleine und mittlere Unternehmen zu entwickeln.

Der im vorliegenden Band unter dem Titel „Industrie 4.0 – Vision und Realität“ dargestellten Forschungsarbeiten auf den Gebieten

- Digitaler Zwilling,
- Cloudbasierte Steuerung und Programmierung,
- Drahtloskommunikation im industriellen Umfeld,
- Qualitätsüberwachung auf Basis steuerungsinterner Daten,
- Hardware-in-the-Loop Simulation,
- Virtualisierung von Steuerungen,
- Steuerungstechnisches Engineering

zeigen das Spannungsfeld zwischen zukünftigen Lösungsansätzen und bereits heute praktikablen Methoden und Technologien auf.

Unser Dank gilt den Autoren für Ihre Beiträge und ihr Engagement bei der Erstellung dieses Buches. Wir hoffen, dass es den Lesern neue Perspektiven und Impulse zum Thema Industrie 4.0 vermittelt.

Aachen 2017 C. Brecher

Berlin 2017 J. Krüger, E. Uhlmann (Herausgeber)

Stuttgart 2017 A. Verl



---

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Flexible Programmierung roboterbasierter Montageabläufe durch Demonstration</b>	<b>1</b>
	C. Brecher und C. Ecker	
<b>2</b>	<b>Von der Vision der cloudbasierten Steuerung zur Realität auf dem Hallenboden – Anforderungen und Machbarkeit in den Unternehmen</b>	<b>12</b>
	C. Horn, H. Lüer, M. Chemnitz und J. Krüger	
<b>3</b>	<b>Industrielles LTE</b>	<b>22</b>
	P. Neher, A. Lechler und A. Verl	
<b>4</b>	<b>Prozessparallele Qualitätsüberwachung durch Kombination modellbasierter Ansätze mit steuerungsinternen Daten</b>	<b>32</b>
	M. Königs und C. Brecher	
<b>5</b>	<b>Ebenen der Virtualisierung von Robotersteuerungen – Von der aufgabenorientierten Programmierung bis zur Lageregelung aus der Cloud</b>	<b>41</b>
	A. Vick und J. Krüger	
<b>6</b>	<b>Steuerungstechnisches Engineering von Maschinen und Anlagen im Kontext Industrie 4.0</b>	<b>49</b>
	S. Scheifele, A. Lechler und A. Verl	
<b>7</b>	<b>Bewertung der Bauteilqualität in der Serienfertigung auf Basis NC-intern aufgezeichneter Daten</b>	<b>60</b>
	F. Wellmann und C. Brecher	
<b>8</b>	<b>Condition Monitoring in der Cloud</b>	<b>70</b>
	A. Laghmouchi und E. Uhlmann	
<b>9</b>	<b>Von der Virtuellen Maschine zur Virtuellen Produktion mit Ansätzen der Echtzeit-Co-Simulation</b>	<b>81</b>
	C. Scheifele und A. Verl	



# 1 Flexible Programmierung roboterbasierter Montageabläufe durch Demonstration

*C. Brecher, C. Ecker*

## 1.1 Einleitung

Die Automatisierung von Montageabläufen ist heute insbesondere für kleine und mittlere Produktionsunternehmen (KMU) häufig unwirtschaftlich. So führen die Etablierung von Baukastensystemen im eigenen Produktprogramm sowie zunehmende Forderungen von Kunden nach individuell gestalteten Lösungen zu hoher Produktvarianz und bedingen geringe Stückzahlen gleicher Baugruppen [1]. Gleichzeitig beeinflussen Marktschwankungen wegen der Absatznähe der Montage in besonderem Maße die gestellten Flexibilitätsanforderungen innovativer Betriebsmittellösungen [2]. Um eine wirtschaftliche Automatisierung von Montageaufgaben in diesem Kontext zu ermöglichen, müssen daher neue Anlagenkonzepte und Methoden zur schnellen Definition und Anpassung von Abläufen auf Werkstattebene gefunden werden.

Roboterbasierte Systeme bieten grundsätzlich den Vorteil einer freien Bewegungsprogrammierbarkeit, sodass Bewegungen z. B. zur Führung eines Werkzeugs flexibel an variantenspezifische Montageprozesse angepasst werden können. Die heute verfügbaren Verfahren zur Bewegungsprogrammierung berücksichtigen jedoch nur jeweils den Funktionsumfang einzelner Betriebsmittel bzw. Steuerungssysteme und stellen insbesondere keinen Bezug zu den durch die Bewegung hervorgerufenen Montageprozessen her [3]. Die Inbetriebnahme verteilt gesteuerter Anlagenkomponenten erfordert daher stets die Anwendung und manuelle Synchronisierung unterschiedlicher Programmiersysteme. Ein mangelnder Prozessbezug stellt in diesem Zusammenhang das Hauptdefizit der verfügbaren Methoden dar.

Heutige Anwender von Roboterprogrammierverfahren werden in der Regel dem Unternehmensbereich der Instandhaltung zugeordnet und müssen aufwendig auf diese Tätigkeit vorbereitet werden, da sie für eine größere Anzahl unterschiedlicher Anlagen bei einer einmaligen Inbetriebnahmephase und darauffolgend für die Störungsbehebung verantwortlich sind. Die Vorhaltung einer solchen Abteilung ist für produzierende Unternehmen erst ab einer bestimmten Anlagenmenge und damit Unternehmensgröße wirtschaftlich darstellbar, sodass insbesondere für kleine Unternehmen allgemein große Hürden für den eigenen Betrieb von Roboter-technik bestehen [4].

Im Gegensatz dazu verfügen Montagemitarbeiter nicht über das notwendige Expertenwissen, um automatisierte Anlagen zur Realisierung einzelner Montageschritte nutzen zu können. Sie müssen dazu befähigt werden, das Verhalten des Automatisierungssystems selbstständig verändern zu können, um beispielsweise auf Stückzahlschwankungen, Produktvarianten oder Prozessveränderungen (Parameteränderungen) zu reagieren. Aus diesem Grund sind die heute eingesetzten Betriebsmittel im manuellen Montageumfeld vergleichsweise wenig komplex und die jeweilige Leistungsfähigkeit (Produktivität) nur noch begrenzt steigerungsfähig. Um weitere Produktivitätssprünge zu erzielen, müssen integrative Betriebsmöglichkeiten für manuelle und automatisierte Montagetechnik entwickelt werden.

Die Personengruppe der Montagefacharbeiter ist im Vergleich zur Instandhaltung in der Regel deutlich größer, sodass der finanzielle Aufwand zur Mitarbeiterschulung bezüglich klassischer Interaktionsverfahren (entspricht Online-Programmierverfahren) die Realisierung in Unternehmen zusätzlich stark hemmt. Weiterhin bleibt das bereits existierende Expertenwissen

sen der Mitarbeiter bezüglich der zu realisierenden Montageprozesse bei Programmierschulungen weitgehend ungenutzt. Im folgenden Beitrag wird daher ein integrierter Inbetriebnahmeansatz vorgestellt, der die Kompetenzen der jeweils beteiligten Mitarbeitergruppen berücksichtigt und die Anwendbarkeit im Werkstattumfeld sicherstellt.

## 1.2 Stand der Technik

### 1.2.1 Flexible Automatisierung von Montageabläufen

Aus steuerungstechnischer Sicht besteht eine roboterbasierte Montagezelle neben dem Robotersystem (RC) meist auch aus einer zusätzlichen Logiksteuerung (SPS), verteilten Feldbuskomponenten (Sensoren und Aktoren) und weiteren Steuerungen für Bewegungen (Motion Control), zur Ausführung von Technologiefunktionen (z. B. durch eine Schraubwerkzeugsteuerung) und zur Überwachung der Sicherheit (Sicherheits-SPS). Die Programmierung der verschiedenen Steuerungen erfolgt durch steuerungsspezifische Verfahren, die jeweils nur einen Teilaspekt der Schraubprozesse abdecken können [5].

Inbetriebnahme-Methoden werden grundsätzlich in Online- und Offline-Verfahren unterschieden [6]. Während eine Online-Programmierung stets auf der direkten Interaktion des Bedieners mit dem Betriebsmittel über eine geeignete Schnittstelle (Human-Machine Interface: HMI) basiert, umfasst die Offline-Programmierung die Codeerstellung mittels geeigneter Programmier- und Simulationswerkzeuge und benötigt zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme keine direkte Verbindung zum Betriebsmittel. Hier wirken sich jedoch hohe Anforderungen an die Qualität der verwendeten Simulationsmodelle insbesondere bei KMU nachteilig auf die Übertragbarkeit virtuell erstellter Programme auf reale Anlagen aus. Innerhalb der beiden Kategorien existieren jeweils Ansätze für eine vereinfachte Programmierung der betroffenen Steuerungen.

Im Bereich der vereinfachten Offline-Programmierung von Montageprozessen bieten aufgabenorientierte Systeme die Möglichkeit, bekannte Einzeloperationen aus einer Liste auszuwählen und so miteinander zu kombinieren, dass ein neuer Programmablauf entsteht [5, 7]. Die Operationen werden bedienerseitig mit aufgabenspezifischen Begriffen belegt, sodass die Komplexität des unterlagerten Quellcodes für den Bediener verborgen bleibt. Zudem ermöglicht die zielorientierte Programmierweise, dass die Art der Realisierung, wie z. B. die Wahl der Bewegungsart, des Werkzeugs oder der verwendeten Programmiersprache, nicht durch den Bediener selbst vorgegeben werden müssen. Große Teile des Programmieraufwandes werden dadurch jedoch auf einen früheren Zeitpunkt verlagert.

Mit zunehmender Vernetzung steigen die Anforderungen an eine stärkere Integration der am Betrieb des Produktionssystems beteiligten Anwendergruppen, die sich aus dem Lebenszyklus einer Anlage ergeben. Das Ziel dieser Integration ist es, Informationen, die z. B. während der Planung und Entwicklung einer Anlage erzeugt werden, in allen Abschnitten des Lebenszyklus zugänglich zu machen [8]. Für die Phase der Inbetriebnahme bzw. Programmierung bedeutet dies, dass bereits bestehende Informationen, wie CAD-Modelle der Anlage oder des zu fertigenden Produkts, in die Inbetriebnahmemethode übernommen werden können. Methoden, die eine Programmierung auf Basis der virtuell existierenden Modelle ermöglichen, werden unter dem Begriff der virtuellen Inbetriebnahme (vIBN) zusammengefasst. Je nach Programmierziel bzw. Domäne können sich die zur Programmierung benutzten Modelle unterscheiden, indem z. B. die Geometrie, die Steuerungstopologie oder das mechatronische Verhalten durch das Modell abgebildet werden [9].

Die existierenden Werkzeuge der virtuellen Roboterinbetriebnahme zeichnen sich durch eine realitätsgerechte Darstellung der programmierten Anlage und der geplanten Prozesse aus (Si-

mulation). Prozessfehler oder Kollisionen können durch passgenaue Erweiterungen automatisch erkannt und teilweise behoben werden. Die Bedienung dieser Werkzeuge ist jedoch an die Bedienung der angegliederten CAD-Werkzeuge angepasst und bedingt einen hohen Schulungsaufwand [10]. Zudem wird der Einsatz bei KMU meist durch den Mangel an zur Inbetriebnahme geeigneten Anlagenmodellen verhindert [11].

Neben den betriebsmittelspezifischen Inbetriebnahmewerkzeugen existieren weitere Ansätze für die anwendungsorientierte virtuelle Inbetriebnahme. Hier werden die Vorteile der aufgabenorientierten Ansätze (Verringerung der Komplexität und Verbesserung der Übertragbarkeit) sowie der virtuellen Inbetriebnahme mit Betriebsmittelmodellen kombiniert. Die Programmierung der Betriebsmittel kann somit beispielsweise anhand eines automatisiert generierten Graphen erfolgen, der die Fähigkeiten der betroffenen Werkzeuge berücksichtigt [12]. Über eine Auswertung verschiedener Regeln (z. B. geometrische Zugänglichkeit, Parallelität von Aktionssträngen, mechanische Stabilität, notwendige Werkzeugwechsel) werden Lösungsstränge innerhalb des Graphen ermittelt. An den Kanten des Graphen befinden sich „Aktionsprimitive“, die einen Übergang der Montagezustände bewirken.

### 1.2.2 Interaktionsbasierte Inbetriebnahmemethoden

Den Offline-Methoden zur Inbetriebnahme stehen Online-Methoden wie z. B. das Teach-In-Verfahren gegenüber, die insbesondere in KMU eine hohe Verbreitung aufweisen. Ein Vorteil der Online-Methoden ist das direkt erzeugte Feedback durch die Interaktion mit der realen Anlage. Um z. B. die Bewegungsprogrammierung von Robotern zu erleichtern, wurden Interaktionsmöglichkeiten entwickelt, bei denen der Roboter durch Anfassen manuell verfahren werden kann. Dies wird z. B. durch Anbringen von Kraft-/Momenten-Sensoren am Roboterflansch realisiert, die die aufgeprägten Kräfte in eine Bewegung der Roboterkinematik umsetzen [13]. Andere Ansätze verwenden Zeigegeräte, um die vom Roboter nachzuahmende Bewegung manuell zu demonstrieren [14].

Um die Vorteile der Online- und Offline-Methoden zu verbinden, wurde der Ansatz evaluiert, die erwähnten Aktionsprimitive über ein vereinfachtes Online-Verfahren zu erzeugen, das auf dem Kraft-/Momenten-gesteuerten Verfahren beruht [15]. Ihre Wiederverwendung bzw. Aktionsplanung unter Ausnutzung der Primitive geschieht anschließend offline, d. h. ohne direkten Anlagenbezug.

Das als Online-Verfahren deklarierte Paradigma des Programmierens durch Demonstration (PbD: programming by demonstration) gilt insbesondere für den Bereich der direkten Mensch-Roboter-Interaktion als vielversprechendes Verfahren zur intuitiven Roboterprogrammierung [16]. Anhand von Observationen wird der Roboter dazu befähigt, den demonstrierten Prozess so zu erfassen, dass er die relevanten Aktionen nachahmen kann [17]. Um diesen Ansatz zu realisieren, müssen den erfassbaren (manuellen) Operationen funktionsidentische Teilaktionen des Roboters gegenübergestellt werden können. Ein Interaktionssystem muss daher insbesondere die Frage nach dem zugrundeliegenden Ziel einer (manuellen) Handlung beantworten können [16, 18].

Die Defizite der beschriebenen Programmiermethoden ergeben sich, bezogen auf die Forderung nach einer flexiblen Inbetriebnahme von Montagesystemen, aus einer mangelnden Anwendbarkeit für Montagemitarbeiter auf Werkstattebene. Daher wird nachfolgend ein rollenbasiertes Konzept vorgestellt, das die jeweils vorhandenen Kompetenzen berücksichtigt und den notwendigen Informationsfluss über die betroffenen Lebenszyklusphasen eines Montageprodukts beschreibt.

### 1.3 Demonstrationsbasierte Digitalisierung manueller Montageabläufe

Das vorgeschlagene Interaktionskonzept betrachtet den Inbetriebnahmeprozess der Montageautomatisierung zu verschiedenen Zeitpunkten in den Lebenszyklen des Montageobjekts bzw. der Montageanlage. Dabei wird das Ziel verfolgt, möglichst viele Informationen, die während der Planungs- bzw. Engineering-Phase erzeugt werden, für die Inbetriebnahmephase verfügbar zu machen (siehe auch [19, 20]). Der Bediener kann diese Informationen direkt für die Ablaufdefinition nutzen, indem er die Montage realer Objekte manuell demonstriert und dabei sensorisch erfasst wird (vgl. Abbildung 1 bzw. Gesamtkonzept in [21]). So wird die Bedeutung seiner Handlungen bestimmbar, indem Objektbewegungen – simultan zum realen Prozess – jeweils auf einen entsprechenden digitalen Zwilling übertragen werden und eine kontinuierliche Evaluation sich annähernder Objektmodelle erfolgt.

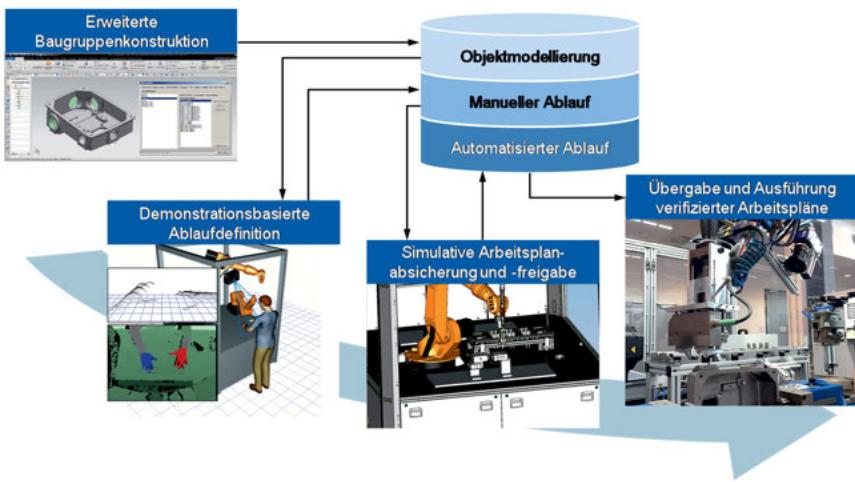


Abbildung 1: Methodik für einen integrierten Inbetriebnahmeansatz.

Das verwendete Erfassungssystem besteht dazu aus einer HMI-Anwendung, die Objektmodelle aus einer Datenbank bzw. einem PLM-System dynamisch verfügbar macht sowie aus einer Kombination aus Bewegungs- und Greifsensorik, durch die durch den Bediener aufgebrachte Objektmanipulationen (Handlungsfolge: Greifen – Bewegen – Loslassen) bestimmt werden (vgl. Abbildung 2). Die Interaktion mit realen Montageobjekten erfolgt innerhalb eines definierten Anlagenbereichs, welcher über eine Spannvorrichtung zur Fixierung eines Basisobjekts sowie über Objektquellen in Form von identifizierbaren Greifschalen verfügt. Das System folgt hier einer Quelle/Senke-Logik, d. h. es können neue Objektinstanzen durch Greifen in der Umgebung einer Objektquelle erzeugt und durch Loslassen in der Umgebung einer Objektsenke gelöscht werden.

Den Modellierungsrahmen der Erfassung bildet jeweils ein Szenen-Objekt, welches die Konsistenz und Vollständigkeit des digitalen Zwillinges gewährleistet und während der Initialisierung ausgewählt wird (vgl. Abbildung 3). Eine Szene enthält Objektklassifikationen aus der Phase des Engineerings, die z. B. Spann-, Greif- oder Montagemöglichkeiten geometrisch definieren und stellt diese Informationen Planungsfunktionen zur Verfügung, die durch den

Bediener ausgelöst werden. Wird eine neue Objektinstanz angelegt, enthält sie stets einen Verweis auf eine derart beschriebene Objektklasse.



Abbildung 2: Aufbau des Erfassungssystems für die manuelle Montagedemonstration.

Zur Beschreibung eines Montageablaufs, muss darüber hinaus auch der zeitliche Verlauf von Zustandsveränderungen aller Objektinstanzen beschrieben werden können. Dies geschieht in Form von „Objektinstanzzuständen“, die für den Anwendungsfall der Montage insbesondere die Objektlage und den Montagezustand charakterisieren. Werden einzelne Objekte zu Baugruppen montiert, resultieren „Objektinstanzzustandsgruppen“, die in der Folge als Einheit betrachtet und durch den Bediener manipuliert werden können. Einen Überblick über den aktuellen Szenenzustand erhält der Bediener in Form einer Echtzeitvisualisierung, welche relevante Interaktionsbereiche und eine vereinfachte Darstellung seiner aktuellen Handzustände markiert.

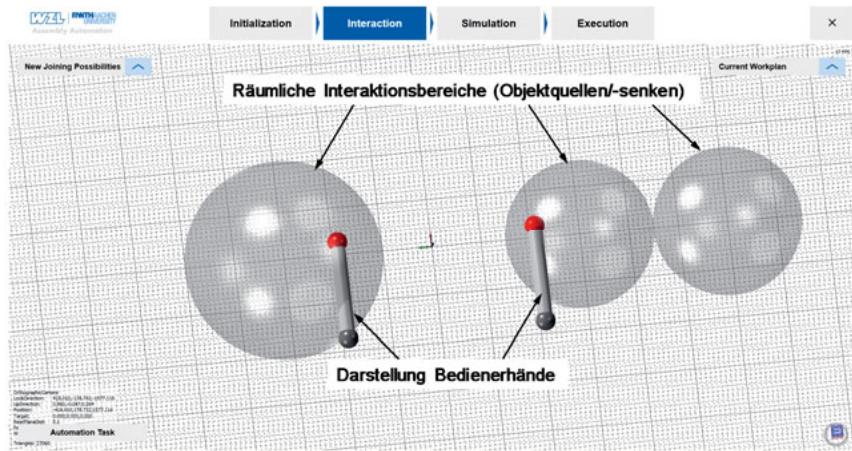


Abbildung 3: Visualisierung der Montageinteraktion innerhalb der HMI-Anwendung.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf zweier aufeinander folgender Objektmanipulationen, bei denen der Bediener zunächst ein Gehäuse-Objekt als Montagebasis aus einer Objektquelle greift und ablegt (1 – 3) und anschließend ein Deckel-Objekt als Anbauteil aus einer Objektquelle greift und in der Umgebung einer Anbaumöglichkeit loslässt (4 – 6).

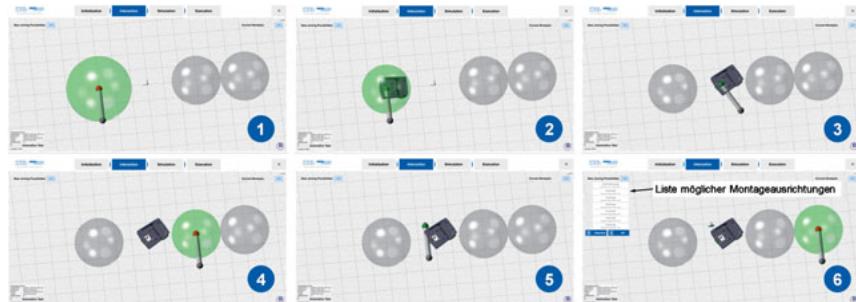


Abbildung 4: Abfolge digital erfasster Objektzustandsveränderungen.

Als Reaktion auf die beobachtete Lage- bzw. Zustandsveränderung ermittelt das System eine Menge möglicher Montagekonfigurationen, die dem Bediener als Liste dargestellt werden (vgl. Abbildung 5). Anschließend kann der Bediener die verschiedenen Konfigurationen einzeln auswählen und erhält eine visuelle Vorschau des jeweiligen Verbindungskandidaten. Wählt er einen bzw. mehrere (symmetrische) Kandidaten als zutreffend aus, wird er durch einen geführten Parametrierungsschritt geleitet, durch den der er direkten Einfluss auf den nachfolgend automatisiert ausgeführten Montageprozess nehmen kann.

So kann er Kennwerte wie z. B. Anzugsmomente eines Schraubprozesses festlegen oder Anrückvektoren auswählen, ohne selbst Kenntnisse über die jeweiligen Koordinatenkonfigurationen der verwendeten Werkzeuge (Greifer, Schraubwerkzeug) bzw. der Anlage (Basiskoordinatensysteme) zu besitzen. Als Basis dient stets die betrachtete Verbindungsfläche zwischen Basis- und Anbauobjekt, deren Normale (z-Vektor) nach außen zeigt.

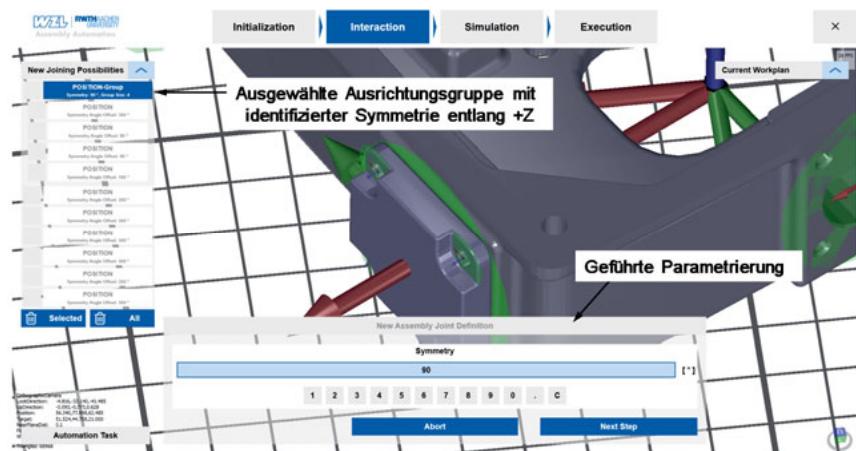
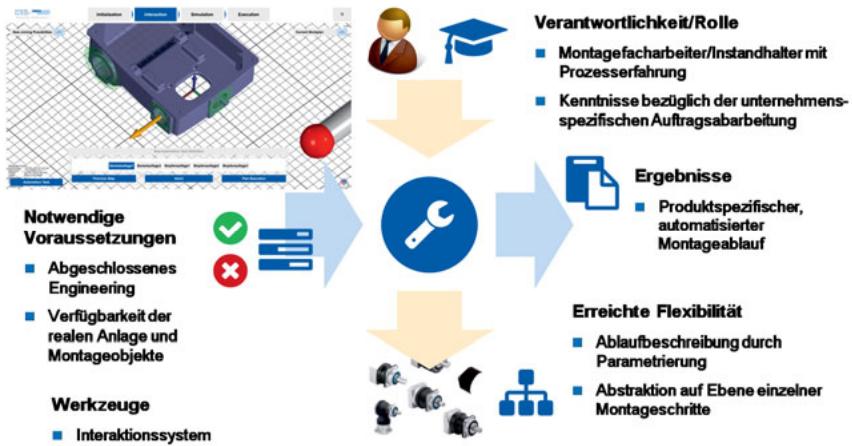


Abbildung 5: Darstellung der Parametrierung einer Montageverbindung.

Auf diese Weise interagiert der Bediener mit der Montageanlage und definiert eine Abfolge von Verbindungselementen, die die Grundstruktur des Montageablaufs beschreiben, sodass dieser zu jedem Zeitpunkt nachvollziehbar bleibt. Zur Effizienzsteigerung können Analogien auf Verbindungsebene detektiert werden, sodass gleichartige Prozesse nur einmalig demonstriert werden müssen und anschließend direkt eine Reihenfolge festgelegt werden kann.

Der beschriebene Vorgang sowie weitere Aufgaben in Zusammenhang mit der flexiblen Inbetriebnahme einer roboterbasierten Montageanlage wurden im Rahmen des Forschungsprojektes MoDemo in Form von Workflows gemäß Abbildung 6 beschrieben. Diese beschreiben jeweils notwendige Voraussetzungen zur Durchführung einer Inbetriebnahmeaufgabe sowie die resultierenden Ergebnisse bzw. Dokumente (horizontal). Zusätzlich umfasst das Schema (vertikal) die betroffene Personengruppe bzw. Rolle im Unternehmen im Bezug auf die notwendigen Vorkenntnisse, um einen Arbeitsschritt durchführen zu können und bewertet abschließend die durch die Maßnahme erreichte Flexibilität, welche die Zielgröße der Methodik darstellt.



*Abbildung 6: Workflow-Schema zur Charakterisierung von Inbetriebnahmaufgaben.*

Im Bezug auf die vorgestellte demonstrationsbasierte Ablaufdefinition bilden eine abgeschlossene Engineering-Phase, welche die benötigten Objektmodelle bereitstellt, sowie die Verfügbarkeit der betroffenen Montageanlage aufgrund des Online-Charakters der Methode die notwendigen Voraussetzungen, um das entwickelte Interaktionssystem als Werkzeug einsetzen zu können. Anwender des Werkzeugs sind sowohl Montagefacharbeiter sowie Instandhalter, sofern sie über Kenntnisse bezüglich der unternehmensinternen Arbeitsabläufe im Montageumfeld verfügen. So müssen sie beispielsweise einschätzen können, in welcher Form eine Montageaufgabe an die Materialbereitstellung angebunden ist, d. h. wie Objektquellen und -senken angeordnet und orientiert sind.

Der Mehrwert des Interaktionssystems ergibt sich aus der für den Montagemitarbeiter intuitiven Form der Ablaufbeschreibung. Er kann sein Domänenwissen bei der manuellen Montage anwenden und wird bei der anschließenden Definition von Prozessparametern weitgehend angeleitet. Da der Bediener den Ablauf abstrakt als Abfolge von Montageverbindungen betrachtet und keine Spezifikation einzelner betriebsmittelpezifischer Operationen wie z. B. das Planen einer Roboterbewegung notwendig ist, kann die Methode mit geringem Qualifizie-

rungsaufwand eingeführt werden. Auf diese Weise erhöht sich insbesondere die planerische Flexibilität bezüglich der Einsatzmöglichkeiten der Montageanlage.

## 1.4 Übertragung auf eine flexible Montagezelle

Das entwickelte Interaktionssystem wurde mithilfe einer roboterbasierten Montagezelle evaluiert (vgl. Abbildung 7). Die Zelle umfasst einen KUKA KR 16 Industrieroboter im Zentrum, welcher verschiedene Arbeitsbereiche in seinem Aktionsradius von ca. 1m zur Montage nutzt. Zur Vergrößerung der Flexibilität können verschiedene Werkzeuge aus einer Wechselstation durch den Roboter aufgenommen werden wie z. B. pneumatische Greifer oder ein geführtes Schraubwerkzeug mit Greifkinematik, das einzelne Schrauben aus einem Nest aufnimmt und zur Verbindungsstelle mitführt. Ein am Roboterflansch fest montiertes Vision-System kann zur relativen Lagekorrektur während der Prozessausführung genutzt werden.

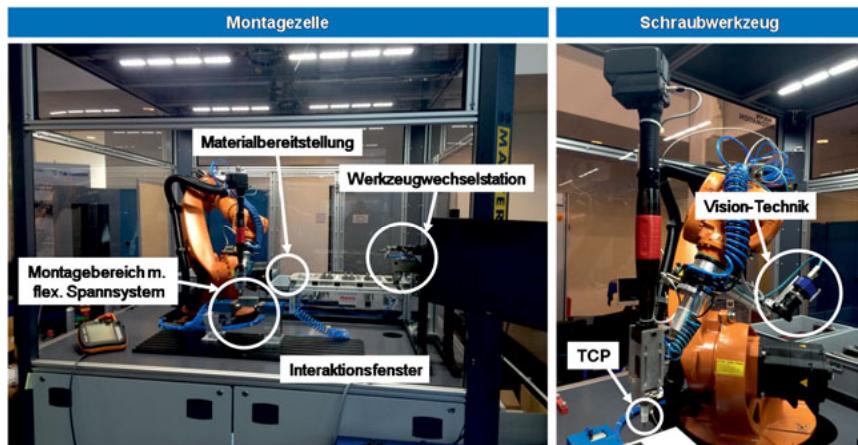


Abbildung 7: Aufbau des Interaktionsdemonstrators.

Über Kommissionierboxen werden Montageobjekte auf der Rückseite der Zelle eingebracht bzw. Baugruppen aus der Zelle entnommen. Im vorderen Anlagenteil befindet sich ein Spannsystem mit zwei Haltebacken, deren Halteflächenkontur aus einer Stöbelanordnung besteht, die durch Abformen mithilfe des Halteobjekts flexibel angepasst werden kann und so ein Fixieren durch Formschluss ermöglicht. Die Anwendung des Programmiersystems erfolgt über ein Interaktionsfenster, das den Arbeitsraum durch ein Sicherheitslichtgitter während des Roboterbetriebs nach außen hin abtrennt.

## 1.5 Integration eines Dienstes zur kollisionsfreien Bewegungsplanung

Nach Abschluss der Montagedemonstration liegt der Arbeitsplan in Form einer Abfolge von Montageverbindungen vor, denen jeweils ein Arbeitsschritt zugeordnet wird. Um aus dieser Planungsbasis ausführbare Steuerungsprogramme zu generieren, ist ein weiterer, betriebsmittelspezifischer Planungsschritt notwendig. Das Interaktionssystem ist hierzu an eine Dienst-

Infrastruktur angebunden, an die es Planungsaufgaben bestehend aus dem erstellten Arbeitsplan sowie dem anlagenspezifischen Szenenkontext übermitteln kann.

Ein Planungsdienst leistet dann – ohne weiteres Eingreifen des Bedieners – die Transformation eines abstrakten Arbeitsschrittes, welcher Prozessparameter sowie die Engineering-Daten der betroffenen Objekte enthält, zu einem konsistenten Steuerungsablauf. Dazu stellt der Dienst eine Schnittstelle zu einem virtuellen Inbetriebnahmesystem bereit, in dem er die aktuelle Montagesituation anhand des Szenenkontextes nachbildet und anschließend die automatische Suche nach einer kontinuierlichen, kollisionsfreien Bewegungsfolge des manipulierenden Roboters koordiniert (vgl. Abbildung 8).

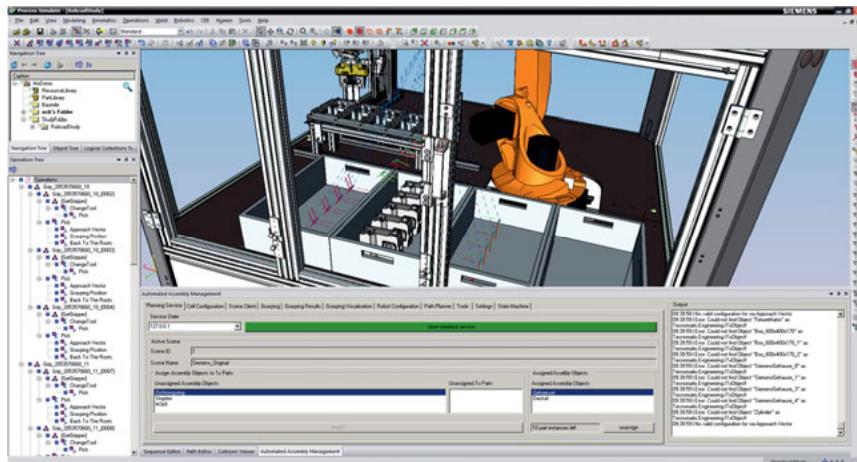


Abbildung 8: Bereitstellung eines virtuellen Inbetriebnahmesystems als Planungsdienst.

Die Koordination erfolgt auf Basis einer Abfolge bekannter, vordefinierter Anlagengrundfunktionen, die z. B. das Aufnehmen eines allgemeinen Objektes aus einer definierten Position oder das Einschrauben einer aufgenommenen Schraube mit dem robotergeführten Schraubwerkzeug beschreiben. So ermittelt der Dienst die Anfangs- und Endkonfiguration eines Arbeitsschrittes und stößt die Suche nach einem verbindenden Ablauf an. Dabei besteht die Hauptaufgabe in der Suche nach einer kollisionsfreien Bewegungsbahn des Roboters, der als aktives Zellelement an allen Arbeitsschritten beteiligt ist.

Die Bewegungssuche besteht aus einem zweistufigen Ansatz. Zunächst permutiert das System alle notwendigen Stützstellen (Roboterkonfigurationen) eines Ablaufs, wie z. B. zum Zeitpunkt eines Greifprozesses, in Form eines Samplings, wobei jedes Sample eine vollständige Menge an Stützpunktkonfigurationen beschreibt. Der hieraus resultierende, grobe Ablauf kann durch das Simulationssystem evaluiert werden und liefert eine erste Auskunft zu den Bewertungskriterien „Zykluszeit“ und „Roboterkonfigurationswechsel“. Während die Zykluszeit so gering wie möglich sein muss, sollten Konfigurationswechsel, die zu großen Bewegungen einzelner Achsen des Roboters führen, vermieden werden.

Im zweiten Schritt werden die aufgestellten Samples entsprechend des Bewertungsschemas sortiert und die besten Kandidaten zur Feimplanung herangezogen. Während bei der bisherigen Grobplanung nur die Stützkonfigurationen auf Kollisionen überprüft wurden, wird nun die kontinuierliche Bahn berücksichtigt. Treten nun ungewollte Kollisionen, d. h. außerhalb eines Fügevorgangs, auf, so müssen Strategien zur Kollisionsvermeidung gefunden werden. Zu diesem Zweck wurde eine Anbindung der Bewegungsplanungsbibliothek open motion

planning library (OMPL) [22], welche die Kollisionsvermeidung durch Hinzufügen geeigneter Stützpunkte leistet, an das verwendete Simulationssystem Tecnomatix Process Simulate [23], das die Möglichkeit bietet, das Auftreten von Kollisionen zu detektieren, geschaffen. Mithilfe der Kombination beider Systeme wird ein Planungskandidat so lange um neue Stützpunkte erweitert, bis keine Kollision mehr im Ablauf auftritt.

Im Anschluss an die Planung wird das Ergebnis an die HMI-Anwendung der Montagezelle zurückgegeben. Der Bediener hat dann die Möglichkeit, den Ablauf als Simulation vorab noch einmal manuell zu prüfen und das Programm anschließend für die Ausführung freizugeben.

## 1.6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine demonstrationsbasierte Möglichkeit zur Definition eines Montageablaufs vorgestellt, welche die Grundlage für ein werkstattorientiertes Programmiersystem für flexibel automatisierbare Montagesysteme bildet. Der Ansatz beruht auf der Wiederverwendung von Engineering-Informationen zu den verwendeten Montageobjekten sowie der jeweiligen Montageanlage, welche in Form eines simultan evaluierten digitalen Zwillingss die Spezifikation von Montageverbindungen im Genauigkeitsbereich der CAD-Modelle erlaubt.

Anschließend wurde die Umsetzung eines Planungsdienstes für kollisionsfreie Bewegungen eines Montageroboters beschrieben, den der Bediener zur Realisierung eines ausführbaren Programmablaufs nutzt. Zur Freigabe eines autonom geplanten Ablaufs kann der Bediener auf eine Prozesssimulation zugreifen und die Planung damit virtuell absichern.

Zukünftig liegt ein Hauptaugenmerk auf der Realisierung einer kamerabasierten Objektlageerkennung, sodass Ungenauigkeiten von CAD-Modellen bzw. in der relativen Lagebeschreibung verschiedener Einzelobjekte während des Prozesses erkannt und ausgeglichen werden können.

## 1.7 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18446 BG der Forschungsvereinigung Informatik wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## 1.8 Literatur

- [1] Kluge, S. u. Westkämper, E.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Zugl.: Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 2011. IPA-IAO-Forschung und Praxis, Bd. 510. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart 2011
- [2] Prasch, M. G.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2010. Forschungsberichte IWB, Bd. 243. München: Utz 2010
- [3] Backhaus, J. C. S.: Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. Forschungsberichte IWB, Bd. 319. München: Utz, Herbert 2016
- [4] Adenauer, S.: Handlungsfeld „Wissen sichern und weitergeben“. In: Leistungsfähigkeit im Betrieb. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015, S. 435–458
- [5] Ehrmann, M.: Beitrag zur Effizienzsteigerung bei der Programmierung flexibler, roboterbasierter Montagezellen. Konzeption und Realisierung eines nutzergerechten Programmiersystems. 2015

- tems. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2007. Fortschritt-Berichte pak Robotik, Bd. 15. Kaiserslautern: Techn. Univ 2007
- [6] Weck, M. u. Brecher, C.: Robotersteuerungen. In: Weck, M. (Hrsg.): Werkzeugmaschinen 4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2006, S. 353–418
- [7] Brecher, C. (Hrsg.): Rent-A-Robot. Abschlussbericht "Rent-A-Robot" des BMBF-Verbundprojektes. Aachen, Hannover: Apprimus-Verl.; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek 2009
- [8] Anderl, R., Eigner, M., Senderl, U. u. Stark, R.: Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung. acatech DISKUSSION, April 2012. Berlin, Heidelberg: Springer 2012
- [9] Wünsch, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2007. Forschungsberichte / IWB, Bd. 215. München: Utz 2008
- [10] Karl-Josef, A., Wilhelm, A., Eberhard, B., Christian, B., Irina, B., Juejing, F., Christian, F., Björn, H., Christian, H., Anke, H., Eduard, J., Wolfram, L., Rüdiger, M., Andreas, M., Simon, N., Ralf, R., Martina, S., Wolfgang, W. u. Uwe, Z.: Anwendungen für Fertigung, Betrieb, Service und Wartung. In: Schreiber, W. u. Zimmermann, P. (Hrsg.): Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 213–274
- [11] Brecher, C., Breitbach, T., Ecker, C. u. Lohse, W.: Environment sensing for the creation of work cell models. Production Engineering 7 (2013) 2-3, S. 329–338
- [12] Thomas, U.: Automatisierte Programmierung von Robotern für Montageaufgaben. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2008. Fortschritte in der Robotik, Bd. 13. Aachen: Shaker 2008
- [13] Bischoff, R., Kurth, J., Schreiber, G., Koeppel, R., Albu-Schaeffer, A., Beyer, A., Eiberger, O., Haddadin, S., Stemmer, A., Grunwald, G. u. Hirzinger, G.: The KUKA-DLR Lightweight Robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing. ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics). 2010, S. 1–8
- [14] Göbel, M.: Verfahren zur intuitiven Programmierung von Industrierobotern durch Demonstration. Zugl.: Aachen, Rhein.-Westfäl. Techn. Hochsch., Diss., 2012. Edition Wissenschaft Apprimus, Bd. 2012,12. Aachen: Apprimus-Verl. 2012
- [15] Lebedynska, Y.: Entwicklung eines Informationssystems mit Reifegradmanagement für automatisierte Schraubprozesse. Zugl.: Cottbus, Techn. Univ., Diss., 2011. Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik BTU Cottbus. Aachen: Shaker-Verl. 2011
- [16] Billard, A., Calinon, S., Dillmann, R. u. Schaal, S.: Robot Programming by Demonstration. In: Siciliano, B. u. Khatib, O. (Hrsg.): Springer Handbook of Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2008, S. 1371–1394
- [17] Dillmann, R., Rogalla, O., Ehrenmann, M., Zöllner, R. u. Bordegoni, M.: Learning Robot Behaviour and Skills Based on Human Demonstration and Advice: The Machine Learning Paradigm. 1999
- [18] Dillmann, R.: Teaching and learning of robot tasks via observation of human performance. Robotics and Autonomous Systems 47 (2004) 2-3, S. 109–116
- [19] Brecher, C., Storms, S., Ecker, C. u. Lohse, W.: Verwaltung erweiterter Montageinformationen im Produktlebenszyklus. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb : ZWF 109 (2014) 11, S. 801–804
- [20] Brecher, C., Ecker, C., Storms, S. u. Lohse, W.: Unterstützung für die Inbetriebnahme von Montagerobotern. Adaption des Step-NC-Modells für Montageaufgaben zur Integration der Werkzeugkette. wt Werkstatttechnik online 104 (2014) 9, S. 522–528
- [21] Brecher, C., Ecker, C. u. Herfs, W.: Montageautomatisierung flexibler gestalten: Sensordatenfusion für schnelles Einlernen neuer Abläufe. Atp-Edition : automatisierungstechnische Praxis 57 (2015) 12, S. 48–56
- [22] Sucan, I. A., Moll, M. u. Kavraki, L. E.: The Open Motion Planning Library. IEEE Robotics & Automation Magazine 19 (2012) 4, S. 72–82
- [23] Siemens AG: Process Simulate for Robotics and Automation. [https://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/robotics/process-simulate.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/robotics/process-simulate.shtml), abgerufen am: 29.11.2016

## 2 Von der Vision der cloudbasierten Steuerung zur Realität auf dem Hallenboden – Anforderungen und Machbarkeit in den Unternehmen

*C. Horn, H. Lüer, M. Chemnitz, J. Krüger*

### 2.1 Einleitung

Industrie 4.0 (I4.0) setzt einen hohen Grad der Kommunikationsfähigkeit und Vernetzung der Produktionsmittel, wie Maschinen, Roboter, Zellensteuerungen sowie übergeordneter Leitsysteme voraus. Eine Fähigkeit, die ein Großteil der bis heute eingesetzten Maschinen- und Anlagentechnik nicht oder nur ansatzweise besitzen. Mit Rücksicht auf die hohen Investitionen in den Bestand wird dieser in der Regel nur langfristig und sukzessive abgelöst. Der Zugang zu entstehenden technologischen Innovationen in Industrie 4.0 bleibt dadurch eingeschränkt und die und Potentiale und Mehrwerte dem Unternehmen verschlossen. Für viele Unternehmen, insbesondere KMU, stellt sich so die Frage: Wie kann der vorhandene Maschinen- und Anlagenbestand weiterhin produktiv genutzt und effizient auf dem Weg zu Industrie 4.0 eingebunden werden?

Derzeitig vorangetriebene Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Thema Industrie 4.0 kombinieren hochmoderne Technologien für die Vernetzung von Produktionsmitteln. Sie unterstützen die Verwaltung von Produkt- und Prozessdaten sowie die Kommunikation und Interaktion der Maschinen untereinander und mit dem Menschen. Für die Nutzung der neuartigen Strukturen und Dienste der Industrie 4.0 sind allerdings I4.0-fähige Maschinen und Netzwerkinfrastrukturen notwendig. Diese stehen erst in aktuellen Komponenten- und Anlagengenerationen zur Verfügung. Die neuen Komponenten und Anlagen sind beim überwiegenden Teil der kleinen und mittleren deutschen Unternehmen nicht vorhanden und könnten nur durch hohe Investitionen kurz- bis mittelfristig angeschafft werden. Üblicherweise ist jedoch in Maschinen, Anlagen und Systemkomponenten viel Kapital gebunden, weshalb von einer langjährigen Nutzung ausgegangen wird. So produzieren klein- und mittlere Unternehmen in der Fertigungstechnik zum überwiegenden Teil mit Maschinen aus den vorangegangenen Generationen, die bis in die 1990er Jahre zurückreichen. Daraus folgen für die momentane Lage zwei mögliche Szenarien der aktuellen I4.0-Themen: (1) beim deutschen Mittelstand werden in den nächsten Jahren hohe Investitionen in einen umfassend neuen Maschinenpark notwendig, um diese Technologien nutzbar zu machen, oder (2) I4.0-Technologien werden aus Kostengründen in den nächsten 10-15 Jahren nur sehr begrenzt Einzug in kleine und mittlere deutsche Unternehmen halten.

### 2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Maschinen und Anlagen besitzen heute unterschiedliche Kommunikationsschnittstellen, die in „externe“ und „interne“ Schnittstellen unterteilt werden können [1]. Interne Schnittstellen finden Anwendung, um die Maschine und Anlage um zusätzliche Prozess- und Steuerungsfunktionen zu erweitern. Externe Schnittstellen werden genutzt, um externe Systeme, wie zum Beispiel Bedienoberflächen (HMI) oder Systeme zur Maschinendatenerfassung (MDE) und Produktionssteuerung (MES, ERP), anzubinden. Im weiteren Verlauf liegt der Fokus auf den externen Schnittstellen von Maschinen.

Ein Großteil der in der mittelständischen Produktion verwendeten älteren Maschinengenerationen ist dabei nicht vernetzt und besitzt auch keine modernen Kommunikationsschnittstellen. Diese sind zwar schon längere Zeit beim Hersteller verfügbar, die Maschinen wurden aber durch den Endanwender aus Kostengründen nur selten damit nachgerüstet. Neue Maschinen sind dem gegenüber in der Regel über IP-basierte Schnittstellen ansprechbar. Die aktuellen Preise dieser früheren Nachrüstkomponenten wie Ethernet-Einschubkarten mit entsprechendem Software-Update sind sogar gestiegen, so dass sie teilweise den Restwert der Maschine selbst übersteigen. Auf Bearbeitungsmaschinen ist seit den 90er Jahren häufig ein Zugriff über ein DNC-Protokoll (z.B. LSV 1/2) mittels serieller Schnittstelle (V.24) oder proprietärer Ethernet-Kommunikation möglich. Je nach Ausprägung kann die Bedienung dieser Schnittstelle äußerst umständlich ausfallen, da Sende- und Empfangsbefehle in der richtigen Reihenfolge am richtigen Gerät ausgeführt werden müssen.

Industrie 4.0 für die Produktionstechnik zielt auf einen hohen Grad der Vernetzung aller Produktionsmittel, wie Maschinen, Roboter, Zellensteuerungen und übergeordnete Leitsysteme (MES, ERP) zu Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS)[2]. Die Virtualisierung der Steuerungstechnik in eine zentrale IT-Infrastruktur ermöglicht darüber hinaus zentral verwaltete Daten und weiterführende Dienste (Mehrwertdienste). Die Dienste implementieren sowohl Analyse- und Optimierungsfunktionen als auch vereinfachte Bedien- und Programmiersysteme maschinenübergreifend. Aktuelle Forschungsprojekte zum Themenschwerpunkt Industrie 4.0, die u.a. Ziele der Vernetzung oder der neuartigen Bedienung von Maschinen zum Inhalt haben, sollen im Folgenden beispielhaft genannt und nach Inhalten klassifiziert werden:

### **Plattform und Mehrwertdienste**

Industrielle cloudbasierte Steuerungsplattform (pICASSO) [3][4][5]: In pICASSO wurde eine echtzeitfähige cloudbasierte Ausführungsumgebung für virtualisierte Maschinensteuerungen geschaffen, um so eine vollständige Entkoppelung der Steuerung von der Maschine zu erzielen.

### **Mehrwertdienste und Methodik**

Modellgetriebene Softwareentwicklung für die Softwarefabrik (Bizware): Im FuE-Projekt wurde eine “Modell- und Softwarefabrik“ konzipiert, mit deren Hilfe Softwareanwendungen automatisiert für den Endanwender erzeugt werden können. Als Grundlage dienen dazu insbesondere modellgestützte Softwareentwicklungskonzepte und -prozesse. Schwerpunkt dabei ist u.a. die Kopplung des Softwareengineering mit einer domänenübergreifenden Entwicklungs- und Integrationsmethodik.

### **Konnektion**

Unidirektionale Übertragung von Zustandsdaten (CloudPlug)[6]: Im Projekt CloudPlug wurde eine Lösung zur einfachen Anbindung von Anlagen mit OPC UA-, Profibus- und CAN-Schnittstellen zur zentralen Datenerfassung in Cloud-Ressourcen erforscht. Der Fokus des Projektes lag auf der unidirektionalen Übertragung von Zustandsdaten in zentrale und hochskalierbare Datenspeicher.

Open Core Engineering (OCE)[7]: Im Projekt OCE wurde eine Technologie entwickelt, mit deren Unter-stützung Steuerungen und Antriebe bei neuen Maschinen einfach und effizient in moderne IT-Architekturen integriert werden können. Beispielsweise ermöglicht OCE, dass auf einer Maschinensteuerung neben den klassischen SPS-Programmiersprachen, moderne Hochsprachen wie C++, Java oder LUA gleichberechtigt verwendet werden.

## Sonstige

Darüber hinaus sind Themenstellungen zur iL4.0-Maschinensteuerung und Integration in folgenden Projekten wahrgenommen worden: Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik (Metamo-FAB)[8]: Ziel des Projektes ist es, bestehenden Unternehmen die Metamorphose zu intelligenten und vernetzten Fabriken hin zu ermöglichen. Es werden jedoch keine bestehenden Maschinen im Feld betrachtet, sondern neuartige virtuelle oder reale Labordeemonstratoren entwickelt. Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration durch Cyber-Physische Zusatzmodule (BaZMod)[9]: Die Kommunikation zwischen Maschine, Steuerung und Produktionsumgebung wird durch die Entwicklung von geeigneten, herstellerunabhängigen Cyber-Physischen Zusatzmodulen erweitert. Hier werden lediglich Einzelkomponenten der Maschine (Spindel) betrachtet und mit zusätzlichen Messmitteln, Werkzeugen und Softwaremodulen erweitert. Vernetzung in der Produktion (CoCoS)[10]: Eine intelligente Informations- und Kommunikationsstruktur soll entwickelt werden, um unterschiedlichste Komponenten einer Produktionslinie zu erkennen und zu vernetzen. Die Verwendung gängiger Netzwerke und Kommunikationsmittel wie WLAN, Industrial Ethernet oder RFID verhindert die Integration von alten Maschinen. Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS)[11]: Um den steigenden Forderungen nach dynamischen Produktions- und Logistikprozessen gerecht zu werden, werden in diesem Projekt Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung und zum Betrieb von Cyber-Physischen Produktionssystemen erarbeitet. Hier stehen die generelle Vernetzung von Antrieben und Sensoren im Vordergrund und nicht die konkrete Einbeziehung von KMU und deren vorhandene Maschinenparks. Intelligente Vernetzung (Its OWL Querschnittsprojekt)[12]: Bei Anschluss neuer Maschinen muss i.d.R. die Anlage mit hohem Aufwand neu eingestellt werden. Ziel dieses Projekts ist die Erarbeitung einer intelligenten Vernetzung durch Plug-and-Play-Funktionalitäten. Die angeschlossene Maschine muss dazu ihren eigenen Zustand und ihre Umgebung eigenständig analysieren. Intelligente Inbetriebnahme von Maschinen (SecurePLUGandWORK[13]): In diesem Projekt werden Mechanismen der Selbstkonfiguration über die verschiedenen Ebenen der klassischen Automatisierungstechnik entwickelt, d.h. sowohl für Komponenten und Einzelmaschinen als auch für Gesamtanlagen und überlagerte, produktionsnahe IT-Systeme. Informationstechnische Schnittstellen wie Kommunikationsprotokolle und Konfigurationsroutinen werden mit entsprechenden Anforderungen an die Sicherheit, Verfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit konzipiert. UCP450 (SmartFactory, 2009)[14]: In diesem Projekt wurde ein universelles Bediengerät (UCP450) entwickelt, das sich drahtlos mit in der Produktionsumgebung installierten Anlagengateways verbindet und eine umfassende Kommunikation ermöglicht. Das UCP450 wird seit 2010 kommerziell vertrieben, es hat sich aber durch fehlende Anbindung an übergeordnete Datendienste nicht durchgesetzt. Performancemaximierung durch Engineering Apps (eApps4Production)[15]: Die Idee dieses Projekts ist es, die Verfügbarkeit von Informationen aus der Produktion, z.B. Zustands- und Prozessdaten, durch die Nutzung von eApps zu erhöhen. Grundlage ist eine Plattform bzw. ein Framework zur intuitiven und flexiblen Konfiguration und Nutzung der eApps, die es produktionsnahen Ingenieuren und Technikern ermöglicht, diese Apps selbst zu erstellen. Dieses Konzept erfordert die tatsächliche Verfügbarkeit der Informationen, die bei älteren Maschinen bisher aber nicht gegeben ist.

Auch international betrachtet, befindet sich der Aufbau von Industrie 4.0-Plattformen noch in einer frühen Phase[17]. In ersten Veröffentlichungen werden hauptsächlich die Systemarchitektur[18], das Servicemanagement [19] sowie die Virtualisierung von Produktionsressourcen [20] und serviceorientierter Technologie [21] beschrieben.

Damit die Interoperabilität unterschiedlicher Maschinen, die die Industrie 4.0-Plattformen nutzen, gewährleistet ist, wurde in der Entwicklung von Industrie 4.0 nach einer Standardisierung der Schnittstellen verlangt. Allerdings gilt nach Alt und Schreiter [22] „das Spannungs-

feld zwischen funktionaler Standardisierung und wirtschaftlicher Flexibilität als noch nicht ausreichend gelöst“.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Projekten liegt der Fokus von des Projektes RetroNet [23] in der Datenaggregation aus bestehenden Steuerungen auf der Basis einer physischen Konnektoren-Komponente, die in eine anwenderzentrierte Integrationsmethodik eingebettet wird. Diese ist insbesondere darauf ausgerichtet, alte Maschinen einzubinden sowie durch eine zentrale Plattformarchitektur konkrete Mehrwertdienste zur Verfügung zu stellen. Die Methodik wie die Systemarchitektur sind insbesondere auf das heterogene, historisch gewachsene Anwendungsumfeld bei KMU ausgerichtet und sollen eine bedarfsgerechte, skalierbare, kostengünstige und ressourcenschonende Maschinen- und Anlagenintegration sicherstellen.

## 2.3 Anforderungen der Unternehmen

So wie die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Flexibilität der Unternehmen kontinuierlich wachsen, wachsen die Bedarfe und Anforderungen an die Produktionsmittel und ihre Organisation. Die Entwicklung geht einher mit einer stetigen Zunahme an Komplexität, Komplexität der Produkte, der Prozesse, der Organisation u.a.m. Hierbei ist die Bandbreite der zu berücksichtigenden Anforderungen an eine darin zu implementierende Technologie des Retrofittings so umfassend wie die unterschiedlichen Bedarfe und Handlungsoptionen in den einzelnen Unternehmen. Im Spannungsfeld und in der Wechselwirkung des operativen Tagesgeschäftes und der strategischen Unternehmensentwicklung können jedoch zentrale Anforderungskategorien identifiziert werden. Maßgeblich für die Postulierung des Anforderungsspektrums ist die Antwort auf die Fragestellung:

*Was soll mit dem Retrofitting im konkreten Anwendungsfall erreicht werden?*

### Wirtschaftliche Anforderungen

Maßgeblich für die Anwendung und Akzeptanz der Retrofittingtechnologie ist die wirtschaftliche Wirkung im einzelnen Unternehmen, d.h. es müssen in Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen quantifizierbare Mehrwerte geschaffen werden. In Abwägung von Chancen und Risiken muss es dem Unternehmen möglich sein, Investitionskosten präzise zu steuern um u.a. hohe wirtschaftliche Einstiegsbarrieren zu vermeiden. Die Erschließung von Effizienzgewinnen durch die Integration von älteren Maschinen muss darüber hinaus darauf ausgerichtet sein, Investitionssicherheit und Zukunftsfähigkeit zu gewährleisten. Folgeaufwendungen (kurz-, mittel-, langfristig) sind dabei in die Betrachtung, insbesondere in die darauf aufbauenden Investitionsentscheidungen einzubeziehen.

### Anforderungen an die Methodik

Das Erreichen einer neuen Qualität auf dem Weg zur digitalen Produktion setzt voraus, dass die Retrofittingtechnologie in ein methodisches Konzept eingebunden wird. Das Konzept muss alle relevanten Anforderungen aus der Organisation des Unternehmens aufnehmen sowie eine praxisbezogene, am konkreten Bedarf orientierte Bewertungs- und Integrationsverfahren bereitstellen. Die Verfahren müssen darauf ausgerichtet sein, mit einfachen Schritten erste Mehrwerte zu generieren auf deren Basis die Komplexität erhöht werden kann. Die Erfahrungen aus den Phasen der Bewertung und Integration sollten im Weiteren Basis für die darauf aufsetzende Organisations- und Entwicklungsmethodik sein, die den Wissens- und Kompetenzaufbau zur digitalen Produktion/I4.0 in der Organisation sicherstellt. Wesentliche Anforderungen sind u.a.:

- Hohe Praktikabilität und Anwendernutzen
- Abbildungs- und Adoptionsfähigkeit eingeführter/gelebter Strukturen und Prozesse

- Skalierbarkeit des methodischen Betrachtungsrahmens vom der operativen bis zur strategischen Unternehmenssicht, vom Einfachen bis zum Komplexen

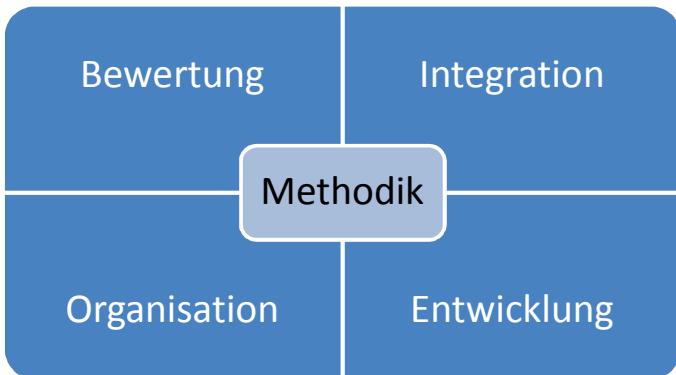


Abbildung 1: Ebenen der Methodik

#### *Bewertungsmethodik*

- Herstellung der Bewertungsfähigkeit (Mehrwert/Nutzen, Voraussetzungen/Rahmenbedingungen, Potentiale/Risiken)
- Identifikation, Abschätzung Abgrenzung von Mehrwerten
- Abschätzung Machbarkeit und Handlungsalternativen
- Sicherstellung der Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit (unterschiedliche Größen, Mengen, operative/strategische Entscheidungen)

#### *Integrationsmethodik*

- effiziente Methodik zur Analyse bestehender Anlagen und nutzbarer Daten
- klar strukturierte Handlungskonzepte/Vorgehensmodelle zur Komponentenintegration
- Unterstützung von iterativen Integrationsprozessen
- Bereitstellung von Referenzbibliotheken, Vorlagen, Templates, Musterlösungen

#### *Organisations- und Entwicklungsmethodik*

- Unterstützung beim beschleunigten Beschreiten des Weges Richtung digitale Produktion/I4.0
- Sicherung des Wissens und der Kompetenz in der Organisation
- Sicherstellung eines vereinfachten Zugangs und Verständnisses zur Technologie, Komponenten-integration und Mehrwertdienstkonzepte
- Unterstützung bei der Vereinfachung komplexer Reorganisations-/Änderungsprozesse
- Bereitstellung von Methoden und Konzepten zur bedarfsgerechten Wissensbereitstellung

### Anforderungen an das technische Konzept

Die Herausforderung in der Entwicklung der Retrofittingtechnologie besteht darin, eine anspruchsvolle und komplexe Systemarchitektur so zu gestalten, dass ein einfacher, möglichst „barrierefreier“ Zugang zu ersten I4.0-Konzepten unterstützt wird. Neben den klassischen Anforderungen an das Hard-/Softwarekonzept wie Sicherheit, Stabilität, Verfügbarkeit u.a.m. müssen insbesondere Aspekte Berücksichtigung finden, die über den vereinfachten Zugang eine Entwicklung bis zu einem komplexen Anwendungsspektrum zulassen und unterstützen, wie z.B.:

- Die Sicherstellung der Skalierbarkeit für die zielgerichtete Steuerung der Integrations- und Ausbaustufen
- Sicherstellung einer Durchgängigkeit in der Produktionsautomatisierung in einem historisch und heterogen gewachsenen Anwendungsumfeld
- Sicherstellung einer umfassenden Integrationsfähigkeit in bestehende Infrastrukturen, Netzwerke durch physische und logische Konnektion
- Sicherstellung der Interoperabilität und Kompatibilität mit vorhandenen Systemen und Anlagen
- Beherrschung eines breiten Spektrums historischer Datenaustausch-/Kommunikationskonzepte (SPS/ RES2323, DNC u.a.m.)
- Unterstützung vorhandener und potentieller, richtungsweisender Standards (OPC-UA, ...)
- Sicherstellung der perspektivischen Erweiterbarkeit im Sinne der Entwicklung zu integralen I4.0-Lösungen
- Bereitstellung von anwendungs- und rollenspezifischen Instanzen u.a. für die Management- und Integrationsunterstützung
- Bereitstellung von Entwicklungs-, Anpassungs- und Redaktionsinstanzen zur effizienten und einfach beherrschbaren Systemadministration
- Bereitstellung von formalisierten und automatisierbaren Systemprozessen

Im Kontext der postulierten Zielstellungen wird mit der Forschung im Projekt RetroNet die These verfolgt, dass durch die bedarfsgerechte Bereitstellung von Retrofittingtechnologie eine Beschleunigung im Wandlungsprozess zu I4.0 erreicht werden kann. Insbesondere für KMU soll dadurch der Zugang zu I4.0-Technologie erleichtert sowie der Wissens- und Kompetenzaufbau im Unternehmen unterstützt werden. Das dazu notwendige Erreichen von konkreten, auf den jeweiligen Handlungsbedarf des einzelnen Unternehmens ausgerichteten Zielstellungen setzt hier eine methodisch konsolidierte Ableitung und Abgrenzung eines klar definierten Anforderungsrahmens voraus.

## 2.4 Ansatz im Forschungsvorhaben und Anwendungsszenarien

Für eine praxisnahe Realisierung werden in mehreren Anwenderszenarien die möglichen heterogenen Ausprägungsstufen der RetroNet-Technologie in Unternehmen verschiedenster Größe untersucht. Das Spektrum der Szenarien reicht dabei von einer ersten, einfachen Maschinenintegration in einem Kleinunternehmen bis zum methodisch begleiteten Integrationsprozess von Fertigungslinien der Serienproduktion. Für die Datenerfassung werden Konnektorenkomponenten entwickelt, die die Maschinen-, Anlagen- und Produktionsdaten an

eine zentrale Plattforminstanz übermitteln. Diese wiederum stellt eine Basisinfrastruktur für die Umsetzung von datenbasierten Mehrwertdiensten zur Verfügung. Parallel dazu werden Methoden und Konzepte entwickelt, die eine Mehrwert-, Investitions- und Risikoabschätzung für das Unternehmen im I4.0-Integrationsprozess zulassen.

Um sowohl die wirtschaftliche Belastung durch massive Investitionen zu umgehen, als auch schnellstmöglich die Anwendung entwickelter Technologien zu ermöglichen, zielt das Projekt RetroNet auf eine allgemeine Methodik zur Integration des historisch gewachsenen Maschinen- und Anlagenbestands in eine I4.0-orientierte Produktionsinfrastruktur. Hierfür werden Bewertungsschemata der vorhandenen Maschinen und Anlagen für die Kompatibilität mit einer I4.0-Infrastruktur entwickelt. Darauf aufbauende Lösungen zum Retrofitting dieser Maschinen und Anlagen für die Integration in eine unternehmensinterne I4.0-Plattform dienen dazu, Daten aus Maschinen und Produktion zu gewinnen, auswertende und bidirektionale interagierende Dienste bereitzustellen sowie einheitliche Benutzerschnittstellen verfügbar zu machen. Dieser Ansatz ermöglicht kleinen und mittleren Unternehmen unter Berücksichtigung des bereits bestehenden heterogenen Maschinenparks deutlich schneller den Zugang zu modernen Produktionsmitteln und -technologien. Die Interaktion zwischen Werker und Maschine wird erleichtert und erlaubt überhaupt erst den nahtlosen Wechsel zu einem intelligenten Maschinenverbund nach dem Vorbild einer SmartFactory in unterschiedlichen Skalierungsstufen.

Die Integration älterer Maschinen in eine gemeinsame Plattform und der Zugriff auf die im Prozess anfallenden Daten werden von allen beteiligten Unternehmen als notwendig angesehen. Erst so können die folgenden Ziele erreicht werden: Kontinuierliche Aufzeichnung prozess- und qualitätsrelevanter Daten zur nachfolgenden Optimierung, Überwachung von Ausfallzeiten, Maschinenauslastungen und Betriebszustand, Beobachtung, Analyse und Verringerung des Energieverbrauchs, Kontrolle des Ressourcenverbrauchs bis zur Zuordnung auf einzelne Bauteile sowie die Vereinheitlichung der Benutzerschnittstellen durch Verwendung generischer I4.0-Dienste (Apps). Das Zusammenführen der verfügbaren Daten schafft neue Optionen, auf Abhängigkeiten und Querbeziehungen, wie Qualität und Energieverbrauch, einzugehen. So wird der Grundstein für eine ganzheitliche Koordination und Optimierung der Anlagen gelegt.

#### **2.4.1 Anwendungsszenario 1: Condition Monitoring in einem Großunternehmen**

Die Serienfertigung beim Großunternehmen wird am Beispiel der Elektromotorproduktion betrachtet. Ein Teilbereich der Prozesskette ist bisher nur wenig mit Sensorik ausgestattet, sodass hier durch genauere Prozessanalysen ein Mehrwert in der Prozessstabilität erwartet wird. Für den Betreiber von Maschinen soll es möglich werden, bestehende Maschinen mit einem I4.0-Konnektor nachrüsten zu können, ohne in die bestehende Automatisierungslösung eingreifen zu müssen. Die exemplarische Verifikation soll an einer bestehenden Fertigungslinie für elektrische Motoren erfolgen.

#### **2.4.2 Anwendungsszenario 2: Einheitliche Benutzerschnittstellen in einem Mittelständischen Unternehmen**

In einem weiteren Szenario wird die Produktion bei einem Mittelständler betrachtet, der für die Automobilindustrie Karosserieteile produziert. Hierbei ist der Automatisierungsgrad sehr heterogen und eine Durchgängige Kopplung aller Prozesse an das ERP und MES gewünscht. Hierdurch sollen Verbesserungen im Prozessablauf und der Prozessverfolgung erreicht werden.

Im Anwendungsfall soll die vorhandene Technik der Robotik mit weiteren heterogenen Komponenten (z.B. MES) in einer zentralen Instanz gekoppelt werden. Die Daten sollen über eine Konfigurationsebene dem Anwender bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Die Konfigurationsfunktionalität soll dazu vereinheitlichte Anwendungsoberflächen generieren, über die der Nutzer alle prozessrelevanten Daten einsehen kann. Das Anwendungsszenario ist insbesondere auf die Integration älterer Maschinengenerationen ausgerichtet.

Der I4.0-Konnektor wird dazu in einem unternehmensinternen Szenario mit mehreren Komponenten aufgebaut und der Integrationsprozess in die vorhandene bzw. die zu erweiternde Infrastruktur in unterschiedlichen Ausprägungsstufen durchgeführt.

### 2.4.3 Anwendungsszenario 3: Kleinunternehmen

In ähnliche Richtung werden die Potentiale im dritten Szenario bei einem Kleinunternehmen gesehen. Hier finden die modernen Verfahren zur durchgängigen Produktion gerade erst Einzug. Ein Faktor dabei sind die großen Investitionen, die dafür notwendig sind. Die Potentiale einer durchgängigen IT-Lösung von der Anfrage über die Auftragsvorbereitung (incl. Angebotserstellung) und die Fertigung bis hin zur Nachverfolgung werden aber erkannt und gewünscht. Um die vorhandenen Maschinen nun in eine IT-Lösung integrieren zu können, ist die Erfassung der wesentlichen Parameter notwendig. In einem Initialprojekt sollen die Potentiale am Beispiel einer Drehmaschine betrachtet werden. An der Maschine können Drehzahl und Drehmoment analog abgenommen werden. In Kombination mit einem neu zu integrierenden Hydraulikdruckmesser am Spannfutter wird so eine Überwachung der Spannkraft realisiert. Die Werte werden im I4.0-Konnektor gesammelt und zur Auswertung bereitgestellt. Mit einer Anwendung im Unternehmensnetz wird die Spannkraft live dargestellt und unter Berücksichtigung des Werkstückes und der Maschinparameter die Spannkraftreserve im Prozess dargestellt. Weiterhin werden die Messwerte in der Cloud archiviert. Anhand der gespeicherten Daten sollen zum einen die berechneten Spannkraftwerte während der Entwicklungszeit evaluiert werden aber auch weiterführende Analysen ermöglicht werden. Ein Beispiel hierzu könnten die Bearbeitungszeiten sein, um so die Maschinenzeiten den Werkstücken zuordnen zu können. Dies sind aber nur erste Überlegungen, getreu dem Motto: „Sind die Daten erst einmal erhoben, entstehen sicher auch interessanten Auswertungen“.

Das Anwendungsszenario ist insbesondere auf die Integration älterer Maschinengenerationen ausgerichtet. Der I4.0-Konnektor wird dazu in einem unternehmensinternen Szenario mit mehreren Komponenten aufgebaut und der Integrationsprozess in die vorhandene bzw. die zu erweiternde Infrastruktur in unterschiedlichen Ausprägungsstufen durchgeführt.

## 2.5 Machbarkeit

Allen drei Szenarien gemeinsam ist die Notwendigkeit, Daten aus dem Feld erheben zu müssen. Gleichzeitig wird aber auch die Methodik eingesetzt, um zuerst eine Bewertung der Kosten für die Installation und Betrieb von Konnektor und Datenhaltung zu durchzuführen. Daran anschließend erfolgt die Integration der Datenerfassung ins Unternehmensnetz, auch hier unterstützt durch die Methodik. Die Erfassung der physikalischen Signale erfolgt im Rahmen des Projektes mit Hilfe eines Konnektors. Dieser bindet neben den notwendigen Sensoren auch bestehende Steuerungen ein und stellt die gesammelten Daten über eine OPC UA Schnittstelle bereit. Im Rahmen des Projektes können die Daten sowohl direkt weiterverwendet werden, wie zum Beispiel für die Live-Anzeige in der Spannkraft-App, als auch persistent gespeichert werden. Hierbei werden in den Szenarien verschiedene Lösungen in einem ersten Schritt erprobt und verglichen. Beispielsweise ist ein Baustein für die spätere methodische Bewertung der Vergleich einer cloudbasierten Speicherung mit dem Einsatz einer unterneh-

mensinternen Datenbanklösung, die ggf. schon vorhanden ist. In beiden Fällen ist eine entsprechende Kopplung des Konnektors notwendig. Hier werden die Unterschiede in den Szenarien erkennbar. Da der Konnektor als Lösung der Datenaggregation in ganz unterschiedlichen Unternehmen eingesetzt werden soll, ist die Anbindung und Einbindung in die bestehende Unternehmensinfrastruktur extrem heterogen. Anspruch an die Methodik ist hier, ein einheitliches Vorgehen zu etablieren, um die Bedarfe und Potentiale dem notwendigen Aufwand gegenüber zu stellen. Weiterhin sollen für gängige Anwendungsfälle Basis-Module (Software-Konnektoren) geschaffen werden, mit denen diese Einbindung modular erfolgen kann, ohne jedes Mal neu beginnen zu müssen.

Besondere Beachtung liegt in der Verwendung von Standard-Komponenten und -Schnittstellen, um nicht in geschlossene Systeme mit technisch-funktionaler Kundenbindung (Vendor Lock-In) zu geraten. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird hier der Austausch mit ähnlichen Projekten gesucht, um so eine breite Basis in den verwendeten Datenformaten und der Semantik in den Schnittstellen zu erreichen.

Durch die repräsentative Umsetzung und Anwendung der technologischen Komponenten und methodischen Konzepte werden die Anwendungspartner in die Lage versetzt, ihre Kompetenzen zu festigen und maßgeblich in dem Themenfeld von I4.0 zu erweitern. Dabei kann das erlangte Wissen für die Neugestaltung der Wertschöpfungsprozesse adaptiert und perspektivisch weiter ausgebaut werden. Die konsequente Weiterführung der Projektvision soll die Wettbewerbsposition der Unternehmen festigen. Als konkretes Ergebnis kann z.B. die Produktion effizienter gesteuert oder auf Basis der qualitativ neuen Informationsbasis neue Produkte entwickelt und produziert werden.

## 2.6 Literatur

- [1] M. Weck & Brecher, C. 2006: *Werkzeugmaschinen 4 - Automatisierung von Maschinen und Anlagen*. Heidelberg: Springer. ISBN 3540225072.
- [2] Jan Schlechtendahl, Matthias Keinert, Felix Kretschmer, Armin Lechler, Alexander Verl: *Making Existing Production Systems Industry 4.0-Ready*. Production Engineering Research and Development: Volume 9, Issue 1 (2015). Berlin Heidelberg: Springer, 2014, 143-148
- [3] Jan Schlechtendahl, Felix Kretschmer, Armin Lechler, Alexander Verl: *Communication Mechanisms for Cloud based Machine Controls*. Variety Management in Manufacturing Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Elsevier: Procedia CIRP, 2014, Volume 17, Pages 830834
- [4] A. Vick und J. Krüger: *Adaptive Nachgiebigkeitsregelung mit cloudbasierten Robotsteuerungen*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 693 Industrie 4.0 – Innovative Konzepte zur Automatisierung, 2015, ISBN 978-3-18-369302-3
- [5] <http://www.projekt-picasso.de/projekt>
- [6] A. Atmosadiro, M. Faller, A. Verl: *Durchgängige Datenintegration in die Cloud*. wt-online - Ausgabe 3-2014, S. 151-155
- [7] N. Sasse: „App-Technologie im Maschinen- und Anlagenbau“. Computer & Automation 09/2013. <http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/bedienen-beobachten/artikel/101013/>

- [8] MetamoFAB  
[http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF\\_ID=121&VP\\_ID=3586](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF_ID=121&VP_ID=3586)
- [9] BaZMod  
[http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF\\_ID=121&VP\\_ID=3562](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF_ID=121&VP_ID=3562)
- [10] <http://www.autonomik40.de/CoCoS.php>
- [11] CyProS  
[http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF\\_ID=121&VP\\_ID=3469](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF_ID=121&VP_ID=3469)
- [12] <http://www.its-owl.de/projekte/querschnittsprojekte>
- [13] SecurePLUGandWORK  
[http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF\\_ID=121&VP\\_ID=3449](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF_ID=121&VP_ID=3449)
- [14] [http://smartfactory.dfki.uni-kl.de/sites/default/files/documents/projects/flyer\\_unibeg\\_de.pdf](http://smartfactory.dfki.uni-kl.de/sites/default/files/documents/projects/flyer_unibeg_de.pdf)
- [15] eApps4Production  
[http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF\\_ID=121&VP\\_ID=3472](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF_ID=121&VP_ID=3472)
- [16] Daniel Stock , Matthias Stöhr , Ursula Rauschecker , Thomas Bauernhansl: *Cloud-based Platform to Facilitate Access to Manufacturing IT*. Stuttgart March 25 - 28 2014. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014 (The 8th International Conference on Digital Enterprise Technology)
- [17] X. Xu: *From cloud computing to cloud manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.28, No.1, pp.75-86, 2012.
- [18] X. Vincent Wang, X. W. Xu: *An interoperable solution for Cloud manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.29, No.4, pp.232-247, 2013.
- [19] W. He, L. Xu: *A state-of-the-art survey of cloud manufacturing*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, pp.1-12, 2014.
- [20] N. Liu, X. Li: *A resource virtualization mechanism for cloud manufacturing systems*. Enterprise Interoperability, Springer, 2012.
- [21] O. F. Valilai, M. Houshmand: *A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing system using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.29, No.1, pp.110-127, 2013.
- [22] Rainer Alt, Jan Schreiter: *Informationstechnologische Innovation zur marketing- und logistikorientierten Integration*. W. Stölzle, T. C. Lieb (Hrsg.) (2012) Business Innovation in der Logistik: Chancen und Herausforderungen für Praxis, Springer Fachmedien Wiesbaden 2012, S. 182.
- [23] RetroNet  
<http://www.retronet.info/>
- [24] C. Götz: „MQTT: Protokoll für das Internet der Dinge.“ Heise developer, 04/2014.  
<http://www.heise.de/developer/artikel/MQTT-Protokoll-fuer-das-Internet-der-Dinge-2168152.html>

## 3 Industrielles LTE

*P. Neher, A. Lechler, A. Verl*

### 3.1 Einleitung

#### 3.1.1 Fabrik der Zukunft

Die Fahrzeugproduktion findet heutzutage hauptsächlich in festen Produktionslinien auf großen und weitläufigen Fabrikgeländen statt. Die Produktionslinien können modellspezifisch, also nur geeignet zur Produktion eines Fahrzeugmodells, oder aber modelldivers sein und somit die Fertigung mehrerer Modelle und Modellvarianten innerhalb derselben Produktionslinie ermöglichen. Künftig wird diese Modell- und Variantenvielfalt aufgrund starker Produktindividuallisierung weiter zunehmen. Die industrielle Produktion wird dadurch und durch eine hochflexible (Großserien-)Produktion gekennzeichnet sein [1]. Um diese höhere Flexibilität und Dynamik zu erreichen, sollen in Zukunft rekonfigurierbare Produktionsmodule in Kombination mit sehr kurzen Endmontagelinien zum Einsatz kommen. Der Trend bewegt sich somit weg von der Linienfertigung hin zu einer (automatisierten) Werkstattfertigung, ohne die Nachteile der klassischen Werkstatt [2].

In solchen Fabriken der Zukunft findet eine entkoppelte, voll flexible und hochintegrierte Produktion statt. Diese Wandlungsfähigkeit erzeugt jedoch zusätzliche Komplexität. Daher benötigt es intelligente Fabriken, die stationäre und mobile Cyber-Physische Systeme (CPS) in die Produktions- und Lagersysteme einbinden [3]. In den Fabriken konfiguriert und steuert das Produktionssystem die nächsten Produktionsschritte und die zugehörigen Informationen. Dadurch werden die Produktion und deren Wandlung gesteuert und geplant [2]. Diese Kooperation erfordert eine Kommunikation von unterschiedlichsten Informationen, sowohl zwischen den CPS als auch zu den Leitsystemen (horizontale sowie vertikale Kommunikation). Ein drahtloses Kommunikationssystem ist im Hinblick auf Mobilität wünschenswert.

#### 3.1.2 Anforderungen von CPS an die Kommunikation

Der Einsatz von Cyber-Physischen Systemen soll Verbesserungen des Produktionsablaufes gegenüber bisherigen Systemen bieten. Besonders kundenspezifische Prozesse, die eine neue Maschineneinrichtung, -kalibrierung oder -programmierung benötigen oder bisher durch manuelle Tätigkeiten ausgeführt wurden, sollen CPS mit ihrer direkten Informationsanbindung an die Leit- und Auftragssysteme und ihrer Flexibilität verbessern. Auch können CPS durch ihre Anpassungsfähigkeit und Wandelbarkeit ressourceneffizienter eingesetzt werden als mehrere traditionelle Maschinen bzw. Aggregate. Zudem eröffnen diese Fähigkeiten weitere Optionen zur Anpassung an menschliche Mitarbeiter und bieten dadurch Verbesserungen bei kooperativem Arbeiten zwischen Mensch und Maschine. [3]

Für diese Aufgaben und um diese Fähigkeiten zu ermöglichen, bedarf es eines erhöhten Informationsaustauschs. Die CPS müssen, um zu kooperieren und um als intelligente Fabrik zusammenzuarbeiten, selbständig Informationen untereinander und mit Leit-, Kommissionier- und Bestellsystemen austauschen. Ebenso müssen sie Aktionen einleiten und sich gegenseitig steuern können [1].

Innerhalb der Fabriken der Zukunft werden CPS hauptsächlich innerhalb der Produktionsmodule eingesetzt werden. Diese Produktionsmodule sind wohl am ehesten mit den Produktionszellen aktueller Fabriken vergleichbar. Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten der ma-

schinellen Fertigung unterscheiden sich die Anforderungen des Prozesses an die Kommunikation hinsichtlich Kommunikationsqualität und Zeitverhalten nicht wesentlich zwischen dem Einsatz von CPS und der Fertigung durch Produktionszellen. Da keine Veränderung dieser Rahmenbedingungen zu erwarten ist, gelten die Anforderungen der Zellebene der industriellen Kommunikation auch für Cyber-Physische Systeme innerhalb von Industrie 4.0 [4].

## 3.2 Industrielle Kommunikation

### 3.2.1 Referenzmodell

Die Automatisierungspyramide mit verschiedenen Kommunikationsebenen (Abbildung 1 links) ist eines der bekanntesten Referenzmodelle in der industriellen Kommunikationstechnik. Sie setzt sich in der dargestellten Weise aus drei Ebenen zusammen: die Fabrikebene, die Zellebene und die Feldebene. An der Spitze befindet sich die Fabrikebene. In ihr befindet sich eine hohe Anzahl von Stationen sowie großen Verbindungsentfernnungen. Das Manufacturing Execution System (MES) und das Enterprise Resource Planning (ERP) sind als Anwendungen dieser Ebene zuzuordnen. Darunter folgt die Zellebene, die alle Steuerungsprozesse einer Produktionszelle beinhaltet. Da auf dieser Ebene die wichtigen Steuerungsinformationen übertragen werden, sind die Anforderungen an die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Kommunikation sehr hoch. Die Feldebene bildet mit den tatsächlichen Fertigungsprozessen die Basis der Automatisierungspyramide [1;5].

Zukünftig wird dieses Modell zur Beschreibung der industriellen Kommunikation nicht mehr ausreichen [4]. Die durch Industrie 4.0 geförderte, zunehmende Informationsdurchdringung aller Kommunikationsebenen der Fabrik verändert das Kommunikationsverhalten auf allen Ebenen. Aus dem Internet der Dienste und dem Internet der Dinge entsteht zusammen mit den Cyber-Physischen Systemen die Industrie 4.0-Sanduhr (Abbildung 1 rechts).

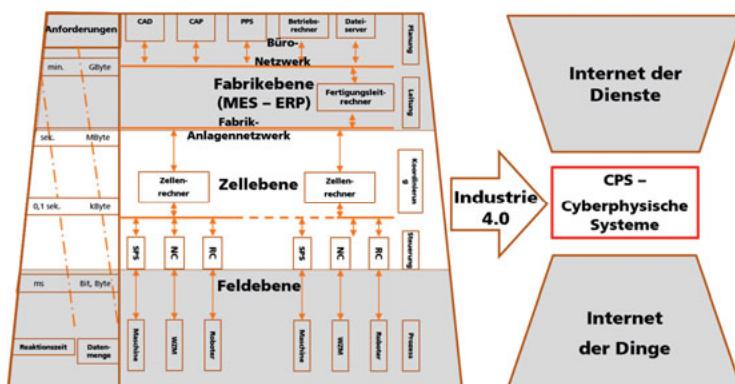


Abbildung 1: Kommunikationsebenen in Fertigungseinrichtungen [1;6]

### 3.2.2 Übertragungsmedium

Aktuell findet die industrielle Kommunikation größtenteils über kabelgebundene Systeme statt. Verschiedenste Feldbussysteme übertragen Steuerungsdaten echtzeitfähig über Kupfer- und optische Leitungen. In jüngerer Vergangenheit haben sich besonders Feldbussysteme durchgesetzt, die auf Ethernet bzw. eine Abwandlung von Ethernet zur Datenübertragung setzen [6;7]. Diese Systeme haben auch Einzug in die Feldebene bis hin zu den Sensoren und Aktoren gefunden [8]. Die Ethernet-basierten Feldbussysteme sind trotz ihrer gemeinsa-

men Abstammung von Ethernet zueinander inkompatibel und ebenfalls nicht kompatibel zu standardisiertem Ethernet. Mit Time-Sensitive-Networks (TSN) ist zurzeit ein neuer Standard in Arbeit, der den Anforderungen industrieller Kommunikation genügen soll und kompatibel zum Standard-Ethernet, wie es in Büronetzwerken verwendet wird, ist [9]. Dieser neue Standard hat das Potenzial, klassische und Ethernet-basierende Systeme abzulösen und weitgehend überflüssig zu machen.

Besonders die Eigenschaft drahtloser Kommunikationssysteme, kein Kabel für die Kommunikation zu benötigen, macht sie auch für die industrielle Nutzung interessant. Daraus ergeben sich mehrere Vorteile. Der offensichtlichste Vorteil ist das Fehlen des Kabels und die damit erhöhte Mobilität. Ohne Kommunikationskabel sind batterie- oder treibstoffbetriebene Maschinen ungebunden und frei auch über größere Strecken zu bewegen. Finanziell können durch den Wegfall eines Kabels ebenfalls Vorteile entstehen. Zum einen fallen keine Kosten für das Kabel selbst sowie für Kabelführungen, Stecker und Klemmen an. Weiterhin werden die Arbeits- und Aufwandskosten für die Kabelverlegung gespart. Sofern die Kosten für die drahtlosen Modems nicht deutlich höher sind als die Bustreiber bisheriger Feldbusse, können Einsparungen erfolgen. Durch den Wegfall der Installationsarbeiten können Installation und Setup der Kommunikationsanbindung einer Maschine schneller und teilautomatisiert erfolgen. Daher kann das Setup auch öfters erfolgen, um zwischen verschiedenen Fabrikkonfigurationen zu wechseln bzw. Umbauten zu erleichtern. Die Produktionsmöglichkeiten werden somit flexibler. In Bereichen mit rauen Umgebungen, die das Kabelmaterial stark strapazieren (Feuchtigkeit, ätzende Dämpfe, hohe Temperaturen, etc.), bieten drahtlose Kommunikationssysteme möglicherweise eine Alternative mit geringerem Verschleiß [10]. Jedoch ist ein industrieller Einsatz drahtloser Kommunikationssysteme bisher problematisch. Übertragungsfehler, eintretende Verbindungsverluste und Funkstörungen beeinträchtigen die Datenübertragung stärker als bei kabelgebundenen Systemen und sind schwerer einzuschränken und zu beheben [11].

Aufgrund der genannten Vorteile untersuchen verschiedene Hersteller von Feldbussystemen den Einsatz von Funkmodulen als Ersatz für kabelgebundene Übertragungsstrecken [12]. Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen kann davon ausgegangen werden, dass die klassischen Feldbusse verschwinden werden und dass zukünftig die industrielle Kommunikationstechnik auf TSN und drahtlose Systeme aufbaut.

### 3.2.3 Übersicht aktueller Feldbusse

In der industriellen Kommunikationstechnik existiert eine Vielzahl von Feldbussen. Diese unterscheiden sich in ihren Fähigkeiten je nach Einsatzgebiet. Auf der Zellebene basieren die meisten dieser Feldbusse auf Ethernet. Feldbusse müssen in der Regel echtzeitfähig sein, um beispielweise mehrere Achsen synchron zu bewegen. Dabei existieren verschiedene Definitionen für den Begriff „Echtzeit“. In [13] ist Echtzeit definiert als „... ein Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig derart betriebsbereit sind, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen.“ Zusätzlich werden durch [12] drei Echtzeitklassen spezifiziert: Weiche Echtzeit (anpassbare Zykluszeit); Harte Echtzeit (Zykluszeit 1-10ms) und Isochrone Echtzeit (Zykluszeit zwischen 250µs und 1 ms; Jitter kleiner als 1 µs). In Tabelle 3-1 sind die Eigenschaften mehrerer Ethernet-basierender Feldbusse aufgeführt.

**Tabelle 3-1: Eigenschaften Ethernet-basierender Feldbusse [14]**

	<i>Ethernet Powerlink</i>	<i>EtherCAT</i>	<i>PROFINet IRT</i>	<i>SERCOS III</i>	<i>Ethernet/IP</i>
<i>Echtzeitfähig</i>	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
<i>Zykluszeit</i>	0,2-1 ms	0,1 ms	0,25-1 ms	0,031-1 ms	10 ms
<i>Teilnehmer</i>	8-44	100	35-150	8-254	k.A.
<i>Jitter</i>	< 1µs	< 1µs	< 1µs	< 1µs	k.A.
<i>Mobilitäts-support</i>	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein

### 3.2.4 Kommunikationsanforderungen einer Produktionszelle

Aus Abschnitt 3.1.2 geht hervor, dass CPS ähnliche Anforderungen an das Kommunikationssystem haben wie aktuelle Produktionszellen. Die VDI/VDE 2185 [5] beschreibt die typischen Anforderungen an die Kommunikation. Diese sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

**Tabelle 3-2: Anforderungen an die Zellebene [5;15]**

Parameter	Wert
<i>Harter Echtzeitdatenverkehr</i>	Ja
<i>Verfügbarkeit</i>	Hoch
<i>Zuverlässigkeit - Bitfehlerrate (BER)</i>	$\leq 10^{-5}$
<i>Zuverlässigkeit - Teilnehmerausfall</i>	Nicht tolerierbar
<i>Synchronität</i>	Hoch ( $\leq 1 \mu\text{s}$ )
<i>Reaktionszeit</i>	$\leq 100 \text{ ms}$
<i>Nutzdaten</i>	$\leq 30 \text{ Bytes/Teilnehmer}$
<i>Anzahl der Teilnehmer</i>	Bis 100
<i>Typ der Stationen</i>	Stationäre und mobile
<i>Entfernung</i>	30 bis 300 m

Grundsätzlich wird eine deterministische Datenübertragung in harter oder isochroner Echtzeit auf Zellebene gefordert. Determinismus wird in diesem Rahmen über Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bestimmt [16]. Die Verfügbarkeit eines Kommunikationssystems, unabhängig davon ob es drahtlos oder kabelgebunden ist, kann durch Störungen und Interferenz beeinträchtigt werden [17]. Die Zuverlässigkeit wird über die Bitfehlerrate (BER), also der Anzahl

von Fehlern pro Zeiteinheit und Stationsausfälle, gemessen. Die Synchronität der internen Uhren jedes Kommunikationsteilnehmers ist eine Grundvoraussetzung für die koordinierte Bewegung mehrerer Achsen. Ein zu großer Jitter führt zu Synchronisationsproblemen [8]. Schließlich muss das Steuerungssystem auf zufällige Ereignisse innerhalb genau definierter Zeitschranken reagieren können. Diese Reaktionszeit oder Zykluszeit ist stark anwendungs- und prozessabhängig und liegt im Bereich zwischen 1 und 100 ms für die Produktionstechnik. Die weiteren in Tabelle 3-2 genannten Eigenschaften haben keinen Einfluss auf die Übertragung selbst, betreffen jedoch das Kommunikationssystem. Die Anzahl an möglichen Teilnehmern bestimmt beispielsweise, zusammen mit der Größe der Nutzdaten, die benötigte Übertragungskapazität.

## 3.3 Drahtlose Kommunikation

### 3.3.1 Vorstellung drahtloser Kommunikationssysteme

Im industriellen Umfeld werden bereits drahtlose Kommunikationssysteme eingesetzt [5]. Diese werden jedoch nicht für harte Steuerungsaufgaben verwendet, sondern finden bei Anwendungen mit geringeren Echtzeitanforderungen Gebrauch. Im Folgenden werden einige Systeme kurz vorgestellt.

**Bluetooth** wurde als drahtloses Personennetzwerk (Wireless Personal Area Network WPAN) für kurze Distanzen entwickelt [18]. Der Funknetz-Standard hat inzwischen mehrere Versionen und Varianten. Darunter existiert eine Niedrigenergie-Variante, die sich besonders für verteilte Sensoren eignet, aber auch die Version 5.0 mit Datenraten bis zu 50 Mbit/s. Bluetooth-Netzwerke bestehen aus einem Master und bis zu 256 Slaves. Die genutzte Funkfrequenz liegt im ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical) und ist damit in vielen Ländern für jeden legal nutzbar [19].

**ZigBee** benutzt ebenfalls das ISM-Frequenzband, ist dabei aber grundsätzlich auf einen geringen Energiebedarf und niedrige Datenrate ausgelegt [20]. Das Funknetz setzt auf einen einfachen Protokollstapel, um die Berechnungen zu vereinfachen, und auf ein Maschennetzwerk zur Überbrückung größerer Distanzen.

**WirelessHART** (Highway Addressable Remote Transducer) ist ein industrielles Sensornetzwerk aus der Verfahrenstechnik. Die Datenübertragung selbst verwendet für die unteren beiden Kommunikationsschichten Zigbee. Die Echtzeitanforderungen sind in der Verfahrenstechnik und in der Produktionstechnik unterschiedlich. [21] Bei Wireless-HART kommt ein 10ms-Zeitschlitzverfahren (TDMA = Time Division Multiple Access) zum Einsatz. Dabei ist die Zykluszeit von der Teilnehmeranzahl abhängig. Durch das Maschennetzwerk werden die Daten über einzelne Knoten weiter zum Zielknoten geleitet.

**Wi-fi/WLAN** (Wireless Local Area Network) wird im Büro- und Mediabereich als drahtloses Computernetzwerk eingesetzt und ständig weiterentwickelt. Dabei sind die einzelnen Iterationen des Standards teilweise inkompatibel zueinander. Die aktuelle Version 802.11ac verspricht eine Datenrate von bis zu 1Gbit/s und sendet im ISM-Frequenzband [22]. Das verwendete Datenübertragungsverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) bietet keine dynamische Bandbreitenanpassung für unterschiedliche Verbindungen, was zum Abbruch der Kommunikation bei schlechten Funkverhältnissen führen kann.

**WiMAX** ist ein drahtloses Stadt- oder Regionalnetzwerk (Wireless Metropolitan Area Network WMAN), das ein lizenziertes Frequenzband verwendet. Durch die Verwendung von skalierbarem OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) kann das Funknetz die Bandbreite adaptiv verteilen. [23]

**LTE Advanced** entstand als Weiterentwicklung aus dem Mobilfunkprotokoll HSPA (Highspeed Packet Access) und bietet eine reine paketorientierte Datenübertragung. Das hauptsächlich zur Datenübertragung bei Mobiltelefonen genutzte Kommunikationssystem verfügt über skalierbare Kanalbreiten. Im Downlink wird OFDMA eingesetzt, während im Uplink SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) Verwendung findet. LTE Advanced nutzt ein lizenziertes Frequenzband [24].

### 3.3.2 Übersicht und Bewertung drahtloser Kommunikationssysteme

Eine Übersicht der Eigenschaften der vorgestellten drahtlosen Kommunikationssysteme wird in Tabelle 3-3 gezeigt. WiMAX und LTE Advanced haben im Gegensatz zu den anderen vorgestellten drahtlosen Kommunikationssystemen den Vorteil, auf einem privaten, lizenzierten Frequenzband zu arbeiten. Das Spektrum wird somit nicht mit anderen Benutzern geteilt, wodurch Störungsfreiheit bzw. Verfügbarkeit quasi garantiert werden kann. Die Kommunikationssysteme erfüllen damit die geforderte Voraussetzung der Verfügbarkeit der Datenübertragung. Zwischen WiMAX und LTE Advanced bietet LTE Advanced eine höhere Datenrate und geringere Reaktionszeit.

**Tabelle 3-3: Eigenschaften drahtloser Kommunikationssysteme**

	Bluetooth	ZigBee	Wireless-HART	Wi-Fi	WiMAX	LTE Adv.
<i>Echtzeitfähig</i>	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
<i>Frequenz</i>	ISM	ISM	ISM	ISM	Privat	Privat
<i>BER</i>	10-3	10-3	k.a.	10-3	k.a.	k.a.
<i>Reaktionszeit</i>	>10 ms	>15 ms	>10 ms	>10 ms	<20 ms	<10 ms
<i>Datenrate</i>	24 Mb/s	250 Kb/s	250 Kb/s	1 Gb/s	350 Mb/s	1 Gb/s
<i>Reichweite</i>	10-200 m	10-75 m	0,3-3km	100-250 m	30 km	45 km
<i>Mobilitäts-support</i>	Nein	k.A.	k.A.	Ja	Ja	Ja

Aus dem Vergleich der Anforderungen an die Kommunikation in einer Produktionszelle aus Tabelle 3-2 und den Eigenschaften drahtloser Kommunikationssysteme in Tabelle 3-3 zeigt sich, dass bisher kein Standard alle Anforderungen von CPS erfüllt.

### 3.3.3 Unterschied zwischen LTE Adv. und Feldbussen

Aus dem Vergleich der Eigenschaften der drahtlosen Kommunikationssysteme mit den Kommunikationsanforderungen einer Produktionszelle geht hervor, dass LTE Advanced die meisten Anforderungen erfüllt. Die Unterschiede zwischen industriellen Feldbussen und LTE Advanced sind jedoch deutlich. Industrielle Feldbusse werden dazu genutzt, periodisch kleine Datenmengen an viele Stationen zu übertragen. Der Einsatz von LTE Advanced ist dagegen hauptsächlich eine einmalige Datenübertragung von großen Datenmengen an wenige Nutzer. Der Fokus von LTE Advanced liegt somit auf der Datenübertragung, während Feldbusse sich

auf die Echtzeitkommunikation spezialisieren. Bei Feldbussen wird weiterhin häufig eine direkte Kommunikation zwischen den Stationen realisiert und die Bandbreite bleibt durch die Verwendung von Kabeln konstant. Bei LTE Advanced variiert die Bandbreite jedoch aufgrund unterschiedlicher Signalqualität der Funkübertragung. Zudem erfolgt die Übertragung über eine Basisstation, da die Up- und Downlink-Frequenzen verschieden sind [25]. Die Luftschnittstelle ist also nicht optimal für Maschine-zu-Maschine-Anwendungen ausgelegt [26]. Die direkte Kommunikation wurde bei LTE Advanced untersucht mit dem Ergebnis einer höheren Bandbreite und schnelleren Übertragung. Allerdings sind der Jitter und die Konformität zu Standard-LTE dabei nicht betrachtet worden [27].

## 3.4 Industrielles LTE: Idee und Konzept

### 3.4.1 Defizite

Für die Verwendung für LTE Advanced müssen die wesentlichen Defizite betrachtet und behandelt werden. Aus den Unterschieden zu industriellen Feldbussen und dem Abgleich mit den Kommunikationsanforderungen einer Produktionszelle folgen drei solcher Defizite: Zum einen ist die Übertragungsqualität nicht ausreichend. Die spezifizierte erreichbare Bitfehlerrate ist zu hoch. Weiterhin bietet LTE Advanced keine Methode zur ausreichend genauen Synchronisation der Kommunikationsteilnehmer bzw. deren internen Uhren. Schließlich müssen die durch unterschiedliche Signalqualität verursachten Variationen der Bandbreite behandelt werden, um eine Echtzeitübertragung zu realisieren.

### 3.4.2 Fehlerkorrektur

Um die Übertragungsqualität zu verbessern und die Bitfehlerrate zu senken, kann eine zusätzliche Fehlerkorrektur eingesetzt werden. Bei den bestehenden Feldbussen werden bereits mehrere Ansätze zur Fehlerkorrektur verwendet. Teilweise sind diese auf die Übertragungsart zugeschnitten, weitestgehend sind die Ansätze wie Wiederholung, Checksumme und Coding aber auf LTE Advanced übertragbar. Um LTE nicht grundsätzlich zu verändern, kommen Vorwärtsfehlerkorrekturmechanismen auf der Anwendungsschicht (Application Layer Forward Error Correction AL-FEC) zum Einsatz [28]. Dabei muss der Berechnungsaufwand hinsichtlich Zykluszeit und Latenz evaluiert werden.

### 3.4.3 Synchronisierung

Für die Synchronisierung der Kommunikationsteilnehmer stehen mehrere standardisierte Methoden zur Verfügung. Neben dem Precision-Time-Protocol (PTP, IEEE 1588) ist eine GPS (Global Position System)-Synchronisierung für die geforderte Synchronität ( $< 1\mu\text{s}$ ) geeignet. GPS bietet dabei als hardwarebasierender Ansatz eine bessere Synchronität (bis 10 ns) und benötigt keine direkte Kommunikation zwischen den zu synchronisierenden Geräten. Es wird somit keine Übertragungskapazität verschwendet und die Zeitsynchronisierung ist unabhängig von der Datenübertragung. [29] Andererseits ist der GPS-Empfang in Gebäuden problematisch, lässt sich aber durch GPS-Repeater verbessern [30]. Durch die zeitsynchronen internen Uhren der Kommunikationsteilnehmer lässt sich ein Kommunikations- und Steuerungsprotokoll ähnlich dem Ethernet/IP umsetzen. Die Bewegungsdurchführung findet zu definierten Zeitpunkten und nicht direkt nach dem Eintreffen des Bewegungsbefehls statt. Zur sinnvollen Nutzung muss jedoch die maximale Latenz des Übertragungssystems bekannt sein. Diese kann möglicherweise auch adaptiv gemessen und angepasst werden.

### 3.4.4 Stabilität

LTE Advanced passt die Übertragungsrate adaptiv an die variierende Signalqualität an. Die Geräte und Anwendungen der industriellen Steuerungstechnik sind dafür nicht ausgelegt und können mit dieser Variation nicht umgehen. Daher bedarf es Stabilisierungsmechanismen. Der Consumer- und Mediabereich verwendet beim Streaming über LTE deshalb adaptive Streaming-Methoden (Bsp. Microsoft Smooth Streaming, Dynamic Adaptive Streaming over http: DASH) [31]. Beim standardisierten Verfahren DASH wird die Bildqualität der verfügbaren Datenrate angepasst. Eine ähnliche Methode kann auf Steuerungsdaten angewendet werden. Dabei werden wichtige Sollwerte jederzeit übertragen und Diagnose und HMI-Daten nur zu Zeiten mit genügend Bandbreite übermittelt [32].

### 3.4.5 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept (Abbildung 2) für industrielles LTE sieht ein drahtloses Echtzeitkommunikationssystem auf Basis von LTE Advanced vor. Unter Verwendung von zusätzlicher Fehlerkorrektur auf der Anwendungsschicht und einer dezentralen Uhrensynchronisation mittels GPS sowie dem Einsatz von DASH zur Stabilisierung des Datenflusses über die variable Bandbreite kann LTE Advanced entsprechend erweitert werden.

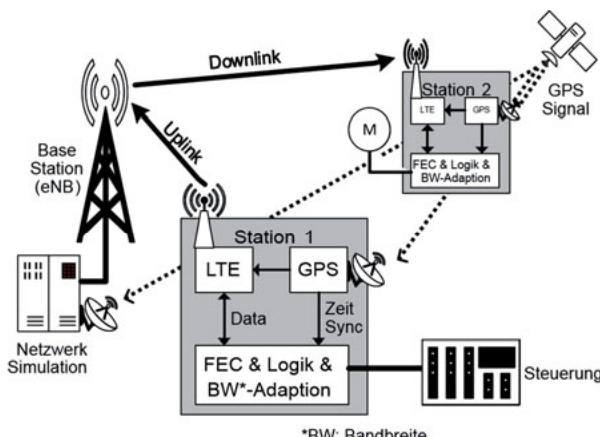


Abbildung 2: Gesamtkonzept industrielles LTE

### 3.4.6 Umsetzung

Eine prototypische Umsetzung kann über FPGA-Entwicklungsplatten mit Feldbus-Stack oder Antriebverstärker erfolgen. Da der LTE-Standard nicht verändert werden soll, können daran marktübliche GPS- und LTE-Module angebunden werden. Die verknüpfende Logik wird innerhalb des FPGAs realisiert. Bei den LTE-Modulen sollte auf die Verfügbarkeit einer möglichst latenzarmen Schnittstelle geachtet werden. Dies schränkt die verfügbare Auswahl allerdings stark ein. Weiterhin ist eine Picozelle als Basisstation inklusive Netzwerksimulation notwendig. Dies könnte später aber auch eine Dienstleistung der Mobilfunknetzbetreiber werden. Als Datenprofil kann beispielsweise CANopen verwendet werden.

### 3.5 Zusammenfassung und Ausblick

In Zukunft werden stationäre und mobile Cyber-Physische Systeme in intelligenten Fabriken für eine hochflexible Massenproduktion verantwortlich sein. Dazu bedarf es drahtloser Echtzeitkommunikationssysteme. Zukünftig werden TSN und drahtlose Echtzeitkommunikationssysteme den traditionellen Feldbus größtenteils ersetzen. Ein industrielles LTE auf Basis von LTE Advanced mit Erweiterungen durch AL-FEC, GPS-Zeitsynchronisation und DASH ist plausibel und eine prototypische Umsetzung wird angestrebt.

### 3.6 Literatur

- [1] Kagermann, H., et al.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Acatech, 2013
- [2] Bauernhansl, T.: Automotive industry without conveyor belt and cycle - research campus ARENA2036, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, Stuttgart: 15th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology 2015. Documentation. Vol.2 : Stuttgart, 17. und 18. März 2015, Stuttgart, 2015
- [3] Acatech: Cyber-Physical Systems. Innovationsmotoren für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion (acatech POSITION), Springer Verlag, Heidelberg, 2011
- [4] Sauer, O.: Informationstechnik in der Fabrik der Zukunft: Fabrik 4.0 – Aktuelle Rahmenbedingungen, Stand der Technik und Forschungsbedarf. ZWF 106 (2011)12, Hanser Verlag, 2009
- [5] VDI/VDE 2185: Radio based communication in industrial automation, VDI/VDE 2185, Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [6] Schnell, G., Wiedemann, B.: Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik, Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2006
- [7] Decotignie, J.D.: Ethernet-Based Real-Time and Industrial Communications, in Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 6, pp. 1102-1117, 2005
- [8] Lüder, A.: IAONA Handbook – Industrial Ethernet, Industrial Automation Open Networking Alliance e.V., Magdeburg, 2004
- [9] Kehrer, S., Kleineberg, O., Heffernan, D.: A comparison of fault-tolerance concepts for IEEE 802.1 Time Sensitive Networks (TSN), Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), Barcelona, 2014
- [10] Jonsson, M., Kunert, K.: Towards Reliable Wireless Industrial Communication With Real-Time Guarantees, in IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 5, No. 4, pp. 429-442, 2009
- [11] Willig, A., Matheus, K., Wolisz, A.: Wireless Technology in Industrial Networks, in Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 6, pp. 1130-1151, 2005
- [12] Neumann, P.: Communication in industrial automation – What is going on?, Control Engineering Practice, Vol. 15, Issue 11, Elsevier, 2007
- [13] DIN 44300-1: Informationsverarbeitung – Begriffe – Allgemeine Begriffe, DIN, Beuth Verlag, Berlin, 1988
- [14] Wörn, H., Brinkschulte, U.: Echtzeitsysteme – Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen, Springer Verlag, Berlin, 2005

- [15] Fontanelli, D., et al.: Performance Analysis of a Clock state Estimator for PROFINET IO IRT Synchronization, Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology conference (12MTC 2013), 2013
- [16] Kopetz, H., et al.: The Time-triggered Ethernet (TTE) Design, in Proceedings of the IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2005
- [17] Ghosh, C., et al.: Modeling and Validation of Channel Idleness and Spectrum Availability for Cognitive Networks, IEEE Journal on selected areas in Communications, Vol. 30, No. 10, 2012
- [18] IEEE 802.15.1: IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. – Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2005
- [19] 47 C.F.R. §2.106: FCC Online Table of Frequency Allocations, Federal Communications Commission, Office of Engineering and Technology, Policy and Rules Division, 2013
- [20] IEEE 802.15.4. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2011
- [21] [18] Nixon, M.: A comparison of WirelessHART and ISA100.11, 2012
- [22] IEEE 802.11ac: IEEE Standard for Information Technology – Local and metropolitan area networks Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification Amendment 4, 2013
- [23] IEEE 802.16m: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 3: Advanced Air Interface, 2011
- [24] Barth, U.: 3GPP Long-Term evolution/System Architecture Evolution overview, Alcatel, 2006
- [25] Dahlmann, E., Parkvall, S., Skold, J.: 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, second ed., Elsevier Science, 2013
- [26] Lien, S., et al.: Toward Ubiquitous Massive Accesses in 3GPP machine-to-Machine Communications, IEEE Communications Magazine, 2011
- [27] Doppler, K., et al.: Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks, IEEE Communications Magazine, 2009
- [28] Stockhammer, T., et al.: Application Layer Forward Error Correction for Mobile Multimedia Broadcasting, published in Handbook of Mobile Broadcastig: DVB-H. DMB, ISDB-T and Media FLO, p. 239-280, CRC Press, 2008
- [29] Mazur, D., et al.: Time Synchronization of Automation Controllers for Power Applications, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 50, No. 1, 2014
- [30] Jardak, N., Samama, N.: Indoor Positioning Based on GPS-Repeaters: Performance Enhancement using an Open Code Loop Architecture, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 45, No. 1, 2009
- [31] Adzic, V., Kalva, H., Furht B.: Optimizing Video Encoding for Adaptive Streaming over HTTP, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012
- [32] Schlechtendahl, J., et al.: Communication mechanisms for cloud based machine controls, 47th CIRP Conference on manufacturing Systems, Windsor, Canada, 2014

## 4 Prozessparallele Qualitätsüberwachung durch Kombination modellbasierter Ansätze mit steuerungsinternen Daten

*M. Königs, C. Brecher*

### 4.1 Einleitung

Die erzielbare Fertigungsqualität wird von den eingesetzten Fertigungsressourcen und vom Fertigungsprozess beeinflusst. Darüber hinaus können Vorgaben der NC-Steuerung und des Programmiersystems einen zusätzlichen, erheblichen Einfluss auf die Entstehung von Fertigungsfehlern ausüben. Aufgrund vielfältiger Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren ist eine Korrelation zwischen Fehlerursache, NC-Programmsatz und Fertigungsfehlern nur mit hohem manuellen Aufwand durchführbar. Dies steht der Forderung nach einer wirtschaftlichen Produktion mit immer schnelleren Umstellzeiten auf neue Prozesse gegenüber, welche reproduzierbar einen hohen Grad an Leistungsfähigkeit aufweisen müssen. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung der eingesetzten Technologien ist somit unabdingbar.

Vor diesem Hintergrund wird der Bedarf einer weitreichenderen Unterstützung der Bearbeitungsplanung mit zusätzlichen Diagnose- und Prognosemethoden ersichtlich. Ein aktueller Trend im Kontext von „Industrie 4.0“ besteht diesbezüglich im Lernen aus aggregierten Fertigungsdaten entlang der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette. Dieser Artikel fokussiert diese Thematik und beschreibt beispielhaft den Aufbau einer für diese Zwecke benötigten Datenstrukturierung, welche durch Vernetzung von Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätssicherung kontinuierlich mit fertigungsrelevanten Daten angereichert werden kann. Anschließend werden auf dieser Grundlage aufbauend Potenziale von Evaluationsmethoden aufgezeigt und diskutiert.

### 4.2 Vernetzung entlang der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette

In Abbildung 1 ist die klassische CAD-CAM-NC-Verfahrenskette abgebildet. Diese soll im Folgenden aus informationstechnischer Sicht beleuchtet werden. Im Nachgang werden dann Optimierungsmaßnahmen im Sinne der Digitalisierung und Vernetzung herausgestellt.

Ausgangspunkt bei der Erstellung eines NC-Programms ist der Erhalt von Konstruktionsdaten. Auf Basis der darin enthaltenen Geometrieinformationen sowie vorgegebenen Fertigungstoleranzen findet dann die Auslegung des Fertigungsprozesses mittels eines CAM-Systems statt.

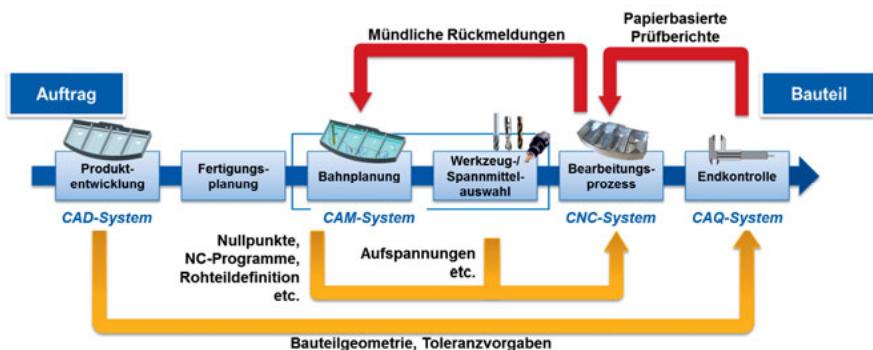


Abbildung 1: Klassischer Aufbau der CAD-CAM-NC Verfahrenskette

Der NC-Programmierer erzeugt dabei zunächst Bearbeitungsoperationen, welche er im Anschluss durch Auswahl von CAD-Geometrieflächen, Bearbeitungswerkzeugen und Technologiewerten parametriert. Ein Bahnplanungsalgorithmus erzeugt aus diesen Vorgaben dann die notwendigen Werkzeugpfade, welche anschließend durch einen Postprozessor in ein maschinen spezifisches NC-Programm übersetzt werden. Dieses wird zusammen mit einer Dokumentation von Rohteil, Spannlagen, Nullpunkten und benötigten Werkzeugen an den Werkstattbereich weitergereicht. Hier erfolgt dann die Einrichtung der dokumentierten Bearbeitungssituation. Dazu zählt sowohl die Einstellung der Werkzeuge als auch die Herstellung von Aufspannungssituation und Werkzeugmagazinbelegung.

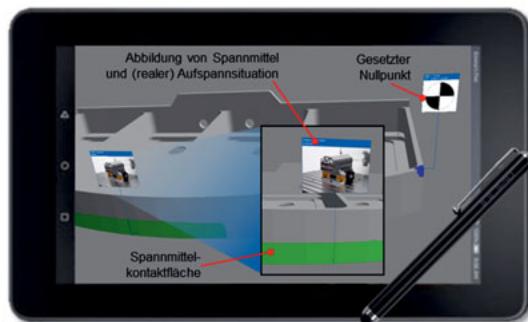
Nach einem abgeschlossenen Fertigungsprozess findet in Allgemeinen eine erste maschinen nahe Qualitätsprüfung des gefertigten Bauteils statt. Dabei festgestellte Fertigungsfehler oder Toleranzverletzungen werden mündlich in die Arbeitsvorbereitung zurückgemeldet. Werden hier keine offensichtlichen Fehler festgestellt, erfolgt anschließend eine detaillierte Prüfung unter Verwendung spezialisierter Messtechnik in der Qualitätssicherung. An dieser Stelle findet eine erneute Interpretation der erhaltenen CAD-Daten und Toleranzvorgaben statt. Toleranzen werden dabei in Qualitätsmerkmale übersetzt, welche anschließend durch eine Messmaschine (z. B. Rauhigkeitsmessgerät, Koordinatenmessmaschine) auf ihre Einhaltung hin überprüft werden. Dabei identifizierte Toleranzverletzungen werden meist papierbasiert an die Werkstattebene zurückgereicht, damit dort manuelle NC-Programmanpassungen vorgenommen werden können.

In Sinne der „Industrie 4.0“ sollen nun, bezogen auf die CAD-CAM-NC-Verfahrenskette, alle Informations- und Leistungsträger miteinander vernetzt in Verbindung treten können. Dies kann in der Praxis durch eine offene Systemarchitektur realisiert werden, welche allen Mitarbeitern zur Verfügung steht. Darin werden Daten zentral erstellt, abgelegt und angepasst [1]. Neben der Anbindung aktueller Softwaresysteme ist vor allem der Mitarbeiter selbst in der Produktion der Zukunft von zentraler Bedeutung. Durch die Verwendung mobiler Endgeräte soll er direkt in den Produktionsprozess eingebunden und somit orts- und kontextspezifisch unterstützt werden [2].

Eine zentrale Datenhaltung gewährleistet dabei jedoch nur eine kontinuierliche Datenaktualisierung. Für die Verfestigung eines abteilungsübergreifenden, digitalen Informationstransfers sowie für die Umsetzung der geforderten Mitarbeiterunterstützung sind weitreichendere Metho-

den zur Datenintegration einzusetzen [3]. Im Forschungsvorhaben „CAMCloud“ [3, 4] wurde dies durch eine Zusammenführung und Kontextualisierung von fertigungsrelevanten Informationen über die CAD-Bauteiloberfläche des zu fertigenden Werkstücks realisiert. Durch softwaretechnische Erweiterungen eines CAM-Systems kann zunächst allen zur Bearbeitung markierten CAD-Einzelflächen eine Referenz auf die zugehörigen Operationen zugewiesen werden. Auf gleiche Weise erfolgt auch eine Zuordnung von Nullpunkten und Spannmitteln zu betroffenen Bauteilregionen. Nach Abschluss der planerischen Tätigkeiten wird dieses informationstechnisch angereicherte Modell exportiert und den übrigen Stationen der Verfahrenskette bereitgestellt. Ein abteilungsübergreifender Daten- und Informationsaustausch erfolgt ab diesem Zeitpunkt immer digital und unter Referenz einer betroffenen Bauteilregion.

Eine ortsunabhängige Bereitstellung des angereicherten Modells wurde in „CAMCloud“ durch die Verwendung browser-basierter Web-Schnittstellen erreicht. Neben der Darstellung von z. B. Nullpunkten und Spannmittelkontaktbereichen (Abbildung 2) zur Einrichtung der Werkzeugmaschine wird auch die bisher nur mündliche oder papierbasierte Rückmeldung von Bearbeitungsfehlern über diese Schnittstellen durchgeführt.



**Abbildung 2: Mitarbeiterunterstützung bei Herstellung der Bearbeitungssituation**  
(Bildquellen: Amazon, Allmatic)

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen zwei Ausprägungen dieser Rückführungsschnittstellen. Diese werden auf Werkstattebene sowie innerhalb der Qualitätssicherung eingesetzt. Durch eine farbliche Markierung der virtuellen Bauteiloberfläche und anschließende Fehlerkategorisierung oder Verknüpfung mit z. B. Fotos können Fertigungsfehler intuitiv und mit direktem Bauteilbezug dokumentiert werden. Durch die zuvor durchgeführte Zuordnung von Bearbeitungsoperationen zu Bauteiloberflächen ist darüber hinaus eine kontextsensitive Rückführung der Fehlerschreibungen in das CAM-System durchführbar (Abbildung 3).

Eine Rückmeldung von Toleranzverletzungen aus der Qualitätssicherung erfolgt auf ganz ähnlichem Wege (Abbildung 4).



Abbildung 3: Dokumentation von Fertigungsfehlern auf mobilen Endgeräten

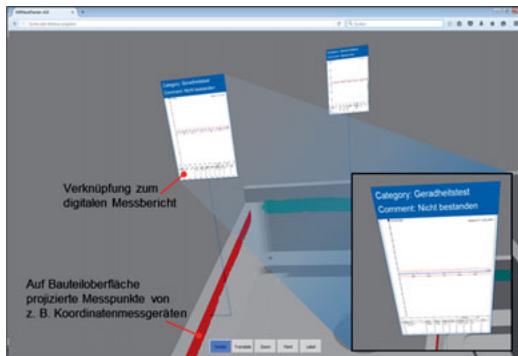


Abbildung 4: Rückführung von Qualitätsergebnissen in die Arbeitsvorbereitung

Die von Koordinaten- oder Rauhigkeitsmessgeräten ausgegebenen Soll- und Ist-Rohdaten werden nach durchgeföhrter Messung in den Kontext der Bauteilgeometrie gebracht und auf deren Oberfläche projiziert. Betroffene Bereiche werden dabei farblich hervorgehoben. Anschließend erfolgt – analog zur Fotodokumentation von Fertigungsfehlern – eine informatio-technische Verknüpfung mit den zugehörigen, digitalen Messberichten und eine Rückföhrung in die Fertigung oder Arbeitsvorbereitung.

Das aufgezeigte Vorgehen leistet einen Beitrag zur Mitarbeiterunterstützung entlang der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette. Durch eine strukturierte Rückmeldung von Fertigungsfehlern und Qualitätsproblemen erfolgt ein direkter Wissenstransport bis hin zurück in das CAM-System, wo es für zukünftige Bearbeitungsplanungen herangezogen werden kann.

### 4.3 Prozessdatenrückführung und -kontextualisierung

NC-Steuerungen etablierter Hersteller bieten heutzutage Schnittstellen für eine echtzeitnahe Erfassung steuerungssinterner Signale im Interpolations- bzw. Lageregeltakt (i. d. R. 6-12 ms bzw. 1-2 ms) an [5]. Neben einer kontinuierlichen Aufzeichnung von Achspositionen oder dem aktuell ausgeführten NC-Satz kann hierüber auch auf Systemvariablen wie z. B. kv-Faktoren, Kinematik, Werkzeug- und Kompensationstabellen und Antriebsparameter zugegriffen werden. Die Datenübertragung erfolgt dabei steuerungsspezifisch durch zusätzliche Softwarebibliotheken.

Auch für diese Informationsquelle muss eine Rückführung mit Bezug zur virtuellen Werkstückoberfläche erfolgen, da erst eine durchgängige Kontextualisierung von Bauteiloberfläche, Bearbeitungsoperation, NC-Programmsätzen, Werkzeug, Soll- und Ist-Verfahrbewegungen sowie Steuerungssignalen und erzielter Bauteilqualität die nötige Transparenz für gezielte Ursachenanalyse bei Fertigungsproblemen liefert. Die Herstellung des noch fehlenden Signal-Bauteiloberflächenbezugs kann z. B. über eine prozessparallele, auf Ist-Daten der NC-Steuerung operierende Materialabtragssimulation erfolgen. Abbildung 5 gibt einen Überblick über das hierzu notwendige Vorgehen.

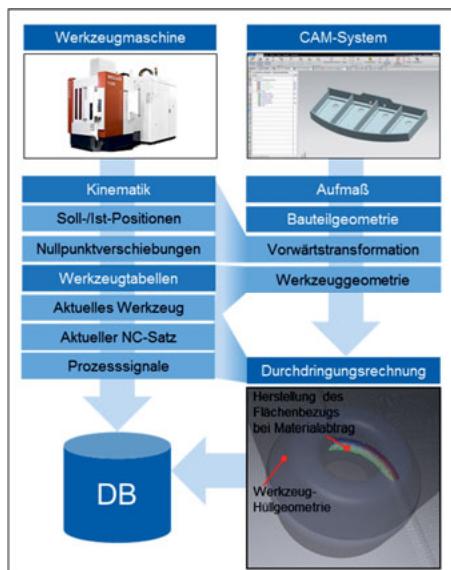


Abbildung 5: Herstellung des Bezuges zwischen NC-Satz, Werkzeug sowie Prozesssignalen und Bauteiloberfläche (Bildquellen: Heller, Siemens)

Vor Beginn der NC-Programm-Ausführung werden zunächst die Werkzeugtabelle und die Kinematik der Werkzeugmaschine aufgezeichnet. Während der NC-Programmausführung werden dann anschließend Soll- und Ist-Positionen pro Achse, der aktuell ausgeführte NC-Satz, aktive Nullpunktverschiebungen sowie Werkzeugwechsel erfasst. Durch Interpretation des kinematischen Modells und der Werkzeugkorrekturwerte sowie der Durchführung einer

kinematischen Vorwärtstransformation auf Basis der Nullpunkt- und Ist-Positionsdaten wird die Werkzeugverfahrbewegung – analog zum Vorgehen im CAM-System – im Werkstückkoordinatensystem berechnet. Unter Verwendung der CAD-Rohteilgeometrie kann dann für jede aufgezeichnete Ist-Position ein virtueller Werkzeugeingriff und folglich ein virtueller Materialabtrag berechnet werden. Im Moment des Abtrags werden dann auf den betroffenen Bau teilbereichen Referenzen zum aktuellen NC-Satz sowie dem Zeitpunkt des Abtrags hinterlegt. Die Oberfläche des virtuell gefertigten Bauteils enthält dann alle Verknüpfungen zu CAM- Bearbeitungsplanungen, eingesetzten Werkzeugen, NC-Sätzen, Qualitätsergebnissen und aufgetretenen Problemstellungen.

## 4.4 Datenevaluation

Auf den Darstellungen und Ergebnissen der vorherigen Kapitel aufbauend werden im Folgenden fortgeschrittene Analysemethoden und -werkzeuge für die erzeugte Datengrundlage vorgestellt. Darüber hinaus wird der Mehrwert dieser Werkzeuge an geeigneten Stellen durch Fallbeispiele untermauert.

### 4.4.1 Manuelle Prozessevaluation

Auf der entstandenen Datengrundlage sind manuelle Diagnosen direkt nach Beendigung des Bearbeitungsprozesses durchführbar. Wird z. B. die CAD-Bauteiloberfläche bei erkannten Prozessfehlern vom Maschinenbediener markiert, sind die relevanten Prozesssignale, sowie NC-Sätze, Werkzeuge und Bearbeitungsoperationen direkt ersichtlich. Eine Visualisierung der so ausgewählten Prozesssignalbereiche erfolgt dann z. B. über den zugehörigen Bereichen des Werkzeugpfads [5, 6]. Eingesetzt werden kann diese Form der Auswertung entweder direkt im CAM-System oder in separaten, maschinennahen Evaluationswerkzeugen. In Abbildung 6 ist ein solches maschinennahes Evaluationswerkzeug dargestellt. In der Abbildung wird der Bahnruck eines problematischen Bearbeitungsbereichs entlang des zugehörigen, programmierten Werkzeugpfads aufgetragen. Zu erkennen ist ein erhöhter Ruckverlauf. Als Grund hierfür konnte der Materialaustritt des verwendeten Stirnfräzers identifiziert werden. Durch die Wahl eines Werkzeugs mit einer geringeren Nachgiebigkeit und durch die Verwendung angepasster Technologieparameter konnte eine Abschwächung des Ruckverlaufs erreicht werden. An entsprechenden Stellen der Bauteiloberfläche führte dies zur Vermeidung der bisher aufgetretenen Oberflächenmarken. Die vorzunehmenden Änderungen konnten durch direkten Bezug auf Bearbeitungswerkzeug und -operation digital in die Arbeitsvorbe reitung zurückgeführt werden.

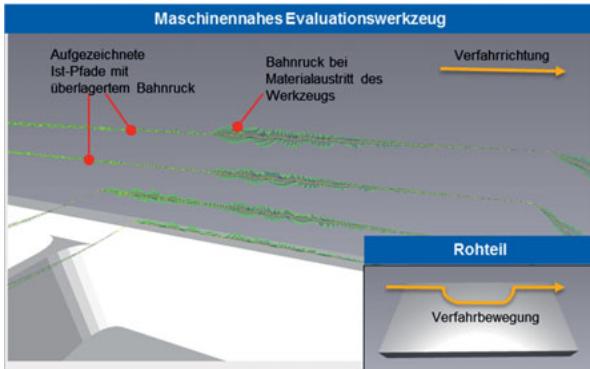


Abbildung 6: Prozesssignaladargestellt auf Werkzeug-Ist-Pfad in maschinennahem Evaluationswerkzeug

#### 4.4.2 Produktivitätssteigerungen

Neben manuellen Prozessauswertungen lassen sich mittels des Evaluationswerkzeugs auch unproduktive Abschnitte von NC-Programmen identifizieren. Auf Fertigungsebene erfolgt in der Regel eine globale, konservative Anpassung von Vorschub- und Spindeldrehzahlparametern bei auftretenden Qualitätsproblemen. Somit bleiben Potenziale einer lokal beschränkten Anpassungen der fehlerverursachenden Programmabreiche praktisch ungenutzt.

Der aufgezeigte Ansatz setzt diese Potenziale frei. Durch die Korrelation von Messdaten der Qualitätssicherung und NC-Sätzen über die Oberfläche der CAD-Bauteilgeometrie können NC-Programmbereiche gezielt verändert werden, wenn an den zugehörigen Oberflächenbereichen Toleranzverletzungen festgestellt wurden.

Dieses Vorgehen kann auch zur iterativen Steigerung der Produktivität eingesetzt werden. Dazu werden die Technologieparameter sukzessiv erhöht, bis eine erste Toleranzverletzung festgestellt werden kann. Für die zugehörigen NC-Programmbereiche werden die Technologieparameter auf die des letzten erfolgreichen Einsatzes zurückgesetzt. Für die übrigen Programmabschnitte erfolgt eine weitere Steigerung bis sich die nächste Toleranzverletzung einstellt. Mit diesem Vorgehen konnten in der Praxis bei Einhaltung aller geforderten Toleranzvorgaben Produktivitätssteigerungen von bis zu 90-140% erzielt werden.

#### 4.4.3 Automatisierte Evaluation und Qualitätsprognosen

Durch eine algorithmische Abbildung der manuellen Evaluationsmethoden kann eine automatische Identifikation von potentiell kritischen Bereichen durchgeführt werden. Ein solches Verfahren ist spätestens für die Analyse von Prozesssignalen notwendig, falls kein Einzelbau teil, sondern eine Serienproduktion überwacht werden soll. Neben der automatisierten Berechnung von Risikoeiweierten für das Auftreten von Fertigungsfehlern und die anschließende Kennzeichnung von Bereichen auf den zugehörigen Werkzeugbahnen [6] können unter Rückgriff der vorgestellten Methoden sogar qualitative Aussagen über die erzielte Fertigungsqualität getroffen werden. Am Beispiel eines Rundheitstests wird dies im Folgenden exemplarisch dargestellt. Über die Verknüpfung von Rohdaten eines Qualitätsmessberichts und den betroffenen Oberflächenregionen des Werkstücks wird in einem ersten Schritt die Menge aller Punkte des Werkzeugpfads identifiziert, welche bei der Bearbeitung der betroffenen Bauteilbereiche beteiligt waren. Hierbei werden nicht nur die Ist-Positionen des Werkzeugpfades,

sondern auch die zugehörigen Sollpositionen ermittelt. Wie in Abbildung 7 dargestellt, korreliert dann die sich aus den Punktemengen ergebende Soll-Ist-Konturabweichung (Abbildung 7, links; geglättetes Delta), bereinigt um den Radius des verwendeten Werkzeugs, deutlich mit den Ergebnissen des zu Validierungszwecken durchgeführten Prüfberichts einer Koordinatenmessmaschine (Abbildung 7, rechts).

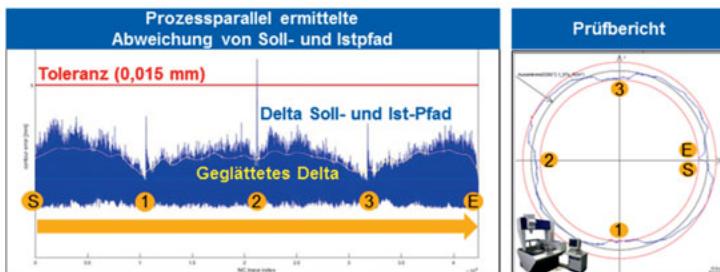


Abbildung 7: *Prozessparallele Prognose von Qualitätsergebnissen*

Durch die zusätzliche Verwendung eines Materialabtragsmodells in Kombination mit Positions- und Werkzeug-Ist-Daten können darüber hinaus reale Oberflächeneigenschaften qualitativ prognostiziert werden. In Abbildung 8 sind beispielhaft ein reales und eine online berechnetes Bearbeitungsergebnis für ein Luftfahrt-Strukturbau teil gegenübergestellt. Zu erkennen ist eine deutliche Übereinstimmung zwischen dem realen und dem online berechneten Fräsbild.

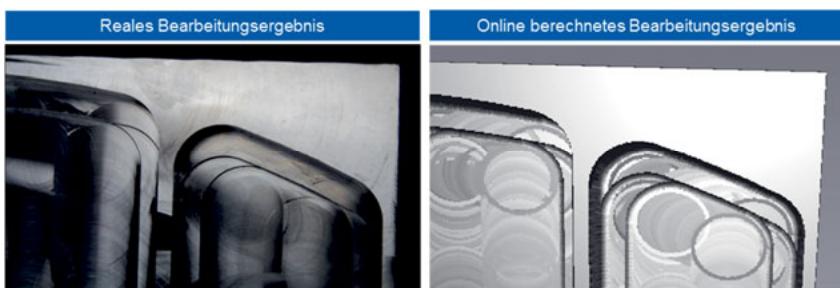


Abbildung 8: *Vergleich zwischen realem und online berechnetem Fertigungsergebnis*

## 4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel der Vernetzung von Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätssicherung wurde dargestellt, wie durch den Einsatz einer zentralen Datenbank sowie einer informations-technischen und aufgabenspezifischen Anbindung der Fertigungsstationen entlang der CAD-CAM-NC-Kette eine einheitliche Wissensbasis aufgebaut werden kann. Diese erlaubt dann die Steuerung, Unterstützung und Dokumentation von Fertigungsaufträgen. Darüber hinaus kann durch die Verknüpfung der stationsweise entstehenden Informationen über die Domäne "Bauteiloberfläche" eine Grundlage für weiterführende Datenanalysen geschaffen werden. Diese reichen von einer manuellen Fehlerursachenanalyse über Produktivitätsbeurteilungen bis hin zu einer prozessparallelen Qualitätsermittlung.

Während die vorgestellten Evaluationswerkzeuge schon jetzt einen großen Beitrag zu Ursachenanalysen und Produktivitätssteigerungen leisten können, erlauben die vorgestellten Verfahren zur Qualitätsprognose nur qualitative Aussagen. Klassische Messverfahren können auf diese Weise noch nicht ersetzt werden. Der Grund liegt in der aktuell vereinfachten Abbildung des physikalischen Verhaltens von Prozess, Werkzeug, Werkstück und Werkzeugmaschine. Für eine genauere Prognose müssen diese zusätzlichen Effekte über modellbasierte, effizient rechnende Ansätze miteinbezogen werden. Dies ist Thema aktueller Forschungsbestrebungen. Potenziale ergeben sich jedoch schon jetzt in der frühzeitigen Erkennung von Trends durch bauteil-, maschinen- oder standortübergreifende Prozesssignalanalysen. Diese können innerhalb einer statistischen Prozesskontrolle im Bereich der Serienfertigung schon jetzt berücksichtigt werden.

## 4.6 Literatur

- [1] Königs, M., Lohse, W., Brecher, C.: Integrative Vernetzung von Arbeitsvorbereitung und Fertigung in: Industrie 4.0 - innovative Konzepte zur Automatisierung, Hrsg.: Brecher, C., VDI-Verlag Düsseldorf 2015, ISBN 978-3-18-369302-3, S. 83-93
- [2] Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämerle, M.; Krause, T.; Schlund, S. : Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0, Verlag: Fraunhofer Verlag, 2013
- [3] Brecher, C.; Lohse, W.; Königs, M.: „Vernetzung von Arbeitsvorbereitung und Fertigung – Ein cloud-basierter Ansatz zur Erhöhung der Planungsqualität“, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 01-02/2015, Seite 14-17, (Artikel ZW111275).
- [4] CAMCloud – CAM System in der Cloud; AiF Projekt; Aktenzeichen: FVP-18086 N/1
- [5] Vitr, M.: CAM-NC-Kopplung für einen durchgängigen, bidirekionalen Informationsfluss zwischen Planung und Fertigung. Aachen: Apprimus, 2012
- [6] Lohse, W.: Evaluationsprozess für die NC-Bearbeitungsplanung komplexer Fräsprozesse. Aachen: Apprimus, 2014.

## 5 Ebenen der Virtualisierung von Robotersteuerungen – Von der aufgabenorientierten Programmierung bis zur Lageregelung aus der Cloud

*A. Vick, J. Krüger*

### 5.1 Einleitung

Der Begriff Industrie 4.0 wird von vielen Branchen und Verbänden aufgegriffen und durchaus unterschiedlich und mit abweichender Tiefe definiert. Für die industrielle Automatisierungs-technik bedeutet Industrie 4.0 unter anderem die Vernetzung aller Produktions- und Betriebsmittel. Das schließt auch Roboter und deren Steuerungen mit ein.

Aus den Industrierobotern werden damit Cyber-Physische Systeme, die als Hardware zunächst unabhängig von ihren Steuerungen, eine Handhabungs- oder Bearbeitungsdienstleistung repräsentieren. Diese Dienstleistung kann allerdings nur mit verbundener Steuerung realisiert werden, die nun nicht mehr herstellerspezifisch, sondern in allgemeingültiger Form implementiert ist. An der Hardware selbst verbleibt noch eine Rumpfsteuerung, die sicherheitsrelevante Funktionen und andere echtzeit-kritische Steuerungsanteile übernimmt.

Die übrigen Schichten der Wirkkette numerischer Bewegungssteuerung, wie Programmverwaltung, Interpreter und Interpolation sowie Koordinatentransformation lassen sich weiter modularisieren und laufen in verteilten IT-Infrastrukturen (z.B. Cloud). Die Forschungsfrage, die sich aus dieser Architektur ergibt lautet:

Welche Steuerungsfunktionen sind tatsächlich sinnvoll in die Cloud auslagerbar?

Zur Beantwortung der Frage wird hier der Anwendungsfall einer interaktiven Mensch-Roboter Kollaboration gewählt. Durch die Anforderungen des Anwendungsfalls an die Robotersteuerung hinsichtlich reduzierter Geschwindigkeit, Kraft und Leistung des Systems erleichtert eine Abschätzung der Machbarkeit unter bewusster Berücksichtigung von möglichen Nachteilen der verteilten Steuerungsarchitektur.

Diese verteilte Steuerungsarchitektur, die eine Trennung der Roboterhardware von seiner Steuerungssoftware postuliert, ordnet sich im Referenz-Architektur-Modell für Industrie 4.0 (siehe Abbildung 1) wie folgt ein:

- Der Industrieroboter implementiert als „Field Device“ die Layer „Integration“ und „Kommunikation“
- Die Steuerung implementiert als „Control Device“ die Layer „Kommunikation“ und „Information“

Damit überschneiden sich die beiden Teile des Cyber-Physischen Systems auf der Kommunikationsschicht, die jetzt einer weiteren Analyse unterzogen wird. Es wird festgestellt, welche Anforderungen der Robotersteuerung mit den Kapazitäten einer Netzwerkverbindung im privaten und öffentlichen Netz vereinbar sind und welche Industrierobotersteuerungsfunktionen sich damit plausibel in eine virtualisierte Umgebung auslagern lassen.

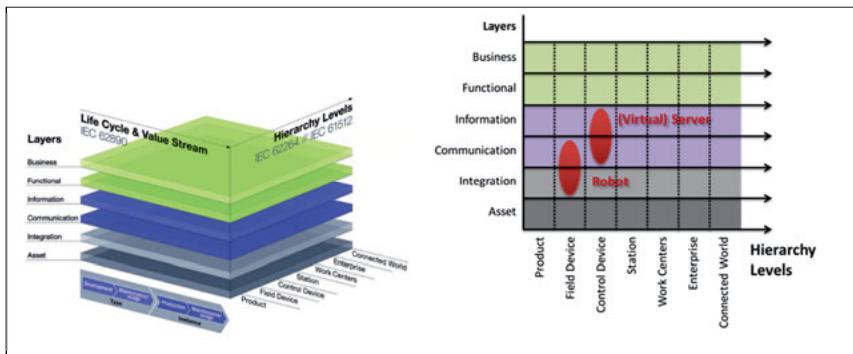


Abbildung 1: Referenz-Architektur Modell für Industrie 4.0 (RAMI)

## 5.2 Systemarchitektur und Virtualisierungsumgebung

Zur Untersuchung einer verteilten Robotersteuerung mit cloud-basierten Steuerungsdiensten wurde zunächst eine private Cloud Infrastruktur aufgebaut. Diese besteht aus einem Leistungsfähigen Server mit 20 Prozessorkernen mit Multithreading sowie 64 GB Ram. Der Server ist hinter einer Firewall ans Internet angebunden und kann mittels VPN in ein gemeinsames Netzwerksegment mit den zu steuernden Geräten und Maschinen gesetzt werden.

Auf dem Server läuft ein im Projekt „pPICASSO“ [1] entwickeltes echtzeit-fähiges Betriebssystem (Linux mit preempt-rt patch) mit einer Anpassung des QEMU-KVM Hypervisors. Diese Anpassung ermöglicht den Betrieb von ebenso echtzeitfähigen Virtuellen Maschinen (VMs), indem eine direkte Zuordnung von Prozessoren und Speicher zu einer jeweiligen VM festgelegt wird.

Jede VM beinhaltet einen selbständig laufenden Automatisierungsdienst (z.B. Bildverarbeitung oder Roboterbahoplanung) und bietet diesen über definierte Schnittstellen (z.B. OPC UA) an. Damit lassen sich die Dienste an mobile Endgeräte wie Telefone oder Tablets sowie untereinander verbinden.

Eine zentrale Herausforderung bei der Auslagerung von Automatisierungsfunktionen in virtuelle Maschinen ist die Einhaltung der Echtzeitanforderungen. Am Beispiel der Wirkkette numerischer Bewegungsteuerung (siehe Abbildung 2 links) wird deutlich, dass einige Funktionen (z.B. Lageregelung) sehr hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der Ausführungs-Umgebung und das Kommunikationsmedium haben. Diese lassen sich nicht so leicht in die Cloud verschieben, wie die Datenhaltung für Roboterprogramme.

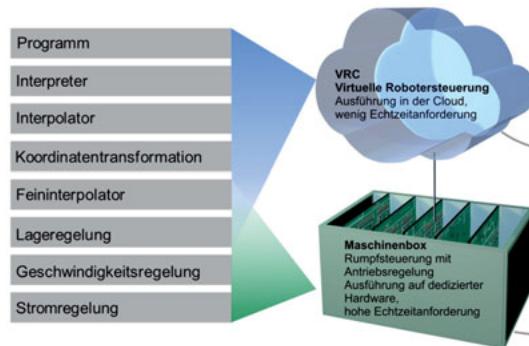


Abbildung 2: Bewegungssteuerung auf lokaler und cloud-basierter Ausführungs umgebung

In Abbildung 3 sind zwei verschiedene Zusammenstellungen von Diensten dargestellt, die so komplexe Automatisierungsfunktionen bilden. Die Augmented Reality Funktionalität (ARaaS) besteht aus den Diensten zur Bilderkennung, Bahnplanung und Simulation. Die Roboterprogrammierung und -steuerung dagegen aus Benutzerschnittstelle zur Programmerstellung, Bahnplanung und Ausführung der Bewegung. Ein Vorteil der dienste-basierten Steuerung ist dabei, dass zentrale Dienste wie Bahnplanung oder Bewegungsausführung in mehreren Anwendungsfällen verwendet werden können. Eine Änderung z.B. des Robotermodells muss dann nur einmal durchgeführt werden und ist sofort für alle anderen Nutzer des Dienstes verfügbar.

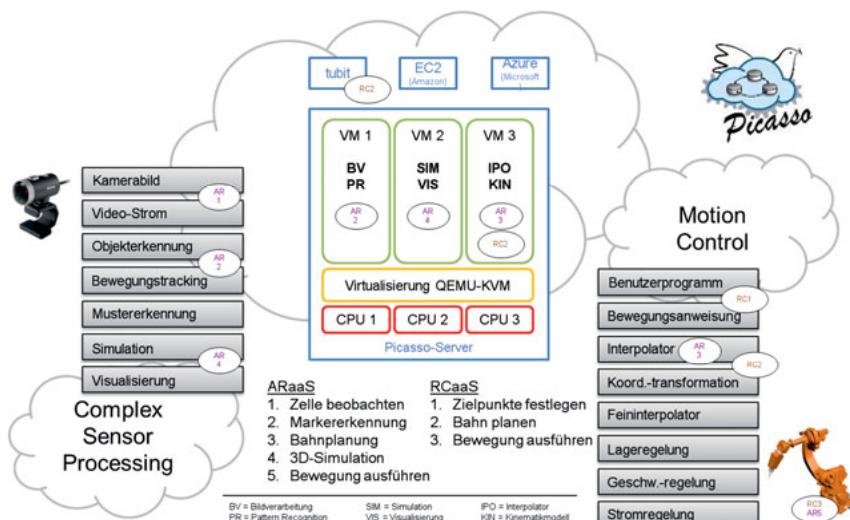


Abbildung 3: Systemarchitektur für cloud-basierte Automatisierungsdienste

## 5.3 Roboterprogrammierung mit Augmented Reality

Der erste Anwendungsfall für die Nutzung einer virtualisierten Umgebung für die Automatisierungstechnik ist die Roboterprogrammierung mit Augmented Reality [2]. Hier bietet die Verwendung von Cloud-Technology die Möglichkeit, komplexe Algorithmen wie Bildverarbeitung, Bahnplanung für Industrieroboter sowie eine 3D-Simulation der Roboterbewegungen auf eine leistungsstarke IT Infrastruktur auszulagern. Die in einer VM lauffähigen Dienste sind dann bei Bedarf skalierbar.

Die Interaktion mit dem Benutzer durch Eingabe der gewünschten Aktionen des Roboters und die Visualisierung der geplanten Fahrbewegung sind dann auf üblichen Endgeräten möglich. Die Zusammenstellung des Roboterprogramms geschieht auf Aufgabenebene z.B. bestehend aus den Grundbefehlen PICK, MOVE und PLACE. So lassen sich beliebige Abläufe programmieren und im Kamerabild simulieren. Diese Phase der Programmierung in generalisierten Bewegungsanweisungen erfolgt unabhängig vom Roboterhersteller und -modell, lediglich die 3D-Informationen der gewünschten Maschine sowie die kinematischen Beziehungen sollten verfügbar sein. Der tatsächliche Maschinencode für die herstellerseitige Ansteuerung der Motoren wird dann im zweiten Schritt automatisch generiert und an eine entsprechende Schnittstelle im Schaltschrank geschickt.

In Abbildung 4 ist der Datenfluss für eine aufgabenorientierte Programmierung dargestellt (rechts). Die Simulation und Darstellung der geplanten Bahn sowie des gesamten Roboters während der Bewegung findet direkt im Kamerabild statt (Augmented Reality). So können Fehler im Ablauf oder drohende Kollisionen frühzeitig erkannt werden, ohne den möglicherweise an dieser Position noch laufenden Prozess unterbrechen zu müssen.



Abbildung 4: Aufgabenorientierte Roboterprogrammierung mit Augmented Reality

Die cloud-basierte Roboterprogrammierung mit Augmented Reality ist durch die Verteilung der Komponenten sowohl direkt vor Ort, als auch über weitere Strecken möglich.

## 5.4 Industrieroboter-Bahnplanung mit RRT

Neben der klassischen Bahnplanung für Industrieroboter mittels Linear-, Zirkular- oder Point-to-Point-Interpolation gibt es auch Untersuchungen zur Eignung von sogenannten Sampling-basierten Methoden wie Rapidly Exploring Random Trees (RRT) [3]. Diese RRT-Bahnplanung ermittelt schrittweise die Bewegungsbahn vom Start zum Zielpunkt, wobei in jedem Teilabschnitt auf Erreichbarkeit, Randbedingungen wie feste Endeffektor-Orientierung oder auf Kollision mit der Umgebung geprüft werden kann. Sind nicht alle Bedingungen er-

füllt wird die Bahn in eine andere (zufällige) Richtung erweitert bis ein Weg vom Start zum Ziel gefunden wurde.

Ein Vorteil der Methode ist, dass die Exploration im Konfigurationsraum (Gelenkwinkel) stattfinden kann, die Prüfung der Bedingungen erfolgt dann für jeden Kandidaten nach Auswertung der Vorwärtsskinematik im Kartesischen Raum. Damit ist die z.B. in Singularitäten mehrdeutige Rückwärtsskinematik nicht notwendig. Ein Nachteil der Methode ist, dass in Abhängigkeit der Schrittweite und des Zufalls keine optimale Bahn gefunden wird. Außerdem ist die Berechnung einer vollständigen Bewegung mit großer Distanz sehr aufwändig.

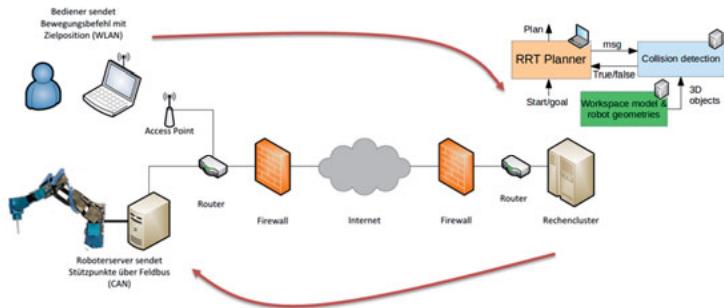


Abbildung 5: Verteilte Bahnplanung für Industrieroboter

Daher wurde in [3] untersucht und bestätigt, dass eine Auslagerung der rechenintensiven Algorithmen als Dienst in einer Virtuellen Maschine auf einem leistungsfähigen Server gegenüber der lokalen Ausführung auf einem Low-Power PC tatsächlich Zeit-Einsparungen bringen kann, wenn zusätzliche Randbedingungen mitgeprüft werden. Abbildung 5 zeigt schematisch den Laboraufbau zur Überprüfung der Machbarkeit und zeitlichen Auswirkung von verteilter Bahnplanung für Industrieroboter. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

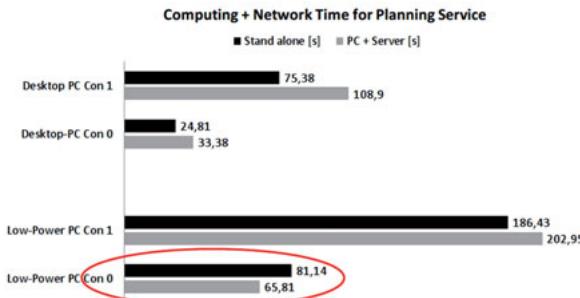


Abbildung 6: Ergebnisse der Zeitmessung für verteilte Bahnplanung mit RRT

## 5.5 Cloud-basierte Lageregelung mit variablen Zykluszeiten

Während die Funktionen zur Programmierung und Bahnplanung einer Klasse der Automatisierungsfunktionen angehören, die keine hohen Echtzeitanforderungen haben, sind die Regelkreise für Position, Geschwindigkeit und Drehmoment einer Roboterachse auf die zeitlich korrekt abgestimmte Übermittlung von aktuellen Messergebnissen angewiesen. Weicht die

tatsächliche Zykluszeit in einem Regelkreis von der für die Auslegung zugrunde gelegten Zykluszeit zu stark ab, sind Regelgütekriterien wie Einschwingzeit und Stabilität gefährdet. Das kann im manchen Fällen sogar zu Beschädigungen am Gerät oder der Umgebung bis hin zur Gefährdung der Gesundheit von Personen führen.

Es stellt sich also die (Forschungs-)Frage, ob auch Automatisierungsfunktionen mit geschlossenen Regelkreisen über die Cloud ausführbar sind und welche Bedingungen oder Einschränkungen bestehen. Die cloud-basierte Lageregelung eines Industrieroboters ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

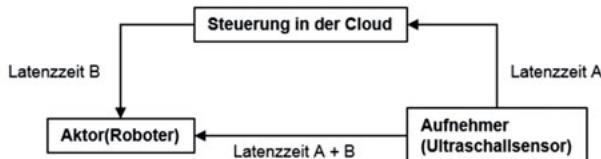


Abbildung 7: Schema zur Lageregelung in der Cloud

Es besteht eine netzwerkbedingt erhöhte Latenz zwischen der Messung am Sensor, der Berechnung der Stellgröße aus Soll- und Istwert sowie der Auswirkung am Roboter. Die Ausführung eines einfachen P-Reglers unter Einfluss dieser Latenz ohne Anpassung ist in Abbildung 8 links zu sehen. Mit zunehmenden Werten für die Latenz (im Experiment künstlich erhöht) verschlechtert sich das Ergebnis in Form von starkem Überschwingen.

Auf der rechten Seite der Abbildung 8 ist das Ergebnis des gleichen Experiments, diesmal mit Adaption auf die Latenz, dargestellt. Unter Annahme, dass die Latenz als Totzeit und diese als erhöhte Verzugszeit in Systemen zweiter und höherer Ordnung auftreten, kann mit den Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick [4] eine Anpassung der Proportionalverstärkung wie folgt durchgeführt werden:

$$K_p = K_{p,\text{old}} \cdot \frac{0,071}{0,071 + \text{Latenz-0,3}} = 0,05 \cdot \frac{0,071}{0,071 + \text{Latenz-0,3}}$$

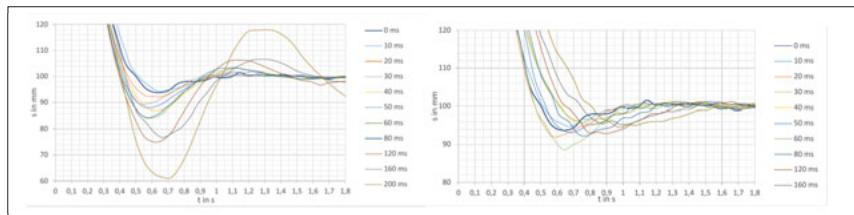


Abbildung 8: Ergebnisse cloud-basierter Lageregelung ohne (links) und mit (rechts) Latenzkompensation

Die latenzabhängige Anpassung des Reglers erfüllt nun alle Gütekriterien, allerdings bei reduzierter Prozessgeschwindigkeit durch schwächere Regler-Verstärkung.

Um die Prozessgeschwindigkeit bei latenzunabhängiger Stabilität und Güte zu erhalten, muss ein anderes Regelungsverfahren eingesetzt werden. Bereits 2009 berichteten Grüne u.a. über die Möglichkeit mittels prädiktiver Verfahren, Verzögerung und Paketausfälle in Computer-Netzwerken zu kompensieren [5].

Ein auf die Automatisierungstechnik angepasstes Verfahren für die Lageregelung von Industrierobotern wurde dann mittels modellprädiktiver Regelung (MPC) unter Wiederverwendung der Steuertrajektorie gefunden [6]. Dieses Verfahren ermöglicht geschlossene Regelkreise in der Cloud ohne zum Zeitpunkt der Reglerauslegung die Netzwerkanbindung und die daraus resultierenden Latenzen zu kennen. Die Architektur der MPC aus der Cloud ist in Abbildung 9 links dargestellt.

Zunächst wird das Modell der Roboterachsen (Model) an den Automatisierungsdienst für die MPC übertragen und die Regelung initialisiert. Anschließend erfolgt nach Bedarf die Aktualisierung der Führungsgröße (Reference). Parallel tauschen der MPC Dienst und der Roboter in schnellstmöglichen Abständen die Werte für Regelgröße (Position) und Stellgröße (Torque) aus. Die in der MPC generierte Steuertrajektorie wird dabei für die kleinstmögliche Basis-Zykluszeit ermittelt. Sollte sich diese Zykluszeit durch kurzfristige oder andauernde Veränderung der Latenz oder sogar durch Verbindungsabbruch erhöhen, werden zuvor berechnete Teile der Steuertrajektorie weiter verwendet und erst bei erneutem erfolgreichen Eintreffen des nächsten Steuerpaketes aktualisiert (siehe Abbildung 9 rechts).

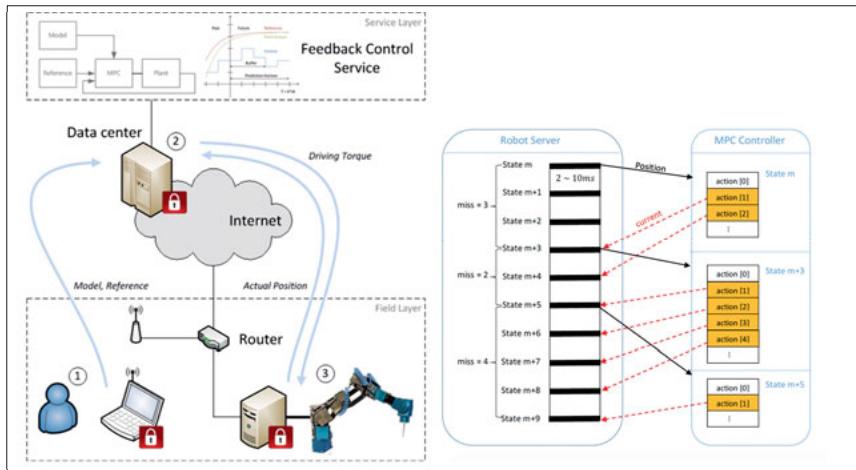


Abbildung 9: Modellprädiktive Regelung aus der Cloud

Die entsprechenden Experimente haben gezeigt, dass eine cloud-basierte Lageregelung aus einer Virtuellen Maschine mit einer Basis-Zykluszeit von 5 Millisekunden möglich ist. Mit einer synchronen Netzwerkkommunikation und einem Prädiktionshorizont von 20 können Verzögerungen und Paketverluste bis zum 20-fachen der Basis-Zykluszeit erkannt und kompensiert werden. Es wird dabei die „optimale“ Steuertrajektorie der modellprädiktiven Regelung weiterverwendet. Die Neuoptimierung der Trajektorie erfolgt dann erfolgreicher Wiederherstellung der Kommunikation und Eintreffen neuer Messwerte.

Die Robustheit der Führungsübertragung konnte so gezeigt werden. Bisher wurden noch keine Untersuchungen zur Robustheit der Störübertragungsfunktion durchgeführt.

## 5.6 Zusammenfassung und Ausblick

Für die erfolgreiche Transformation der Produktionstechnik von klassischer hierarchischer Fabrikorganisation zur voll digitalisierten und vernetzten Industrie 4.0 spielt die Automatisierungstechnik eine wichtige Rolle. Am Beispiel der Steuerung für Industrieroboter sind in dieser Arbeit verschiedene Möglichkeiten und Herausforderungen für die Modularisierung und Auslagerung von Automatisierungsfunktionen aufgezeigt.

Die Robotersteuerung kann entlang der Wirkkette der numerischen Bewegungssteuerung schichtenweise modularisiert und als eigenständige Dienste in Virtuellen Maschinen (VMs) ausgeführt werden. Entsprechende Kommunikationschnittstellen sorgen für die notwendige Vernetzung der standortunabhängigen Dienste.

Zunächst wurden Robotik-Funktionen untersucht, die nicht kritisch von der Qualität der Netzwerkanbindung abhängen. Die Dienste für Programmierung und Bahnplanung für Industrieroboter arbeiten dabei mit generalisierten Koordinaten, die vom Roboterhersteller unabhängig die Bewegung des Roboters im Raum definieren. Zum Zeitpunkt der Übertragung zur physischen Maschine werden die Daten auf das Zielsystem umgerechnet.

Ein Klasse von Prozessen mit hohen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der Kommunikationsverbindung sind die geschlossenen Regelkreise. Experimente haben gezeigt, dass selbst diese Prozesse in der Cloud ausführbar sind, obwohl die Echtzeitfähigkeit von (öffentlichen) Weitverkehrsnetzen oft durch schwankende Latenzen oder temporär reduzierter Bandbreite beeinträchtigt wird. Hier können prädiktive Regelungsmethoden zumindest eine stabile Führungsübertragung gewährleisten. Die nächsten Schritte befassen sich mit der Analyse der Störübertragung unter Einfluss von Ausfällen und Verzögerung in der Kommunikation.

## 5.7 Literatur

- [1] Projekt pICASSO: Industrielle CloudbASierte SteuerungsplattfOrm für eine Produktion mit Cyber-physischen Systemen. Im Internet verfügbar <http://www.projekt-picasso.de/>. Zuletzt aufgerufen am 11.03.2016
- [2] Guhl, J.; Vick, A.; Lambrecht, J.; Krüger, J.: Cloudsteuerung für Industrieroboter: Integrationsansätze. *Industrie 4.0 Management* (2016) 2, S. 1-4
- [3] Vick, A.; Vonasek, V.; Penicka, R.; Krüger, J.: Robot control as a service — Towards cloud-based motion planning and control for industrial robots. *IEEE 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*, S. 33-39, Poznan, 2015
- [4] Kun Li Chien, J. A. Hrones, J. B. Reswick: On the Automatic Control of Generalized Passive Systems. In: *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers.*, Bd. 74, Cambridge (Mass.), USA, Feb. 1952, S. 175–185
- [5] Grüne, L.; Pannek, J.; Worthmann, K.: A prediction based control scheme for networked systems with delays and packet dropouts. *Decision and Control*, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. *CDC/CCC 2009*. Proceedings of the 48th IEEE Conference on , vol. no., pp.537,542, 15-18 Dec. 2009
- [6] Vick, A.; Guhl, J.; Krüger, J.: Model Predictive Control as a Service – Concept and Architecture for Use in Cloud-based Robot Control. *IEEE 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2016

## 6 Steuerungstechnisches Engineering von Maschinen und Anlagen im Kontext Industrie 4.0

*S. Scheifele, A. Lechler, A. Verl*

### 6.1 Einleitung

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 zielt darauf ab, die deutsche Industrie für die Zukunft der Produktion zu rüsten. Diese ist gekennzeichnet durch eine starke Individualisierung der Produkte nach Kundenwunsch, geringen Losgrößen aber unter Bedingungen einer (Großserien-)Produktion. (nach [1])

Die Individualisierung von Produkten nach Kundenwunsch wird jedoch im Allgemeinen nicht ausreichend in der Konzeption einer neuen Fertigungsanlage berücksichtigt werden können, besonders dann nicht, wenn der Markt aus z.B. modischen Gründen den Einsatz neuer Technologien fordert. Es wird deshalb erwartet, dass Maschinen und Anlagen zukünftig noch öfter umgerüstet und erweitert werden müssen. Es muss also im Kontext von Industrie 4.0 nach neuen Möglichkeiten im Engineering von Maschinen und Anlagen gesucht werden, um diese Umrüstungen möglichst kostengünstig gestalten zu können.

### 6.2 Das Forschungsprojekt „CassaMobile“

Im Forschungsprojekt „CassaMobile“ [1], welches 2013 begann, wurde ein mobiles, flexibles und modulares Produktionssystem in einem ISO-Container entwickelt, welches – ganz im Sinne von Industrie 4.0 – leicht und schnell auf die Herstellung verschiedener Produkte angepasst werden kann. Eine Anpassung ist dabei durch das Hinzufügen oder Entfernen von Fertigungseinheiten (Einzelmaschinen) möglich. Dadurch kann ein optimal an das zu fertigende Produkt angepasstes Fertigungssystem erreicht werden.

Das Forschungsprojekt „CassaMobile“ definiert die Fertigungseinheiten als abgeschlossene mechatronische Einheiten, welche alle mechanischen und elektrischen Komponenten enthalten um ihre vorgesehene Funktion zu erfüllen. Dabei brauchen die Fertigungseinheiten selbst kein eigenes Steuerungssystem zu besitzen, sondern können von einem zentralen aus gesteuert werden. Die Steuerungskonfiguration und -Parametrierung wird automatisiert aus Informationen generiert, welche durch den Fertigungseinheiten zugeordnete Speicher bereitgestellt werden. Die Speicher wurden unter dem Namen „Configuration and Information Memory“ (CIMory) eingeführt. Die CIMory können nun die Informationen selbst oder eine Speicherreferenz enthalten, unter welcher die Informationen abrufbar sind. Als mögliches Ziel der Speicherreferenz sind die Steuerung der Fertigungseinheit, der CassaMobile Container oder auch eine Industrie 4.0 Cloud genannt.

Im Forschungsprojekt „CassaMobile“ hat man diese Vision prototypisch umgesetzt: Durch das Einbringen eines CIMory wurden Fertigungseinheiten identifizierbar und konnten die zur Konfiguration und zum Betrieb notwendigen Daten selbst bereitstellen (vgl. Abbildung 1). Über die Feldbuskommunikation des Steuerungssystems können diese ausgelesen und durch geeignete Generatoren zur Konfiguration und Programmierung des Steuerungssystems genutzt werden.

Für die Projektierung wird zunächst der Feldbus nach CIMory-Terminals abgesucht. Durch Auslesen jedes einzelnen CIMory werden alle am Feldbus vorhandenen Fertigungsmodule identifiziert und eine Speicherreferenz bekannt unter welcher die Moduldaten erreichbar sind.

Der Steuerung sind danach Informationen über die Werkzeugmaschine bekannt wie z.B.:

- Vorhandene Maschinenmodule und Layout des Feldbussystems,
- Benötigte SPS-Programmbausteine (POU) aller Maschinenmodule,
- Klemmenbelegung der Maschinenmodule (Zuweisung der symbolischen Namen der SPS-Programme auf Feldbus-Aus- und -Eingänge),
- Parameterlisten der CNC-Achsen.

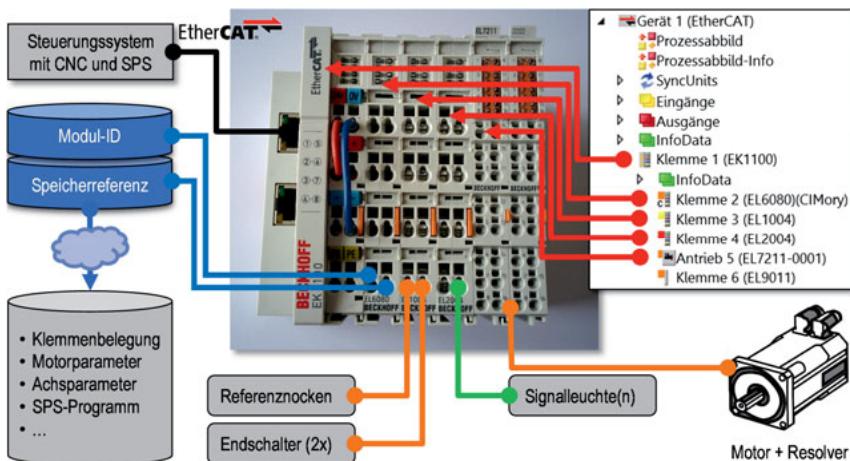


Abbildung 1: Feldbuskomponenten

Beziehungen zwischen verschiedenen Fertigungseinheiten, die für die steuerungstechnische Realisierung von Bedeutung sind, werden ebenfalls durch Informationen der CIMory beschrieben. Die Konfiguration und Parametrierung der Steuerungssysteme nach dem Verbinden der Fertigungseinheiten erfolgen automatisiert [3][4].

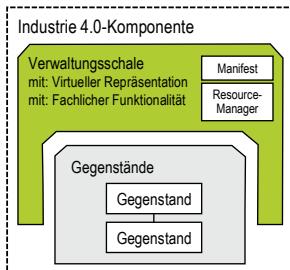
Es wurde im Rahmen dieses Projektes erkannt, dass damit nicht nur autarke Fertigungseinheiten als Ganzes, sondern auch eine weitere Aufteilung in sie aufbauenden Maschinenmodule betrachtet werden kann, da eine Beschreibung für die bestehenden Querbeziehungen gefunden wurde, selbst wenn diese „nichtdingliche“ Steuerungsanforderungen (z.B. Gantry, Softwarelizenzen, Spline- oder HSC-Option) sind. [3]

## 6.3 Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)

Genau das Gleiche beschreibt im Kern die Verbändeplattform Industrie 4.0 von BITKOM, VDMA und ZVEI aus dem Jahre 2015. Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) [5] bindet Komponenten und deren Informationen aneinander (vgl. Abbildung 2). Die Komponente liegt als Entität (als existierendes Ding) vor, der eine „Verwaltungsschale“ zugeordnet wird. Sie enthält die virtuelle Repräsentation, welche alle Daten zur Komponente bereithält. Diese Daten werden über eine Industrie 4.0-konforme Kommunikation von der

Komponente selbst oder dem übergeordneten IT-System bereitgestellt. Neben Daten enthält die Industrie 4.0-Komponente auch die fachliche Funktionalität. Diese kann beispielsweise Software zur Projektierung, Konfiguration, Bedienung oder Wartung der Komponente sein.

Der Begriff „Verwaltungsschale“ und der im Projekt CassaMobile zwei Jahre zuvor einge-führte Begriff „CIMory“ meinen also das Gleiche.



**Abbildung 2: Industrie 4.0 Komponente nach RAMI4.0 (nach [6])**

Dadurch, dass aber CassaMobile bereits Mechanismen zur Erkennung der Entitäten und auch den „digitalen Zwilling“ explizit realisiert hat, ist der CIMory-Begriff weiterentwickelt und konkreter. Insbesondere fehlt in RAMI4.0 im Gegensatz zum CassaMobile-Projekt ein An-satz, wie Steuerungen nach dem Erkennen der Entitäten automatisiert konfiguriert und para-metriert werden können, weil Querbeziehungen zwischen den Industrie 4.0-Komponenten seither nicht betrachtet werden.

## 6.4 Cyber-Physical Systems (CPS)

Um die Ideen der Projektierung von Industrie 4.0 Maschinen umzusetzen, muss nicht nur die Maschine selbst Industrie 4.0-tauglich werden, auch deren Module müssen Industrie 4.0-tauglich sein: Aus den Modulen werden „Cyber-Physical Systems“ (CPS). CPS sind nach [7] gekennzeichnet durch eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze.

Unter anderem ergibt sich daraus die Vision von adaptiven, sich selbst konfigurierenden und teilweise selbstorganisierenden, flexiblen Produktionsanlagen [8]. Im Rahmen des Zu-kunftsprojekts „Industrie 4.0“ der Bundesregierung werden aus CPS zusammengesetzte Pro-duktionsanlagen mit dem Schlagwort „Cyber-Physical Production System“ (CPPS) bezeich-net.

Das Referenzmodell geht dabei davon aus, dass die autarken Module rückwirkungsfrei anei-nander gekoppelt sind. Jedes Modul besitzt eine integrierte eigene Steuerung. Steuerungs-technische oder prozessmitteltechnische Querbeziehungen sind nicht vorgesehen. Das steht im Widerspruch zum Stand der Technik bei etablierten Herstellern von Produktionsmaschinen mit interagierenden Modulen.

Alle genannten Ansätze haben damit gemeinsam, dass sie den Stand der Technik im Enginee-ring von Maschinen zu wenig berücksichtigen.

## 6.5 Stand der Technik bei der Projektierung von modularen Maschinen und Anlagen

Produktionsanlagen werden heute hinsichtlich funktionaler, qualitativer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte entworfen. Da jedes Produktionssystem einzigartig ist - Produktionssysteme sind kein Massenprodukt - setzen zukunftsorientierte Anlagenhersteller deshalb auf ein systembasiertes Engineering, welches es erlaubt, eine Basisanlage um Komponenten aus einem mechatronischen Modulbaukasten [9][10] zu erweitern (vgl. Abbildung 3). Diese mechatronischen Maschinenmodule (MU, engl. „Machine Unit“) sind abgeschlossene Module, welche Mechanik und Elektrik enthalten und meist nur eine einzige oder wenige gleiche Aufgaben erfüllen kann [11]. Eine eigene Steuerung, welche das Modul nach Definition [12] zu einem „mechatronischen Modul“ machen würde, ist meist nicht enthalten – das Modul ist also ein unvollständiges mechatronisches Modul. Genaugenommen sind die Systemgrenzen eng um die tatsächlich in genau dieser Konstellation mehrfach verwendeter Einzelkomponenten gezo- gen.

Die Baukastenmodule liegen in verschiedenen, zueinander kompatiblen Alternativen varian-ten- und versionsbehaftet vor:

- Alternativen entstehen im Verlauf der Lösungsfindung und dienen dazu, durch die Gegenüberstellung möglichst vieler Lösungsmöglichkeiten für eine gegebene Aufga- benstellung, eine möglichst optimale Lösung aufzufinden [15].
- Varianten von Modulen entstehen durch Diversifikation, d.h. durch die Anpassung ei- ner Lösung an verschiedene Anforderungen. Sie bestehen zeitlich nebeneinander [16]. Alle Varianten einer Alternative haben die identischen mechanischen und elektrischen Schnittstellen und sind damit ohne Änderung der Umgebung gegeneinander aus- tauschbar.
- Versionen entstehen durch die Änderung einer Variante. Sie stellen die Entwicklungs- stufen der Variante dar und folgen chronologisch aufeinander. Eine neue Version wird beispielsweise dadurch notwendig, dass sich das Verhalten der Variante ändert. Dies geschieht z.B. durch mechanisches versetzen eines Endschalters einer Achse.

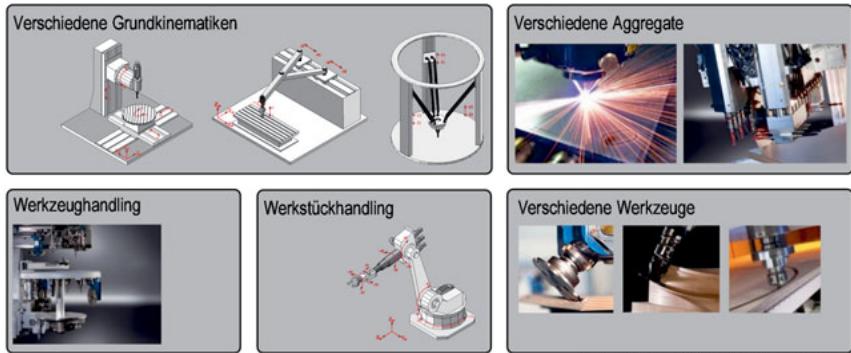
Bei den mechatronischen Maschinenmodulen (MU, engl. „Machine Unit“) eines Baukastens, wie beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt, handelt es sich also um zueinander kompatible, instanziierbare, versions- und variantenbehaftete mechatronische Einheiten meist ohne eigenes Steuerungssystem. Während des Entwicklungsprozesses eines neuen Moduls entstehen zudem die Alternativen eines Moduls, welche nur temporär im Baukasten existieren und anschließend nicht mehr zur Verfügung stehen.

Die einzelnen MU im Baukasten sind durch Metamodelle beschrieben [15][16][17]. Damit eine MU von einem Kommissionierungstool für den Aufbau einer Maschine oder Anlage verwendet werden kann, muss der zugrundeliegende Baukasten sämtliche hierfür benötigte Informationen über diese MU enthalten. Diese sind unter anderen:

- Elektro CAD (E-CAD)
- Mechanisches CAD (M-CAD)
- Programm der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS)
- Konfiguration der Computerized Numerical Control (CNC)
- Dokumentation

- und insbesondere Querbeziehungen und Abhängigkeiten zu anderen Modulen

Es ist somit ein umfassendes Wissen über die Informationen, welche für den Aufbau der Werkzeugmaschine benötigt werden, verfügbar. Das Engineeringssystem kennt damit alle Abhängigkeiten und Querverbindungen zwischen den Baukastenelementen. Durch eine funktionale Sichtweise wird die Produktionsanlage konfiguriert und um Baukastenkomponenten ergänzt. Nach [18] können so mit einer Basisanlage verschiedene Funktionsanforderungen mit minimalen Ressourcen erfüllt werden.



Bildquelle: ISG Stuttgart, Homag Group AG, TRUMPF GmbH + Co. KG

**Abbildung 3: Baukasten einer modularen Maschine (schematisch) [11]**

Die Projektierung einer neuen Werkzeugmaschine beginnt mit dem Kundenwunsch. Hieraus wird eine Anforderungsliste formuliert (vgl. Abbildung 4). Es wird unter anderem die Basismaschine bzw. der Maschinentyp ausgewählt, die geforderten Bearbeitungsmöglichkeiten und die Bearbeitungsqualität beschrieben, die zu verbauenden Maschinenoptionen bestimmt sowie eine durchschnittliche Fertigungszeit eines Referenzwerkstücks festgelegt.

Diese Anforderungsliste dient als Grundlage für die eigentliche Projektierung der Werkzeugmaschine. Der Entwicklungingenieur trägt sie in das verwendete Projektierungstool ein, welches unter Berücksichtigung von Kompatibilität, Querbeziehungen und Kombinationsmöglichkeiten eine Kommissionierungsliste erstellt, welche die Werkzeugmaschine als Gesamtheit ausgewählter MU des Baukastens beschreibt. Die zu den MU im Baukasten hinterlegten Informationen werden nun für den mechanischen und elektrischen Aufbau und auch für die Steuerung verwendet:

- Beim mechanischen und elektrischen Aufbau der Werkzeugmaschine werden die MU, wie vom Kommissionierungstool vorgesehen, an den mechanischen Schnittstellen der Basismaschine befestigt.
- Das SPS-Programm sowie die CNC-Konfiguration der Steuerung werden über die Informationen der Kommissionierungsliste generiert.

Abschließend erfolgt die Inbetriebnahme der Werkzeugmaschine. Diese besteht aus einem Komponententest, durch welchen auf korrekte Verkabelung sowie korrekte Funktion der einzelnen MU überprüft wird. Anschließend erfolgt der Softwaretest, welcher die Werkzeugmaschine als Ganzes anspricht. Hierzu gehört nicht nur die reine Bewegung der Werkzeugmaschine, sondern auch Fehlerreaktion, Genauigkeit und Produktivität. Durch anschließende Anpassungen und Optimierungen des generierten Programmes und Konfiguration der Steuerung wird die Werkzeugmaschine auf die Kundenanforderungen hin getrimmt. Erst hier kann

erkannt werden, ob die Werkzeugmaschine die Leistung erbringen kann, welche vom Kunden in der Anforderungsliste gefordert war.

Durch das abschließende Fertigen eines Referenzwerkstücks, welches in der Anforderungsliste festgelegt war, wird die Werkzeugmaschine vom Kunden abgenommen und gilt damit als auslieferfertig.

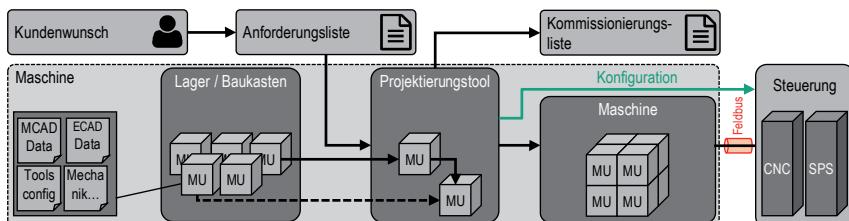


Abbildung 4: Referenzbild „Projektierung nach dem Stand der Technik (nach [11])“

Querbeziehungen zwischen MU werden im Projektierungstool erkannt. Dies gilt beispielsweise für die Achsen, die eine kinematische Kette bilden. Wie von CAD-Konstruktionen bekannt, dient dazu beispielsweise das Skelettmodell, welches jeder Komponente einen Ursprung sowie Andockpunkte (z.B. ein Flansch) für kinematisch nachfolgende Komponenten zuweist. Der Positionsunterschied zwischen Ursprung und Andockpunkt wird über einen Positionsvektor und eine Drehmatrix beschrieben (vgl. Abbildung 5). Hieraus lässt sich die Transformati-on der CNC ableiten.



Abbildung 5: Skelettmodell einer einfachen Werkzeugmaschine (schematisch)

Von den MU einer Maschine werden also nur die Achsen selbst erfasst. Über die Konfigurations- und Parametrieschnittstelle der Steuerungstechnik wird das Wissen über die Querbeziehung der Module in Form einer Transformationsanwahl und -parametrierung organisiert.

Prozesstechnische Querbeziehungen verursachen ohne Nennung zusätzliche MU und steuerungstechnische Erweiterungen: die Nennung einer MU „Pneumatische Spannzange“ in der Kommissionierungsliste verursacht automatisch die MU „Kompressormodul“, wenn sie zuvor nicht vorhanden ist oder tauscht dieses, falls notwendig, durch ein leistungsfähigeres Modul aus.

Mittlerweile wird über das Projektierungstool auch die passende Virtuelle Maschine (VM) zur Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) generiert. In [11] wurde gezeigt, dass der digitale Zwilling einer sehr komplexen Maschine mit 10 CNC-Achsen in 3 kinematischen Ketten, mehreren SPS-Achsen und 873 E/A in 58 MU mit 42 Querbeziehungen auf Knopfdruck automatisch aus einer originalen Kommissionierungsliste erzeugt werden konnte. Es wurde erkannt, dass in der VM das gesamte Konfigurationswissen – also sowohl die eingesetzten MU als auch sämtliche Querbeziehungen zwischen den Modulen bekannt sind. Z.B. ist das Skelettmodell direkt in der kinematischen Kette der VM hinterlegt.

Eine HiLS unterteilt sich primär in das Verhaltens- (BU, engl. „Behaviour Unit“) und das Geometriemodell (GU, engl. „Graphical Unit“). Zusammen ergeben sie das virtuelle Modul

(VU, engl. „Virtual Unit“), welches das virtuelle Äquivalent zur MU im Baukasten ist. (vgl. Abbildung 6)

Im Verhaltensmodell wird die mechanische und elektrische Logik, die Kinematik und Dynamik, als auch der Materialfluss modelliert. Auch Querbeziehungen zwischen den BU müssen nachgebildet werden, welche nicht über den Feldbus dargestellt werden, sondern nur durch Mechanik oder Prozessmittel bestehen.

Das Geometriemodell besteht aus den Hüllkörpern der CAD-Konstruktion der MU und dient der grafischen Darstellung, als auch für ein Kollisionsmodell der Maschine.

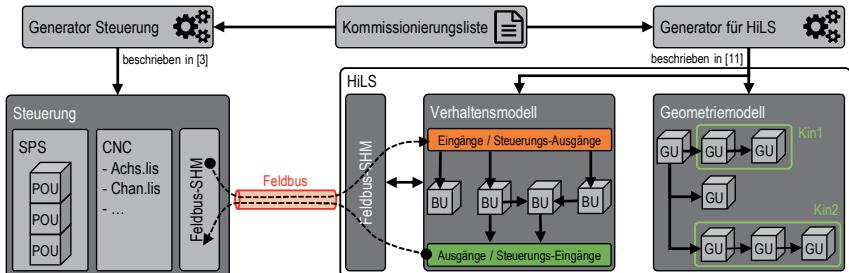


Abbildung 6: Aufbau einer HiLS [nach 11]

Beim Aufbau einer HiLS wird man darauf achten, dass die VU dieselben Systemgrenzen wie die MU besitzen (mechanische, funktionale, energetische und kommunikative Schnittstelle). Diese 1:1-Beziehung zwischen den MU und den VU führt dazu, dass die VU auf die gleiche Weise wie die MU projektiert werden können (vgl. [19], [11], Abbildung 7). Dies konnte in einer konkreten Anwendung nachgewiesen werden [11].

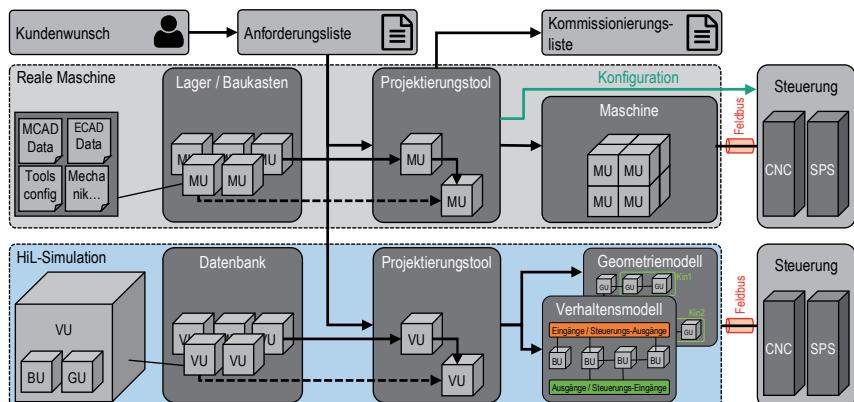


Abbildung 7: Gleiche Struktur zur Projektierung realer und virtueller Maschinen

## 6.6 Erweiterung von Maschinen und Anlagen

Individualisierte und modischen Trends unterworfene Produkte verlangen oft eine spätere Erweiterung einer Fertigungsanlage, denn kein Anlagenentwurf kann alle späteren Anforderungen wirtschaftlich erfüllen. Eine solche Erweiterung um eine neue, in der ursprünglichen

Kommissionierungsliste nicht enthaltene Komponente, führt zumindest zur Änderung des Feldbussystems. Meist sind zudem neue Maschinenfunktionen (M-Funktionen) in der SPS anzulegen, damit die Komponente die ihr zugeschriebene Aufgabe erfüllen kann. Damit einher geht die Implementierung neuer Verhaltenslogiken, welche nicht nur den Gutfall, sondern auch die primären Fehlerreaktion der Werkzeugmaschine im Fehlerfall abdecken muss. Hier sei angemerkt, dass nach Expertenmeinung [20] ca. 2/3 eines SPS-Programmes nur der Fehlererkennung und der primären Fehlerreaktion dienen. Lediglich 1/3 bilden die Funktionalität. Eine manuelle Anpassung der SPS ist deshalb und aufgrund der vielen im SPS-Programm formulierten Abhängigkeiten unmöglich.

Verlangt ein nachzurüstendes Aggregat eine weitere Maschinenachse, bedeutet dies eine Änderung der kinematischen Kette. Hierfür muss dann die passende Transformation ausgewählt oder gar eine neue Transformation geschrieben werden, wenn diese noch nicht in der CNC vorgesehen ist.

Für eine solche tiefgreifende Erweiterung einer Maschine muss nach dem Stand der Technik das unter 6.5 vorgestellte Engineering beim Maschinenhersteller nahezu von Beginn an wiederholt werden, denn nur so sind alle benötigten Informationen, Daten und Querverweise bekannt (vgl. Abbildung 4).

Ein Unsicherheitsfaktor, mit dem Hersteller von Maschinen dabei umgehen müssen, sind Änderungen an den Modulen der Werkzeugmaschine nach der Auslieferung, welche beispielsweise bei einer Wartung, vorgenommen wurden. Eine Dokumentation der Änderungen durch Rückführen der Informationen in den Baukasten des Herstellers und Anlegen einer neuen Version des Maschinenmoduls ist schwer zu organisieren und unterbleibt deshalb häufig. Ein Generator, welcher nur die Informationen des Baukastens kennt, würde dann mit der ursprünglichen Version des Maschinenmoduls arbeiten und die Ein- und Ausgänge falsch zuweisen. Die Steuerungskonfiguration wäre damit nicht korrekt und müsste manuell, zeit- und kostenintensiv durch einen Spezialisten angepasst werden. Eine solche nachträgliche Anpassung ist zudem fehleranfällig und bedarf anschließend einer kompletten Neuinbetriebnahme der Werkzeugmaschine.

Für den wirtschaftlichen nachträglichen Umbau von Maschinen und Anlagen muss also eine Lösung gefunden werden, welche den Baukasten des Herstellers nutzen kann und dennoch die singuläre Anpassung von Komponenten ermöglicht.

Im Folgenden soll dargestellt werden, wie durch Erweiterung der Ansätze nach 6.2, 6.3 und 6.4 bis die genannten Probleme reduziert oder sogar komplett ausgeräumt werden können.

## 6.7 Harmonisierung der Module der realen und der virtuellen Maschine

Insbesondere die Definition eines CPS legt nahe, MU, BU und GU verschmelzen zu lassen (vgl. Abbildung 8), sie als verschiedene Projektionen desselben Objektes zu verstehen. Dies hätte den Vorteil, dass sich die verschiedenen Projektionen nur konsistent entwickeln lassen. Durch Weglassen der MU-Projektion kann daraus die VM wie bekannt abgeleitet werden. Genauso gut könnte man wie seither die reale Maschine durch Weglassen der GU- und BU-Projektion entwickeln. Industrie 4.0 sagt aber etwas anders: in der Maschine bleiben CPS mit ihren Projektionen vollständig erhalten!

In [19] wurde bereits gezeigt, dass aus der VM automatisch eine Steuerung bestehend aus CNC und SPS konfiguriert und parametriert werden kann. Dazu mussten die Steuerungen lediglich an die VM angeschlossen werden und konnten damit auf alle notwendigen Informa-

tionen selbstständig zugreifen. Da mit dem CPS-Ansatz jetzt auch in der realen Maschine dieselben Informationen verfügbar sind, wird es möglich, an eine fertig aufgebaute Maschine die Steuerungen „leer“ anzuschließen: sie werden sich selbst die notwendigen Informationen aus den erkannten CPS besorgen.

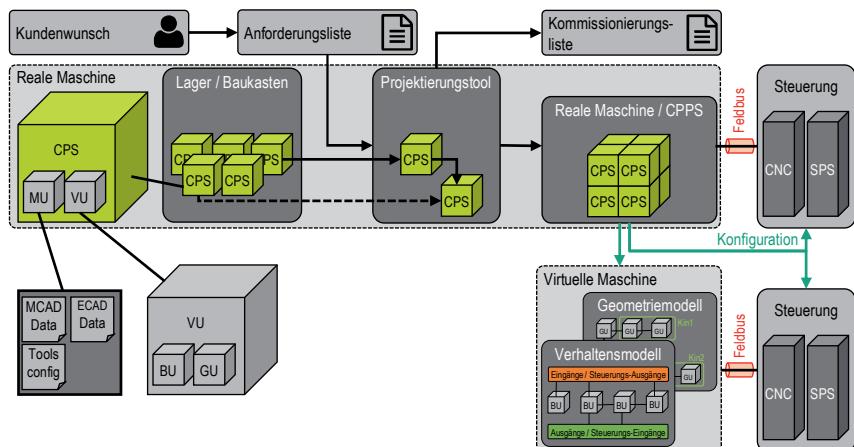


Abbildung 8: Projektierung eines CPPS aus einem CPS-Baukasten heraus

Wir nun eine solche Maschine umgebaut oder erweitert, so kann busgekoppelt erkannt werden, welche CPS nun vorhanden sind. Beim Aufbau der VM werden offene Abhängigkeiten durch nichtbelegte Ein- oder Ausgänge der BU erkannt. Offene Eingänge weisen auf prozess-technisch zusätzlich notwendige CPS hin, offene Ausgänge auf überflüssige CPS. Änderungen an der Kinematikkette lösen sich entweder dadurch auf, dass sich eine Verwendung der CPS in der Kette durch Betrachtung der mechanischen Schnittstellen, durch aktive Identifikation der verwendeten Schnittstelle des vorgelagerten CPS oder durch direkten Eingriff des Umrüsters in das kinematische Modell der virtuelle Maschine. Jetzt können die Steuerungen mit vorhandenen Fähigkeiten neu konfiguriert und parametriert werden – ohne dass auf den gesamten Engineeringprozess des Maschinenherstellers zurückgegriffen werden muss. Es kann erwartet werden, dass Inkonsistenzen dadurch ausgeschlossen werden, dass die CPS ihre hardwareseitige Ausprägung genau kennen und so die softwareseitige Ausprägung des Steuerungssystems durch den Generierungsvorgang passend kombinieren können.

## 6.8 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Artikel hat dargestellt, wie modulare Maschinen und Anlagen führender Hersteller aus einem Baukasten heraus speziell für einen Kunden projektiert werden. In gleicher Art und Weise werden auch virtuelle Maschinen und Anlagen für eine Hardware-in-the-Loop Simulation projektiert. Hierfür sind zusätzlich geeigneter Metainformationen notwendig.

Verschmelzen reale Maschinenmodulen mit virtuellen Maschinenmodulen der virtuellen Maschine zu einer Einheit, entsteht eine CPPS. Dieses erlaubt die automatische Steuerungskonfiguration und -Parametrierung, beispielsweise nach einem Umbau der Maschine.

## 6.9 Literatur

- [1] N.N.: „Zukunftsprojekt Industrie 4.0“, BMBF, Internet: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>. Zugriff am 01.05.2016
- [2] N. N.: CassaMobile. A Factory on the Go. Internet: [www.cassamobile.org](http://www.cassamobile.org). Zugriff am 15.02.2015.
- [3] Scheifele, S.; Verl, A.; Lechler, A.: Automatisierte Online-Steuerungs(re)konfiguration. In: *wt Werkstatstechnik online*, 7/8 2015. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2015.
- [4] Scheifele, S.; Friedrich, J.; Lechler, A.; Verl, A.: Flexible, self-configuring control system for a modular production system. In: *Procedia Technology*, Volume 15. Sys-Int2014, Bremen, 2014: Elsevier Ltd., 2014, 398-405, doi: 10.1016/j.protcy.2014.09.094.
- [5] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI): Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0), 2015.
- [6] BITKOM; VDMA; ZVEI: „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0“, Plattform Industrie 4.0, April 2015.
- [7] Geisberger, E.; Broy, M.: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, Bd. 1. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-29099-2.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2013): Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Internet: [https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme\\_Cyber-Physical\\_Systems.pdf](https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf), Zugriff am 28.11.2016.
- [9] Litto, M.; Korajda, I.; Mangold, C.; Angerbauer, R.; Hils, W.; Lerche, M.: Baukastenbasiertes Engineering mit Föderal. Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. Frankfurt am Main: VDMA Verl. (Software), 2004.
- [10] Angerbauer, R.; Buck, R.; Doll, U.; Hackel, M.; Eberhardinger, S.; Kayser, K.-H et al.: Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. Adaptierbares Moldellierungswerkzeug und Qualifizierungsprogramm für den Aufbau firmenspezifischer mechatronischer Engineeringprozesse; ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. Frankfurt, M.: VDMA-Verl, 2010.
- [11] Scheifele, S.; Verl, A.: Automatische HiLS-Generierung für komplexe Maschinen. Hardware-in-the-Loop-Simulationslösung für den variantenreichen Sondermaschinenbau. In: *wt Werkstattstechnik online* 106 (7/8), S. 501–505, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- [12] Pritschow, G.; Wurst, K.-H.; Kircher, C.; Seyfarth, M.: Control of Reconfigurable Machine Tools. In: H. ElMaraghy (Hg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer London, S. 71–100, 2009.
- [13] Scholz, W.: Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen. München: Hanser, 1989.
- [14] Spur, G.; Krause F.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. München: Carl Hanser, 1997.
- [15] Pesch D.: Baukasten für disziplinübergreifendes Projektieren, *iee*, 3, 2004.

- 
- [16] Litto, M.: Ist Mechatronik beherrschbar?, Intelligenter Produzieren, No.2, VDMA Verlag, 2006.
  - [17] Reuter A.: Definition eines mechatronischen Informationsmodells zur Modellierung von Automatisierungskomponenten und Maschinen. Verlag Dr. Hut, München; 2013.
  - [18] Reuter, A.; Kircher, C; Verl, A.: Manufacturer-independent mechatronic information model for control systems. Production Engineering 4, No. 2-3, pp. 165-173, 2010.
  - [19] Scheifele, S.; Verl, A.: Steuerungsgenerierung aus der virtuellen Maschine. Automatische Parametrierung und Konfiguration der Steuerung modular Werkzeugmaschinen für Industrie 4.0. In: wt Werkstatttechnik online 106 (5), S. 302–307, Düsseldorf. Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
  - [20] Pieloth, R.: Virtuelle Maschine ermöglicht schnelle Inbetriebnahme. In: MM Maschinenmarkt (41), Sonderdruck 2013.

## 7 Bewertung der Bauteilqualität in der Serienfertigung auf Basis NC-intern aufgezeichneter Daten

F. Wellmann, C. Brecher

### 7.1 Einleitung

Die industrielle Serienfertigung unterliegt einem wirtschaftlichen Optimierungsdruck. Ziel ist es, die maximale Ausbringung eines gewünschten Guts zu gewährleisten und zeitgleich sicherzustellen, dass dessen Produkteigenschaften innerhalb eines vorher definierten Toleranzfelds liegen. Die Tolerierung erfolgt hierbei bspw. über Form- und Lagetoleranzen nach ISO 1101 [1]. Diese bilden, wie in Abbildung 1 dargestellt, den Fokus der nachfolgenden Betrachtungen.

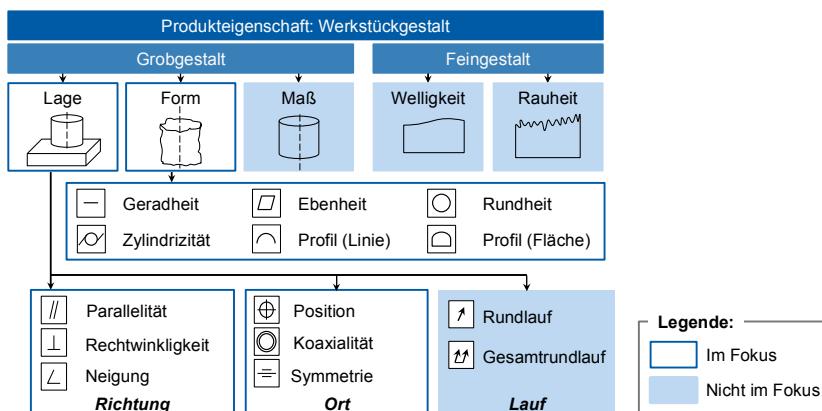


Abbildung 1: Qualitätsbeurteilung über die Werkstückgestalt, angelehnt an [2]

Systematische und zufällige Einflüsse führen dazu, dass ein einmal eingerichteter Fertigungsprozess statistischen Schwankungen unterliegt. Diese beeinträchtigen insbesondere die Produktqualität [3]. Um Serienprozesse trotz vielfältiger Störeinflüsse zu beherrschen, wird in der industriellen Praxis häufig eine Form der Statistischen Prozessregelung (engl.: Statistical Process Control, SPC) implementiert [4]. Unter SPC wird die kontinuierliche Überwachung von Fertigungsprozessen anhand ausgewählter Qualitätsmerkmale verstanden. In vordefinierten Intervallen werden die zu den Qualitätsmerkmalen gehörenden Messgrößen erfasst und in Qualitätsregelkarten aufgetragen. Durch Auswertung der Qualitätsregelkarten lassen sich negative Trends frühzeitig erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen einleiten.

Aktuell erfolgt die Qualitätsprüfung, d. h. die Messgrößenerfassung, allerdings zeitverzögert nach der Fertigung. Da es dabei zu längeren Wartezeiten kommen kann, wird in der Zwischenzeit möglicherweise produzierter Ausschuss oftmals nicht rechtzeitig erkannt. Darüber hinaus gestaltet sich die Messgrößenerfassung komplexer Bauteile als aufwendig, was zu einer Austauschbeziehung zwischen maximaler Prüfschärfe und resultierenden Prüfkosten führt. Um diesen Konflikt aufzulösen, wird im Folgenden die Nutzbarmachung NC-interner Maschinensignale angestrebt. Durch die Ableitung geeigneter Kennwerte soll eine Statistische

Prozessregelung in Echtzeit und mit einer Prüfschärfe von 100 % erschlossen werden. Die zugrundeliegende Forschungsfrage lautet:

*Mit welcher Präzision lässt sich die Bauteilqualität im Serienfertigungsprozess bereits auf Basis aufgezeichneter NC-Signaldaten abschätzen?*

## 7.2 Hybride Qualitätsabschätzung

Als Lösungsweg wird ein hybrider Ansatz vorgeschlagen, der sowohl NC-Signaldaten als auch physikalisches Modellwissen vereint (vgl. Abbildung 2). Durch die Integration von Modellwissen lässt sich die Prognosefähigkeit gegenüber rein datengetriebenen Ansätzen um ein Vielfaches steigern. Zudem sind kürzere Anlernphasen realisierbar. Die Kalibrierung des hybriden Modells zur Qualitätsabschätzung erfolgt anhand von Messrohdaten, die auf einer nachgelagerten Koordinatenmessmaschine ermittelt werden.

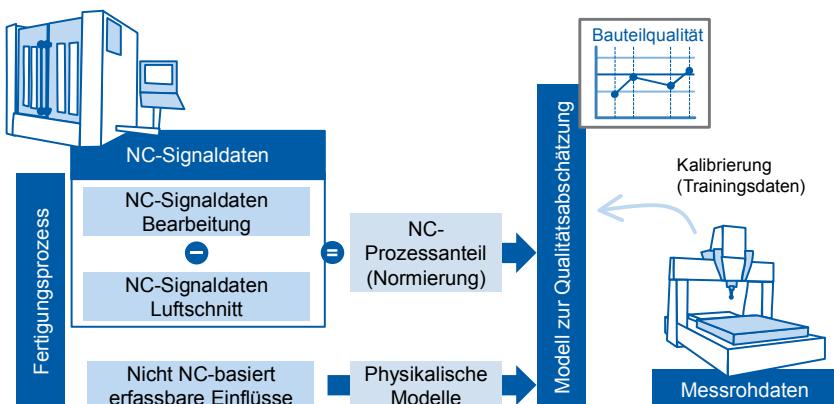


Abbildung 2: *Hybride Qualitätsabschätzung*

### 7.2.1 Erfassung und Vorverarbeitung von NC-Signaldaten

In einem ersten Demonstrator wurde die NC-Signaldatenerfassung an einem Bearbeitungszentrum der Baureihe Heller H2000 mit einer Steuerung des Typs Siemens Sinumerik 840D sl umgesetzt. Hierbei kam die Programmierschnittstelle Sinumerik Integrate zum Einsatz. Mit der implementierten Trace-Lösung lassen sich Achspositionen, Spindeldrehzahl und momen-tibildende Ströme im Servo-Takt von 2 ms erfassen. NC-Satzwechsel oder Werkzeugwechsel werden über Events mitverfolgt. Bei jedem NC-Start werden darüber hinaus das aktuelle NC-Programm, die aktuelle Werkzeugtabelle und die aktuelle Nullpunkttafel ausgelesen.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, findet eine Normierung der prozessparallel aufgezeichneten NC-Signaldaten statt, d. h. der nicht durch den Fertigungsprozess hervorgerufene NC-Signalanteil wird herausgefiltert. Hierfür wird das NC-Programm zunächst mehrfach im Luftschnitt ausgeführt. Die dabei aufgezeichneten NC-Signaldaten werden gemittelt und können anschließend mit den fertigungsparallel aufgezeichneten NC-Signaldaten zeitlich synchronisiert und von ihnen abgezogen werden.

Der notwendige, kartesisch-räumliche Bezug zwischen den NC-Signaldaten und den zu ermittelnden Qualitätsmerkmalen wird hergestellt, indem die im Zeitbereich aufgezeichneten Achspositionen mittels kinematischer Vorwärstransformation auf den TCP (engl.: Tool Center

Point) der Maschine zurückgerechnet werden. Im Falle des betrachteten Vier-Achs-Bearbeitungszentrums Heller H2000 ergibt sich folgende kinematische Kette zur kontinuierlich-prozessparallelen Berechnung der TCP-Koordinaten  $x_{TCP}$ ,  $y_{TCP}$ ,  $z_{TCP}$  sowie der Werkzeugorientierung in Einheitsvektornotation  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$ :

$$\begin{pmatrix} e_x & x_{TCP} \\ e_y & y_{TCP} \\ e_z & z_{TCP} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = T_{Wkst}^{Wz} (x_{Encoder}, y_{Encoder}, z_{Encoder}, b_{Encoder}) \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Hierbei sind  $x_{Encoder}$ ,  $y_{Encoder}$ ,  $z_{Encoder}$  und  $b_{Encoder}$  die aufgezeichneten NC-Positionssignale. Die affine Transformationsmatrix  $T_{Wkst}^{Wz}$  ist aus 4x4-Matrizen in homogener Koordinatenschreibweise zusammengesetzt, deren Reihenfolge und Gestalt sich nach [5] aus dem Aufbau der Maschine ergibt:

$$T_{Wkst}^{Wz} (x_{Encoder}, y_{Encoder}, z_{Encoder}, b_{Encoder}) = T_{Wz} \cdot T_y \cdot T_x \cdot T_z \cdot T_B \cdot T_{Wkst} \quad (2)$$

$T_x$ ,  $T_y$  und  $T_z$  sind die zu den drei Linearachsen komplementären Translations-Matrizen und  $T_B$  beschreibt die Rotation der B-Achse:

$$T_B = \begin{pmatrix} \cos(b_{Encoder}) & 0 & \sin(b_{Encoder}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(b_{Encoder}) & 0 & \cos(b_{Encoder}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

$T_{Wz}$  enthält den aktuellen Werkzeugkorrekturwert und ändert sich mit jedem Werkzeugwechsel, während in  $T_{Wkst}$  die vor dem NC-Start ausgelesenen Nullpunktverschiebungen des Werkstückkoordinatensystems (engl.: Workpiece Coordinate System, WCS) hinterlegt werden.

## 7.2.2 Abbildung der geometrisch-kinematischen Maschinenpräzision

Nicht alle qualitätsbestimmenden Einflussfaktoren lassen sich gesichert aus den NC-Signalen rekonstruieren. Hierzu zählt auch die geometrisch-kinematische Positionier- und Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine (vgl. Richtlinie VDI/DGQ 3441 [6]), die im unmittelbaren Zusammenhang zu den Positions- und Lagetoleranzen steht [7]. Obwohl Maschinenhersteller eine höchstmögliche Präzision anstreben, weist jede Maschine eine systematische Restabweichung auf [8]. Diese wird heutzutage meist softwarebasiert, z. B. mittels volumetrischer Ansätze [9], kompensiert. Dadurch steigt einerseits die Positioniergenauigkeit des TCP, andererseits wird der nach (1) berechnete Pfad volumetrisch verzerrt. Daher sind die transformierten NC-Signalen mit einem inversen Korrekturmodell zu verrechnen. Dieses kann entweder durch Invertierung NC-interner Korrekturtabellen oder experimentell, bspw. über einen Kreisformtest nach ISO 230-4 [10], ermittelt werden. Alternativ ist eine Parametrierung des Korrekturmodells basierend auf Maschinenabnahmeprotokollen nach ISO 230-1 [11] denkbar.

In Abbildung 3 ist das Ergebnis eines Kreisformtests dargestellt, der auf dem Bearbeitungszentrum Heller H2000 durchgeführt wurde. Die Kreisform wurde mit einer Double-Ball-Bar (DBB) des Typs Heidenhain DB110 direkt am TCP erfasst (blau). Zeitgleich wurden an den

Achs-Encoder NC-Signaldaten aufgezeichnet (rot). Zwischen den Messstellen liegen Strukturauteile und Führungen der Maschine.

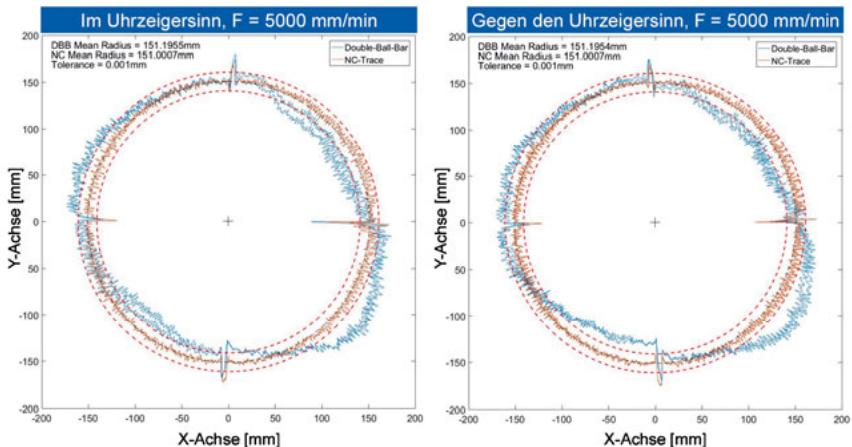


Abbildung 3: Gegenüberstellung Kreisformtest mit Double-Ball-Bar (blau) und NC-Signaldaten (rot)

Wie in Abbildung 3 verdeutlicht, zeichnen sich impulsartige Phänomene wie der Quadrantenübergang im NC-Signal ab. Der dem DBB-Messschrieb ebenfalls zu entnehmende Rechtwinkligkeitsfehler am TCP ist jedoch nicht in den NC-Signaldaten enthalten (vgl. [12]). Diese Differenz lässt sich mittels

$$T_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & S_{x,xy} & 0 \\ 0 & 1 & S_{y,xy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

durch eine affine Scherung des Raumes rekonstruieren, die der kinematischen Vorwärtstransformation (1) nachgelagert wird. Die Scherparameter lassen sich auf Basis der DBB-Messschriebe abschätzen. Hierfür wird zunächst eine elliptische Regression nach [13] durchgeführt, anschließend werden der Drehwinkel und das Verhältnis von Haupt- zu Nebenachse zur Berechnung von  $S_{x,xy}$  bzw.  $S_{y,xy}$  herangezogen. Alternative, ebenfalls auf einer DBB-Messung basierende Lösungen zur geometrisch-kinematischen Korrektur werden in [14], [15], [16] und [17] beschrieben.

### 7.2.3 Modellabgleich mittels Messrohdaten

Neben aufgezeichneten NC-Signaldaten und hinterlegten (Korrektur-)Modellen stellt die messtechnische Kalibrierung die dritte Kernkomponente des hybriden Modells zur Qualitätsabschätzung dar. Durch sie werden geeignete Schwellwerte für die zu überwachenden NC-Signaldaten ermittelt. Der vorliegende Lösungsvorschlag wurde mit Hilfe einer Koordinatenmessmaschine des Typs Zeiss PRISMO navigator und der Software Zeiss Calypso erarbeitet. Zeiss Calypso erlaubt den Export von Messrohdaten im ASCII-Format. Diese dienen als Trainingsdaten für die Kalibrierung des Qualitätsabschätzungs-Modells (vgl. Abbildung 2). Details des Vorgehens werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

## 7.3 Toleranzspezifische NC-Signaldatenauswertung

Unter toleranzspezifischer NC-Signaldatenauswertung wird die Zuordnung von NC-Signaldatenabschnitten zu vorher definierten Bauteiltoleranzen verstanden. NC-Signaldatenabschnitte stellen in diesem Kontext eine Analogie zu den Messelementen in der Koordinatenmesstechnik (vgl. [18]) dar. Ebenfalls analog können ein oder mehrere Messelemente zu einem sogenannten Prüfmerkmal zusammengefasst werden. Prüfmerkmale beschreiben die zugrundeliegende Auswertemethodik, z. B. nach [19].

Die lokale Aufzeichnung von NC-Signaldaten findet grundsätzlich kontinuierlich statt, eine Speicherung und Analyse aller Daten ist jedoch alleine aus Kapazitäts- und Ressourcengründen nicht zielführend. Mittels Start- und Stopp-Marken im NC-Programm, die durch die in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen NC-Satzwechsel-Events signalisiert werden, wird daher die Detektion von qualitätsrelevanten NC-Signaldatenabschnitten ermöglicht. In Abbildung 4 wird dies beispielhaft anhand einer Formtoleranz des Typs Rundheit veranschaulicht.

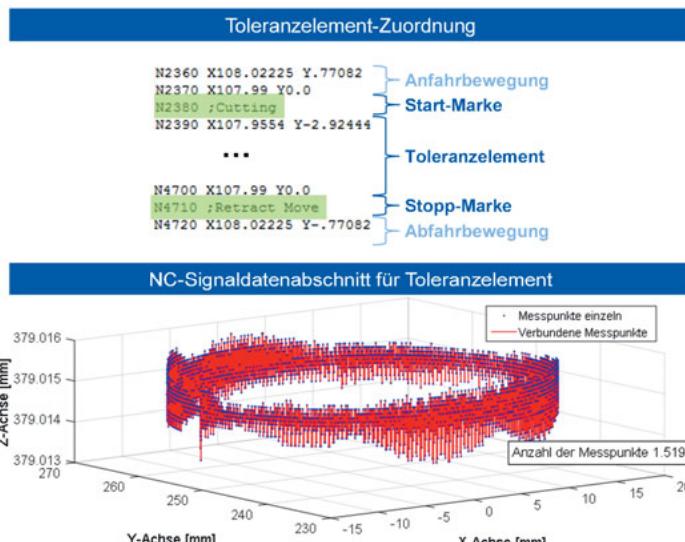


Abbildung 4: Marken im NC-Programm für Toleranzelement-Zuordnung

Alle zwischen den beiden Marken aufgezeichneten NC-Signaldaten werden so dem definierten Messelement zugeordnet. Folglich können in der nachgeschalteten Auswertelogik die zwischen den Satzwechseln aufgezeichneten NC-Signaldaten automatisiert gespeichert und in sogenannten Toleranzelement-Containern hinterlegt werden.

## 7.4 Mehrdimensionale Signaldatenanalyse und Kalibrierung durch maschinelles Lernen

In nach Bauteilinstanz gegliederten Toleranzelement-Containern werden modellbasiert korrigierte Achspositionen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Antriebsströme verknüpft. Um die als Zeitreihe gespeicherten Werte „klassifizierbar“ zu machen, werden sie segmentiert und in Kennwerte der deskriptiven Statistik überführt. Im Rahmen der durchgeföhrten Untersuchungen hat sich eine Kombination aus Median, Standardabweichung, Interquartilsabstand und Schiefe als zielführend erwiesen. Anschließend wird jedem Kennwert die Achse eines mehrdimensionalen Raums zugeordnet, sodass sich jedes Toleranzelement als Vektor bzw. Punkt darstellen lässt (vgl. Abbildung 5).

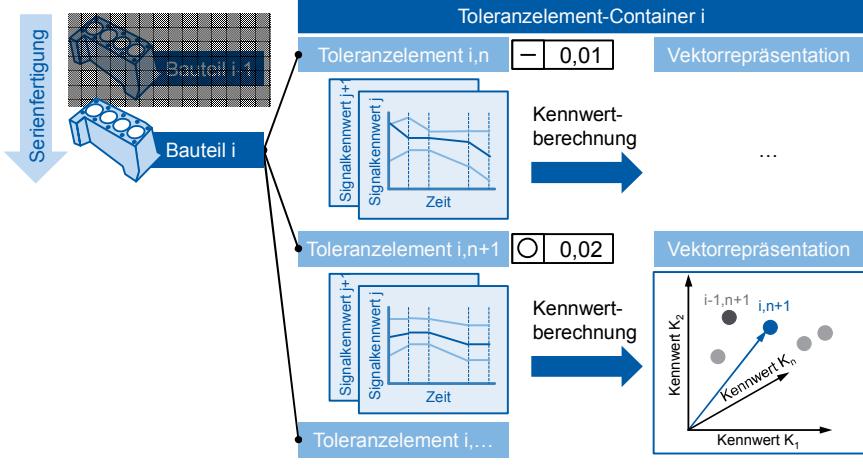


Abbildung 5: Zuordnung von NC-Signaldatenabschnitten zu Toleranzelement-Containern

Die auf diese Weise abgeleitete Vektorrepräsentation stellt die Grundlage für eine nachgelagerte Klassifizierung mittels maschinellem Lernen dar. Im Speziellen eignet sie sich für Algorithmen des überwachten Lernens (engl.: supervised learning). Hierbei dienen die in Zeiss Calypso ermittelten Messergebnisse als Trainingsdaten und ermöglichen so eine Kalibrierung des hierdurch aufgespannten Qualitätsabschätzungs-Modells. Im einfachsten Fall lässt sich anschließend eine binäre Klassifizierung nach „Toleranz eingehalten“ und „Toleranz verletzt“ vornehmen. Zur Steigerung der Prognosefähigkeit wurde im vorliegenden Fall jedoch eine Ordinalskala gewählt, die in Schritten von 5 % den Abstand zur Toleranzgrenze (sowohl in positiver als auch in negativer Richtung) berücksichtigt. Als Klassifizierungsalgorithmus wurde eine Support Vector Machine (SVM) mit Gaussian-Kernel/Radial-Basis-Funktion (RBF) verwendet [20]. Alternativ könnten aber auch Neuronale Netze oder Random Forests zu einem gleichwertigen bis besseren Ergebnis führen.

## 7.5 NC-Signal- und Messdatenabtastung

NC-Signaldaten werden im diskretisierten Zeitbereich, z. B. in Intervallen von 2 ms, Messdaten hingegen als äquidistante Positionsdaten im Raum, z. B. in Intervallen von 0,05 mm, auf-

gezeichnet (vgl. Abbildung 6). Die grundsätzlich voneinander abweichende Stützpunktanzahl zwischen den beiden Messmethoden lässt sich bereits mittels der in Kapitel 7.4 dargestellten Kennwertbildung lösen. Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen hat sich jedoch herauskristallisiert, dass eine starke Variation des Vorschubs auf dem NC-Bearbeitungszentrum, bspw. durch Betätigen des Feed-Override oder aufgrund gezielter Prozessanpassungen, die Prognosefähigkeit des vorgestellten Lösungsansatzes senken.

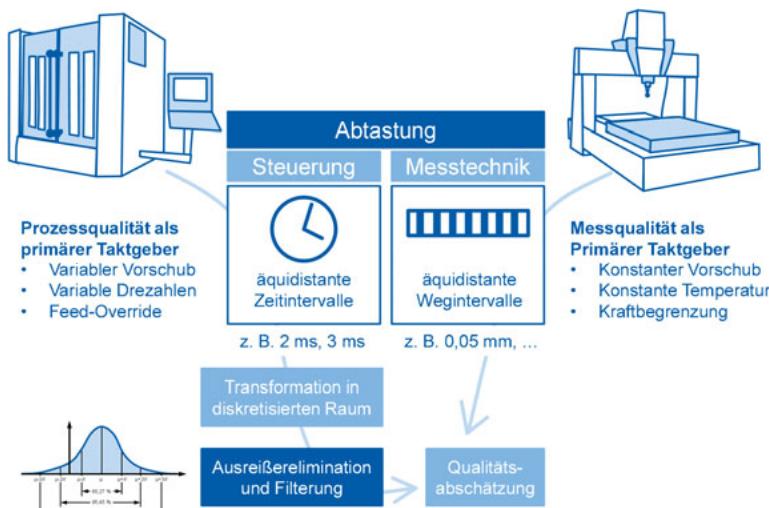


Abbildung 6: Harmonisierung der Signal- und Messdatenabtastung im Raum

Als robuste Lösung für Vorschubvariationen im Bereich von +/- 25 % hat sich hierfür eine analog zur Messtechnik durchgeführte Ausreißerelimination und Filterung der NC-Signaldaten mittels Gauß-Filter nach [21] bewährt. Eine optimale Prognosegüte setzt jedoch selbstverständlich ein für den Serienprozess eingefrorenes Parameterfenster voraus.

## 7.6 Industrielle Anwendung

Der bisher beschriebene Lösungsweg stellt, trotz modellbasierter Korrekturen, einen maßgeblich datengetriebenen Ansatz dar. Um die Aussagekraft und Robustheit solcher Ansätze zu gewährleisten ist eine langfristige Verlagerung des Forschungslabors auf den Hallenboden industrieller Fabriken unumgänglich. Nur so ist die Verfügbarkeit aktueller Eingangsdaten zu gewährleisten. Außerdem können so ein strukturelles Lernen und die zielgerichtete Weiterentwicklung der bestehenden Lösung erschlossen werden.

In Abbildung 7 ist das initiale Anwendungsszenario für eine Implementierung in der industriellen Serienfertigung skizziert. Dieses erstreckt sich über zwei Phasen:

- Kalibrierung des Qualitätsabschätzungs-Modells während der Prozessabnahme vor Fertigungsstart (engl.: Start of Production, SOP)
- Kontinuierliche, prozessparallele Überwachung der Serienfertigung

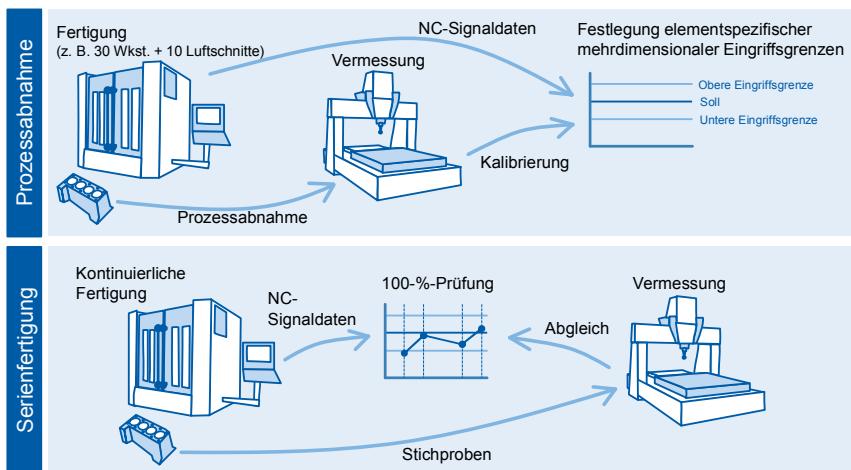


Abbildung 7: Industrielles Anwendungsszenario

Die Prozessabnahme vor dem SOP ist ein in der industriellen Praxis übliches Verfahren. Hierbei wird eine statistisch belastbare Anzahl an Probewerkstücken, z. B. 30 Stück, gefertigt und vermessen. Parallel zur Fertigung können nun aber auch NC-interne Daten aufgezeichnet, segmentiert und in den zuvor beschriebenen Toleranzelement-Containern abgelegt werden. Zur Normierung der Daten dienen zusätzlich durchgeführte Luftschnitte, die es ermöglichen die nicht durch den Prozess bedingten NC-Signalanteile herauszufiltern (vgl. Kapitel 7.2.1). Eine anschließende Bauteilvermessung dient dann einerseits dem heute üblichen Prozessfähigkeits-Nachweis, andererseits werden die dabei anfallenden Messrohdaten zur Kalibrierung des Qualitätsabschätzungs-Modells herangezogen. Als Resultat ergeben sich toleranzspezifische Eingriffsgrenzen. Diese werden in der zweiten Phase, d. h. während der Serienfertigung, zur Überwachung der NC-Signaldaten verwendet. Basierend hierauf erfolgt somit eine 100%-Prüfung in Echtzeit. Zur Detektion langfristig evtl. auftretender systematischer Daten-Drifts werden die NC-Signaldaten in regelmäßigen Abständen mit stichprobenartig vermessenen Werkstücken abgeglichen.

## 7.7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bewertung der Bauteilqualität auf Basis NC-intern aufgezeichneter Daten löst den Konflikt zwischen möglichst hoher Prüfschärfe und möglichst niedrigen Prüfkosten weitestgehend auf, ohne die klassische Messtechnik dabei gänzlich ersetzen zu wollen. In ersten Praxisversuchen konnte die Wirksamkeit des Gesamtkonzepts grundsätzlich nachgewiesen werden. Für Geradheits- und Rundheitstoleranzen im Bereich von 0,1 mm wurde eine Klassifizierungsgüte (innerhalb des in Kapitel 7.4 vorgestellten 5%-Rasters) von 97,6 % erreicht. Problematisch waren hierbei ausschließlich Rundheitstoleranzen. Im Bereich von 0,01 mm lag die Klassifizierungsgüte noch bei 90,4 %. Dabei wurden 98,8 % aller Testdatensätze hinsichtlich der Fragestellung, ob eine Toleranzverletzung vorliege, korrekt klassifiziert. Als Grundlage dienten 250 Testdatensätze von denen 150 Testdatensätze, d. h. 60 %, für das Training des Qualitätsabschätzungs-Modells herangezogen wurden.

Die zugrundeliegenden Versuche wurden unter kontrollierten Umgebungsbedingungen durchgeführt. Dabei hat sich die modellbasierte Datenvorverarbeitung bewährt, da sie an vielen Stellen eine Überanpassung (engl.: overfitting) verhindert. Dennoch ist an dieser Stelle eine Generalisierung und Übertragbarkeit auf beliebige Bearbeitungsfälle noch nicht möglich. Zur Stabilisierung und Verbesserung der Prognosegüte, insbesondere unter industriellen Störeinflüssen, sind in Zukunft weitere Faktoren zu berücksichtigen. Hierzu zählen vorrangig die Thermik [22] und der Verschleiß von Werkzeugen und Maschinenkomponenten. Aber auch der Einfluss von Bedienfehlern, bspw. schief eingespannten Werkstücken, ist zu untersuchen. Offene wissenschaftliche Fragestellungen existieren zudem hinsichtlich der Aussagekraft bei Prozesskräften unterhalb 5 N, die aufgrund der mechanischen Tiefpassfilterung zwischen Prozesswirkstelle und der Messstelle an den Achsencodern im Grundrauschen untergehen. Große Potenziale bestehen außerdem bei der Automatisierung des vorgestellten Lösungsansatzes.

## Hinweis

Im Rahmen dieses Beitrags werden kommerziell vertriebene Produkte namentlich erwähnt. Dies soll dem Leser die Nachvollziehbarkeit der zugrundeliegenden Arbeitsschritte ermöglichen. In keinem Fall impliziert dies jedoch, dass die Autoren für die Produkte werben oder deren Überlegenheit gegenüber möglicherweise angebotenen Alternativlösungen herausstellen wollen.

## 7.8 Literatur

- [1] DIN EN ISO 1101: 2008-08, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2004)
- [2] Keferstein, C.; Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 8. Aufl. Springer, 2015
- [3] Gu, J.; Agapiou, J.; Kurgin, S.: CNC machine tool work offset error compensation method. In: Journal of Manufacturing Systems, Volume 37/2, 2015, S. 576-585
- [4] Montgomery, D. C.: Introduction to Statistical Quality Control, 6<sup>th</sup> Edition. Hoboken: Wiley, 2009
- [5] Yang, J.; Altintas, Y.: Generalized kinematics of five-axis serial machines with non-singular tool path generation. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 75, 2013, S. 119-132
- [6] VDI-Richtlinie: VDI/DGQ 3441 Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen; Grundlagen, 2014
- [7] Schwenke, H.; Knapp, W.; Haitjema, H.; Weckenmann, A.; Schmitt, R.: Geometric Error Measurement and Compensation of Machines. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 54/2, 2008, S. 660-675
- [8] Flore, J.: Optimierung der Genauigkeit fünfsachsiger Werkzeugmaschinen. Dissertation, RWTH Aachen University, 2016
- [9] Xiang, S.; Altintas, Y.: Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 101, 2016, S. 65-78
- [10] ISO 230-4: Test code for machine tools – Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools. Norm, 2005

- [11] ISO 230-1: Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions. Norm, 2012
- [12] Dr. Johannes Heidenhain GmbH: ACCOM – Benutzer-Handbuch. Kapitel ‘Typische Messkurven eines Kreisformtests’. Firmenschrift, 2010, S. 225-246
- [13] Fitzgibbon, A. W.; Pilu, M.; Fisher, R. B.: Direct Least Squares Fitting of Ellipses IEEE Trans. PAMI, Vol. 21, 1999, S. 476-480
- [14] Zargarbashi, S. H. H.; Mayer, J. R. R.: Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46/14, 2006, S. 1823-1834
- [15] Lee, K.-I.; Yang, S.-H.: Accuracy evaluation of machine tools by modeling spherical deviation based on double ball-bar measurements. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 75, 2013, S. 46-54
- [16] Lee, K.-I.; Yang, S.-H.: Measurement and verification of position-independent geometric errors of a five-axis machine tool using a double ball-bar. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 70, 2013, S. 45-52
- [17] Jiang, X.; Cripps, R. J.: A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 89, 2015, S. 151-158
- [18] Carl Zeiss AG: CALYPSO Version 2014 – Bedienungsanleitung. Firmenschrift, 2014
- [19] DIN EN ISO 12181-1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Rundheit – Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit (ISO 12181-1:2011). Norm, 2011
- [20] Mohri, M; Rostamizadeh, A.; Talwalkar, A.: Foundations of Machine Learning. Cambridge, MA (USA): The MIT Press, 2012
- [21] DIN EN ISO 16610-1: 2015-11; Geometrische Produktspezifikationen (GPS)-Filterung- Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO 16610-1:2015)
- [22] Mayr, J.; Jedrzejewskic, J.; Uhlmann, E. et al: Thermal issues in machine tools. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 61/2, 2012, S. 771-791

## 8 Condition Monitoring in der Cloud

*A. Laghmouchi, E. Uhlmann*

### 8.1 Einleitung

Der globale Wettbewerb verlangt von Unternehmen wegen der stetigen Zunahme der Komplexität von Produkten, deren stärkerer Differenzierung nach Kundenwünschen den Einsatz von automatisierten und vernetzten Produktionsprozessen sowie eine steigende Flexibilität und Dynamik, um Kundeanforderungen gerecht zu werden. Aus diesem Grund stehen Unternehmen unter hohem Druck bezüglich Innovations- und Effizienzsteigerung, um auf den globalen Markt leistungsfähig zu bleiben [13, 18, 19]. Die Instandhaltung spielt für die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen des produzierenden Gewerbes zunehmend eine immer wichtigere Rolle [8, 19]. Nach Kuhn et al. [13] ist Instandhaltung als „wichtiger Erfolgsfaktor für den Produktionsprozess“ anzusehen. Diese stellt im betrieblichen Umfeld eine hohe Zuverlässigkeit der produktionstechnischen Maschinen und Anlagen zur Herstellung qualitativ hochwertiger und innovativer Produkte sicher und erhöht deren Verfügbarkeit [8]. Damit lassen sich ungeplante Betriebsunterbrechungen, die durch unerwartete Maschinenausfälle auftreten, vermeiden [10, 11].

Der steigende Einsatz komplexer Produktionsanlagen erfordert ein Umdenken bezüglich der Instandhaltungsstrategie. Beim Einsatz komplexer Produktionsanlagen entstehen beim Auftreten von Ausfällen neben den Kosten für Reparaturen insbesondere auch hohe Ausfallfolgekosten durch Produktionsstillstände [18, 19]. In einer Studie von Uhlmann et al. [24] wurde festgestellt, dass die Behebung von Maschinenstörungen an modernen Produktionsmaschinen in ca. 75 % aller Fälle eine Stillstandzeit von drei bis sechs Werktagen zur Folge hat. Als Hauptursachen konnten neben der Reaktionszeit der Maschinenhersteller vom Eingang der Fehlermeldung bis zum Vor-Ort-Termin, die Nichtverfügbarkeit von Ersatzteilen am Maschinenstandort sowie Schwierigkeiten bei der Diagnose identifiziert werden [24].

Die zustandsbasierte Instandhaltung bietet eine Möglichkeit zur Senkung dieser Stillstandzeiten, Steigerung der Maschinenverfügbarkeit und somit die Reduzierung von Instandhaltungskosten. In diesem Kontext werden Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom Verschleißzustand einer Produktionsanlage abgeleitet. Nach Schuh et al. [19] stellen die Verringerung der Umsatzausfälle durch die Reduzierung der Stillstandzeiten sowie die Reduktion der Instandhaltungskosten die Hauptvorteile dieser Instandhaltungsstrategie dar.

Die Realisierung der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie erfolgt auf Basis von Condition-Monitoring-Systemen. Diese Systeme erfassen, analysieren und ermitteln kontinuierlich den vorliegenden Zustand der Anlage und ihrer kritischen Komponenten. Für den Einsatz solcher Systeme in der Produktionsumgebung stellen vor allem hohe Investitionskosten ein Hemmnis dar [19]. Dies liegt zum einen daran, dass diese Systeme zur externen Erfassung von Daten Industriesensoren nutzen, die anwendungsspezifisch, kabelgebunden und kostenintensiv sind. Zum anderen unterscheiden sich die Condition-Monitoring-Applikationen in der Praxis stark voneinander, was wiederum die Flexibilität der Condition-Monitoring-Systeme erheblich beeinträchtigt. Zudem ist der Zugang zu den systeminternen Daten bei vielen Steuerungen nicht möglich wodurch die Nachrüstung von Bestandsanlagen mit einem Überwachungssystem auf Basis systeminterner Daten nicht einfach realisierbar ist.

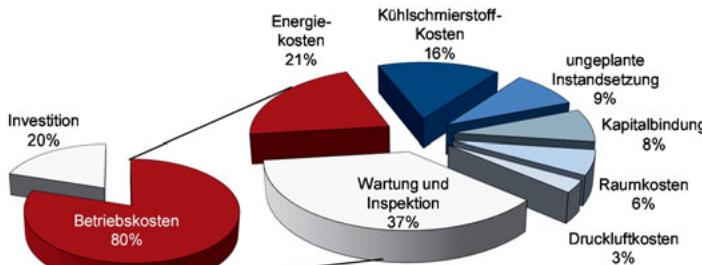
Der Branchenverband Bitkom schätzt das wirtschaftliche Potenzial der vernetzten Produktion für Deutschland bis 2025 auf bis zu 80 Milliarden Euro [4]. Zudem sieht eine Studie von McKinsey [15] die vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) als einen der Hauptanwendungsbereiche für das Internet der Dinge (IoT) und schätzt das Einsparungspotenzial auf bis zu 15 %.

tenzial bis 2025 auf bis zu 630 Milliarden USD. Nach dieser Studie werden durch den Einsatz von IoT-Technologien im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung zwischen 10-40 % Wartungskosten für Airlines reduziert. Im Bereich der Produktion lassen sich dadurch 20 % bis 40 % Wartungskosten für Produktionsanlagen und Medizinprodukte senken. Außerdem werden bis zu 50 % von Stillstandzeiten sowie 3 % des Investitionsbedarfs bei Investitionsgütern reduziert. Darüber hinaus lassen sich nach acatech [2] bis zu 20 % der Gewinnspanne beim Absatz von Maschinen und Anlagen durch das Anbieten von Dienstleistungen im Anschluss an den Verkauf der Maschinen und Anlagen erzielen.

Im Rahmen dieses Fachartikels werden ein Konzept und dessen Umsetzung zum Condition Monitoring in der Cloud auf Basis von Einplatinen-Computern und MEMS-Sensoren (Mikro-Elektro-Mechanisches-System) vorgestellt.

## 8.2 Stand der Technik

Die Kosten der Instandhaltung stellen in der Praxis einen erheblichen Anteil beim Betrieb von Produktionsmaschinen und -anlagen dar. Nach Abele [1] machen die Kosten der Wartung und Inspektion sowie ungeplanter Instandsetzung insgesamt 46 % der Betriebskosten einer Werkzeugmaschine aus. Diese hohen Kosten sprechen für den Einsatz von smarten Maintenance-Lösungen, wie z. B. Condition Monitoring. Abbildung 1 zeigt die operativen Kosten einer Werkzeugmaschine in Deutschland nach Abele [1].



*Abbildung 1: Operative Kosten einer Werkzeugmaschine in Deutschland nach Abele [1]*

Der Einsatz von Condition-Monitoring-Systemen spielt eine entscheidende Rolle zur Verfügbarkeitssteigerung von Produktionsmaschinen und zur Verringerung der Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie zur Verbesserung der Prozessqualität [22]. Allerdings sind am Markt verfügbare Monitoring-Systeme anwendungsspezifisch, teuer und nutzen in der Regel Industriesensoren zur Datenerfassung (z. B. Schwingungen). Diese Sensoren sind wiederum kostenintensiv und kabelgebunden. Im Gegensatz dazu sind die MEMS-Sensoren kostengünstig und hoch integrierbar. Zudem verbrauchen diese weniger Energie und sind konfigurierbar [3, 6]. In den letzten Jahren sind vermehrt leistungsfähige und kostengünstige MEMS-Sensoren für die Datenerfassung auf den Markt gebracht worden. Insbesondere MEMS-Sensoren aus dem Verbraucher- und Automotive-Bereich bieten eine großes Potenzial zur kostengünstigen Integration intelligenter Sensorsysteme und somit zu einer umfangreichen Nutzung in cyber-physicalen Systemen bzw. zur Implementierung von Diagnosesystemen für die vernetzte Produktion im Kontext von Industrie 4.0 [3, 9, 6]. Dies betrifft insbesondere die Integration zur automatisierten Zustandsüberwachung von Produktionsmaschinen. In diesem Kontext wurden z. B. MEMS-Beschleunigungssensoren bereits erfolgreich für Untersuchungen im Bereich der Schwingungsdiagnostik verwendet und somit ihre grundsätzliche Eignung für das Condition-Monitoring [22, 6] gezeigt. Außerdem wurde die Realisierung von kabello-

sen Sensornetzwerken mit Hilfe von MEMS-Beschleunigungssensoren bereits erfolgreich nachgewiesen [22].

In dem industriellen Umfeld wurden bislang MEMS-Sensoren aufgrund der hohen Anforderungen bezüglich Robustheit und Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsbedingungen, wie z. B. Feuchtigkeit, Performance, nicht eingesetzt. Ein Schwerpunkt von Industrie 4.0 ist die Vernetzung von Produktionsanlagen und Werkzeugen, Prozessen und Produkten untereinander sowie mit Lieferanten und Kunden. Der Einsatz von MEMS-Sensoren im Bereich der Verschleiß-, Zustands-, Prozess-, und Anlagenüberwachung ist auch ein aktuelles Thema von unterschiedlichen Forschungsprojekten. In diesem Zusammenhang entwickeln im Forschungsprojekt AMELI 4.0 [9] die Verbundpartner auf Basis von MEMS-Sensoren neue hochintegrierte, vernetzte, energieautarke Multisysteme mit intelligenter Datenverarbeitung auf Sensorebene bei hoher Daten- und Systemsicherheit. In einem weiteren Forschungsprojekt „Selbstadaptierende Sensorsysteme für eine akustische Zustandsüberwachung in Industrie 4.0-Anwendungen (ACME 4.0)“ wird ein selbstadaptierendes Sensorsystem auf Basis von MEMS-Sensoren zur Überwachungsanwendungen von Maschinen und Produktionsprozessen in Industrie 4.0 entwickelt [26].

## 8.3 Condition Monitoring in der Cloud

### 8.3.1 Anwendungsszenario

Ziel ist die Entwicklung und Umsetzung eines smarten Sensornetzwerk-Konzeptes zum smarten Condition Monitoring an unterschiedlichen technischen Anlagen. Das Konzept umfasst unter anderem Datenerfassung mittels MEMS-Sensoren, Signalvorverarbeitung, Merkmalsextraktion sowie die Klassifizierung auf der Sensorknotenebene (auf dem Raspberry Pi Modul). Zum anderen beinhaltet das Konzept die Datenübertragung der erzeugten Merkmale in die Cloud sowie die mobile Datenverteilung und -bereitstellung für unterschiedliche Anwender (z.B. Wartungstechniker). Mittels dieses entwickelten Sensornetzwerks lässt sich kostengünstige Integration intelligenter Sensorsysteme implementieren, welches zu einer ausgedehnten Verwendung in cyber-physischen Anlagen in verschiedenen Industriesektoren führt. Die Umsetzung vernetzter Produktion im Kontext von Industrie 4.0 kann dadurch realisiert werden. Das entwickelte Sensornetzwerk besteht aus mehreren Sensorknoten. Jeder Sensorknoten agiert unabhängig von den anderen Knoten und ist mit einem MEMS-Sensor zur Beschleunigung- und Temperaturerfassung ausgestattet. Die erfassten Messdaten werden auf jedem Knoten des Sensornetzwerks verarbeitet. Der Verarbeitungsprozess der Daten besteht aus mehreren Schritten. Zunächst werden die Rohdaten vorverarbeitet, z. B. Bandpass gefiltert. Danach werden aus dem vorverarbeiteten Signal Kennwerte (Merkmale) gebildet, z. B. statistische Kennwerte. Anschließend erfolgt die Klassifikation der berechneten Kennwerte zu einer der bekannten Fehlerzustände. Der Sensorknoten kann Daten in den Cloud-Server über eine drahtlose Verbindung senden. Je nach Anwendung lassen sich vorverarbeitete Rohdaten, extrahierte Merkmale oder Klassifizierungsergebnisse von jedem Knoten in den Cloud-Server transferieren. Im Cloud-Server stehen den Anwendern verschiedene Dienste wie z. B. für Datenaufbereitung, Datenvisualisierung, Generierung von Reporten über den vorliegenden Maschinenzustand oder die Durchführung von Trendanalysen anhand ausgewählter Signalkennwerte zur Verfügung. Diese Dienste lassen sich mit Hilfe eines mobilen Endgeräts von unterschiedlichen Anwendern, wie z. B. Servicetechnikern oder Wartungsplanern nutzen. Somit lässt sich der Zustand einer Produktionsanlage kontinuierlich überwachen und erlaubt eine zustandsbasierte Instandhaltung. Dieses Sensornetzwerk wurde am Beispiel der Überwachung von verschleißanfälligen Komponenten an Werkzeugmaschinen evaluiert. Hierbei wurde der vorgestellte Ansatz zur Überwachung von Kugelgewindetrieben an einem Achsprüfstand am

PTZ realisiert. Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung zu dem Sensornetzwerk an einer Produktionsanlage für Monitoring-Anwendungen.



Abbildung 2: Installation eines Funksensornetzwerks an der Produktionsanlage [2]

### 8.3.2 Komponentenspezifikation

Das realisierte Funksensornetzwerk auf Basis von Einplatinen-Computern, Raspberry Pi und MEMS-Beschleunigungssensoren setzt sich aus mehreren Sensorknoten zusammen. In der Tabelle 1 ist die Komponentenspezifikation dargestellt.

Tabelle 8-1: Spezifikation des Einplatinen-Computers Raspberry Pi und MEMS-Sensors LIS3DH

Raspberry Pi 2 Model B	Spezifikation	MEMS-Sensors	Spezifikation
Prozessor (Anzahl = 4)	ARM710	Messbereich	1 Hz to 5 kHz
Prozessor-Geschwindigkeit	900 MHz	Eingangsspannung	1.71 V to 3.6 V
RAM	1 GB	Dynamische, skalierbare Vollskala	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$
Speichertechnik	LPDDR2-SDRAM	Datenoutput	16 bit
Eingangsspannung	5 Volt	Betriebsbereich	-40 °C to +85 °C
Betriebssystem	Linux	Digitale Schnittstellen	I2C/SPI

### 8.3.3 Datenerfassung

Beim LIS3DH MEMS-Beschleunigungssensor handelt es sich um einen dreiachsigen Beschleunigungssensor [27]. Dieser wird zur Erfassung von Beschleunigungen in x, y und z-Richtung in der Nähe der Kugelgewindetrieb-Mutter einer Vorschubachse von einem Spitzenschliffmaschine verwendet. Da der Sensor über eine digitale Schnittstelle verfügt, werden die Beschleunigungssignale bereits auf der Platine des Sensors digitalisiert. Der Anschluss an den Einplatinen-Computer Raspberry Pi 2 Model B, erfolgt mit einem geschirmten zehnadrigen

gen Kabel über die GPIO-Schnittstelle (general purpose input/output). Diese Schnittstelle dient zur Verarbeitung von Ein- und Ausgangssignalen des Einplatinen-Computers, welcher die Funktion des Datenloggers übernimmt. Die Messapplikation wurde in C implementiert, welche die aufgezeichneten Beschleunigungsdaten in x, y und z-Richtung im .txt-Format speichert. Anschließend ist ein direkter Import in Datenverarbeitungssoftware möglich.

Zur Evaluierung der Lösung wurde eine Abtastrate von  $fs = 2,5$  kHz gewählt, welche die Überwachung eines Frequenzbereiches von 0 bis 1,25 kHz ermöglicht. Somit ist es möglich die ersten Harmonischen der Grundfrequenz für die höchste Drehgeschwindigkeit sowie mehrere Harmonische bei niedrigeren Drehgeschwindigkeiten zu überwachen. Die geringere realisierbare Abtastrate stellt eine Einschränkung des MEMS-Messsystems dar. Sie ist auf Restriktionen des Einplatinen-Computers zurückzuführen, mit welchem die Verarbeitung von maximal jeweils 3700 Abtastwerten pro Messrichtung je Sekunde realisierbar ist. Hierbei ist das Ziel, die grundlegende Eignung eines kostengünstigen MEMS-Beschleunigungssensors für das Condition Monitoring zu prüfen. Abbildung 3 zeigt den Aufbau der Messkette mit dem Einplatinen-Computer und MEMS-Sensor zur Beschleunigungsdatenerfassung.

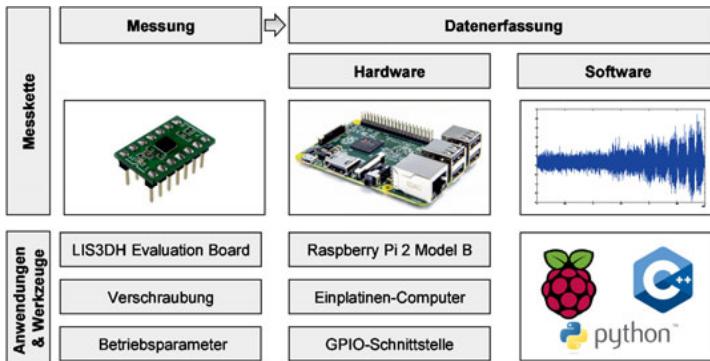


Abbildung 3: Datenerfassung mit einem Raspberry Pi und MEMS-Beschleunigungssensor

### 8.3.4 Kommunikationsarchitektur

Die Kommunikation zwischen den Sensorknoten und dem Cloud-Server erfolgt über MQTT (Message Queue telemetry Transport). MQTT ist ein Nachrichten-Protokoll, das für die Übertragung von Telemetrie-Daten insbesondere in Bereichen mit begrenzter Netzwerkkapazität verwendet wird. Bei diesem Protokoll handelt es sich um ein Machine-to-Machine-Protokoll (M2M-Protokoll). Es ist somit ein wichtiger Bestandteil des Industrial Internet of Things (IIoT). Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung der Kommunikation zwischen den Komponenten des Sensornetzwerks in der Produktionsumgebung. Die Daten (z. B. erzeugte Kennwerte) werden über eine drahtlose Verbindung an einen zentralen Verteiler, den sogenannten Broker, gesendet (Publish). Der Sendeprozess dieser Daten kann als Verschicken von Nachrichten interpretiert werden. Dabei sind nur die Daten eines Kennwertes enthalten. Es werden also solange Nachrichten verschickt, bis die Daten (z. B. Zahlenwerte eines Merkmals) aller erzeugten Kennwerte (Merkmale) gesendet worden sind. Sind die Nachrichten bei dem Broker angekommen, werden diese von einem externen Server, dem sogenannten „Subscriber“ angefordert. Dieser sendet ständig eine Anfrage über neue Nachrichten an den Broker und somit lassen sich neu erhaltene Daten registrieren, wenn ein Sensorknoten Daten gesendet hat. Die Kommunikation zwischen dem mobilen Endgerät und dem Cloud-Server erfolgt über

HTTP (Hypertext Transfer Protocol) nach dem Request/Response-Verfahren. HTTP ermöglicht die Kommunikation zwischen dem Client und dem Server. Auf dem Server ist eine MySQL-Datenbank implementiert. Dort werden die Daten nach Erhalt jeder Nachricht abgelegt.

Zur Absicherung der gesendeten Nachrichten stellt MQTT einen Authentifikationsmechanismus bereit, indem die Nachrichten über Benutzername und Passwort abgesichert werden. Die Kommunikation lässt sich mit Hilfe von externen Protokollen wie SSL bzw. DTLS oder VPN auf Transportebene verschlüsseln. Zudem können Broker über Client-Zertifikat für Authentifizierung oder durch die Überprüfung der IP den Zugriff über Access Control Lists einschränken und somit eine zusätzliche Absicherung der verschenkten Daten realisieren.

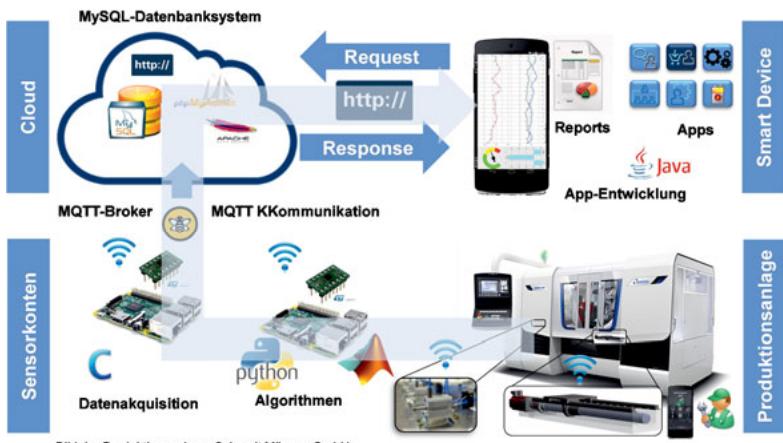


Bild der Produktionsanlage: Schaudt Mikrosa GmbH

**Abbildung 4: Kommunikationsarchitektur des Sensornetzwerks in der Datenanalyse**

Die zuverlässige Datenanalyse stellt die Grundlage für das Condition Monitoring dar. Auf jedem Knoten des Sensornetzwerks wird Datenanalyse durchgeführt. Die Schritte der Datenanalyse sind aufgeteilt in Signalvorverarbeitungs-, Merkmalsextraktion und -Auswahl sowie Klassifizierungsschritt. Im Signalvorverarbeitungsschritt werden erfasste Signale so aufbereitet, dass die für das Condition Monitoring notwendigen und relevanten Informationen im Rohsignal identifiziert werden. Meistens sind im Rohsignal neben den interessanten Signalbereichen auch irrelevante Signale (z. B. Rauschen oder Messfehler) enthalten. Eine Korrektur der Signale erfolgt mit Hilfe der Methoden der Signalvorverarbeitung. Diese umfasst insbesondere die Signalfilterung, Berechnung von Signaltransformationen, Signalnormierung, etc. So ist eine Signalvorverarbeitung in Form eines Bandpasses notwendig, um störende Anteile des Rohsignals zu eliminieren und relevante Signale hervorzuheben [5]. Weiterhin kann die signalspezifische Normierung mögliche Messungenauigkeiten beseitigen. Dadurch lässt sich der qualitative Verlauf des Signals besser analysieren. Abbildung 5 zeigt den Ablauf der Datenanalyse auf dem Sensorknoten.

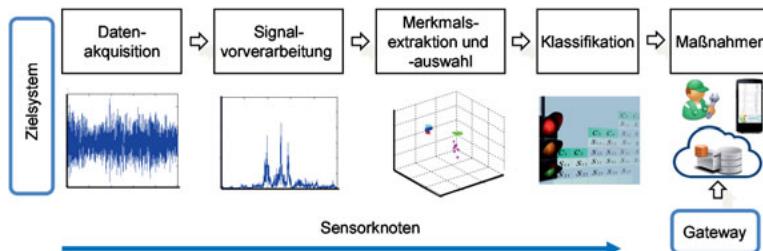


Abbildung 5: Ablauf der Datenanalyse auf dem Raspberry Pi

Die Merkmalsextraktion und -auswahl dient der Ermittlung geeigneter Kennwerte zur Beurteilung der erfassten Beschleunigungssignale. Hier werden vor allem formbeschreibende und statistische Merkmale aus den vorverarbeiteten Daten berechnet, welche für die Beschreibung charakteristischer Schwingungseigenschaften verwendet und als Entscheidungsgrundlage über den Maschinenzustand herangezogen werden. Bei der Zustandsüberwachung von verschleißbehafteten, rotierenden Komponenten existieren verschiedene Signalkennwerte bzw. Merkmale, die anschaulich in einen direkten Zusammenhang zwischen Verschleiß und Schäden an den Maschinenteilen, z. B. an Komponenten der Vorschubachsen stehen. Beispiel für diese Merkmale sind: Standardabweichung, Varianz, Effektivwert, Mittelwert, Schiefe Wölbung, etc. [11, 12, 20]. Eine Änderung des Effektivwerts über ein Zeitsignal betrachtet kann Hinweise auf Verschleißerscheinungen geben, weil der Verschleiß zum Anstieg des Reibungswiderstands führt. Dieser hängt wiederum mit der zum Verfahren benötigten Kraft zusammen, was zur Erhöhung der Schwingungsamplituden und sich zur gleichen Zeit im Anstieg des Effektivwerts zeigt. Der Effektivwert ist für Signale einer wechselnden Polarität, welche in regelmäßigen Wiederholungen auftritt, geeignet [7, 12]. Die Varianz ist ein statistischer Kennwert und beschreibt die Abweichung innerhalb einer Datenmenge vom dazugehörigen Mittelwert. Über die Varianz lassen sich Laufunruhen mechanischer Komponenten anhand der Abweichung von einer Normalverteilung feststellen. Darüber hinaus ermöglicht die Varianz die Ursache der Störung, beispielsweise auf Verschleiß oder Schädigungen, einzugrenzen, wenn entsprechende Trainingsdaten (zustandsbeschreibende Daten) vorhanden sind [12].

Klassifikationsschritt im Rahmen des Condition Monitoring beschreibt die Zuordnung der zu überwachenden Komponente zu einer diskreten, zustandsbeschreibenden Klasse. Diese Zuordnung kann über einen Klassifizierungsalgorithmus erfolgen. Der Algorithmus ordnet extrahierte Merkmale aus den aufgenommenen Messsignalen einer Schadensklasse (bekannte Zustände) zu. Dabei werden zustandsbeschreibende Daten (Trainingsdaten) der zu überwachenden Komponente unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie mit bekannter Klassenzugehörigkeit aufgezeichnet. Diese Daten lassen sich als Referenzwerte zur Ermittlung von wesentlichen Signaleigenschaften heranziehen. Auf Basis dieser Eigenschaften werden geeignete formbeschreibende Merkmale und statistische Kennwerte sowie Regeln bestimmt. Diese werden daraufhin implementiert, mit Grenzwertschwellen versehen und anschließend genutzt, um entsprechende Messungen unbekannter Klassenzugehörigkeit einzuordnen [25].

### 8.3.5 Experimentelle Untersuchungen

Zur Evaluierung der entwickelten Lösung wurde das Sensornetzwerk an einem Achsprüfstand zur Überwachung von Kugelgewindetrieben installiert (Abbildung 6).

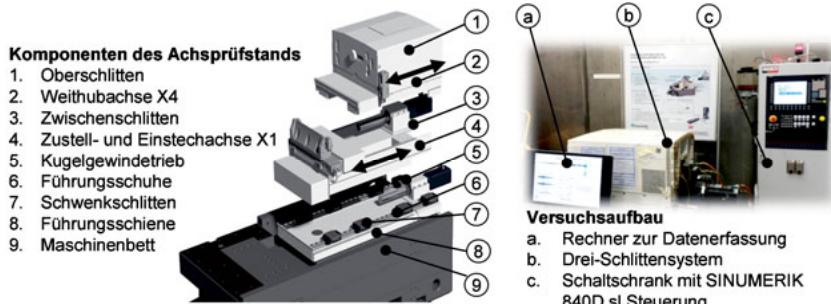


Abbildung 6: Achsprüfstand; Drei-Schlittensystem (links); Versuchsaufbau am PTZ (rechts)

Bei diesem Prüfstand handelt es sich um ein Maschinenbett mit einem Drei-Schlittensystem der Kronos M Serie der Firma Schaudt Mikrosa GmbH, Leipzig. Der Achsprüfstand gehört dabei zu einer Schleifmaschine und kommt in der Industrie für das spitzenlose Außenrund-, Durchgangs- sowie Einstechschleifen zum Einsatz. Das Drei-Schlittensystem mit Kugelgewindetrieben dient hierbei der Zustellung von Regel- und Schleifscheibe [16]. Dieses besteht aus einem Ober-, Zwischen- sowie Schwenkschlitten. Das Fahren der einzelnen Schlitten kann dabei mit einer Zustellung bis zu  $0,1 \mu\text{m}$  entlang der x-Achse erfolgen und wird jeweils von einem Elektromotor realisiert. Für die vorliegende Untersuchung wurde dabei lediglich eine der Achsen verwendet. Zur Generierung von Zustandsdaten wurden an einem Kugelgewindetrieb unterschiedliche Schäden künstlich erzeugt, um verschiedene Zustände zur Evaluierung des Sensornetzwerks zu haben. Die Schadenserzeugung erfolgt mittels eines Laserschweißverfahrens mit dem Lasersystem TruLaser Cell 7020 der TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH [21]. In der Tabelle 1-2 sind erzeugte Schäden auf der Laufbahnfläche des Kugelgewindetriebs.

Tabelle 8-2: Schadensklassen nach VDI 3832 in Anlehnung an [VDI3832]

Schadensklasse ( $\text{SK}_i$ )	Durchmesserbereich in $\mu\text{m}$	Beschreibung
$\text{SK}_1$	0	keine Schädigung
$\text{SK}_2$	ca. 350	sehr kleines Ausmaß
$\text{SK}_3$	ca. 550	kleines Ausmaß
$\text{SK}_4$	ca. 750	mittleres Ausmaß
$\text{SK}_5$	ca. 950	großes Ausmaß

Die hierbei eingesetzte Methode ist das Laserauftragschweißen ohne Zusatzstoff. Lediglich hochreines Argon wird dem Schweißprozess hinzugefügt, um die Schweißstelle vor einer möglichen Oxidation zu schützen. Bei dem Verfahren wird die Laserstrahlung mittels eines optischen Messgeräts auf die gewünschte Position eingefahren. Die Lage des Fokus relativ zur Spindeloberfläche ist dabei ein wichtiger Schweißparameter und bestimmt den Spotdurchmesser des Lasers und damit die Größe des Brennflecks. Durch die Absorption der Laserleistung erfolgt ein extrem schneller Anstieg der Temperatur, sodass das Material auf der

Spindellaufbahn über Aufschmelzprozesse abgetragen wird. Bei den erzeugten Schäden handelt es sich um Schäden, welche ähnlich des Pittings (Grübchenbildung) sind. Abbildung 7 zeigt die mikroskopischen Aufnahmen der künstlich erzeugten Schäden 350 µm und 550 µm. Die Schadenstiefe kann grundsätzlich als ähnlich angenommen werden. Ein Schätzwert, welcher für Abtragungen dieser Größenordnungen erfahrungsgemäß getroffen werden kann, liegt bei einer Rauigkeit von  $Rz = 50 \mu\text{m}$ .

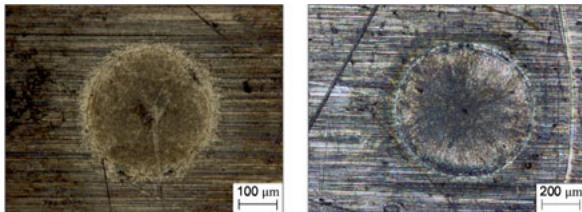


Abbildung 7: Mikroskopische Aufnahmen des Schadens auf der Spindellaufbahnfläche

### 8.3.6 Evaluation

Für die Schwingungsdatenanalyse auf dem Raspberry Pi wurden die erfassten Beschleunigungsdaten am Achsprüfstand verwendet. Die Analyse dieser Schwingungsdaten erfolgte im Zeit-, Frequenz-, und in Zeit-Frequenz-Bereich. Dabei erfolgt der Datenanalyseprozess in drei Schritten (Abb. 3). Im ersten Schritt werden die Schwingungsdaten mit unterschiedlichen Methoden, z. B. mit einem Bandpass Filter, vorverarbeitet. In der Abbildung 8 ist eine Darstellung des fehlerfreien Zustands SK<sub>1</sub> (links) und des Zustands mit großem Schaden SK<sub>5</sub> (rechts) dargestellt.

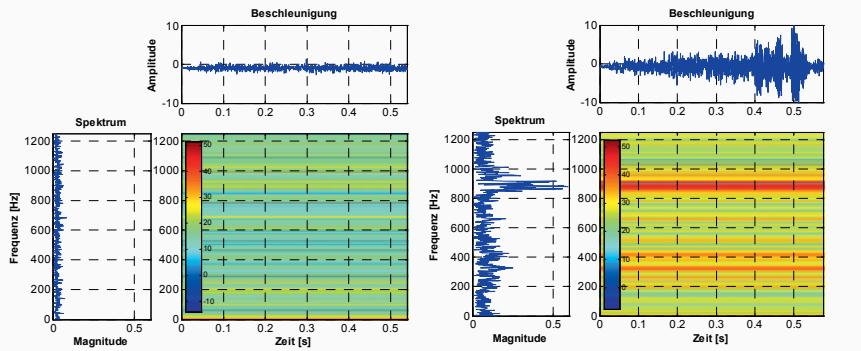


Abbildung 8: Beschleunigungssignal des schadenfreien Zustand und des Zustands mit großem Schaden

Die Parameter für den Filter wurden auf Basis berechneter, charakteristischer Überrollfrequenzen anhand Geometriedaten des Kugelgewindetriebs nach Klein [11] ermittelt. Im nächsten Schritt werden geeignete Merkmale und Klassifizierungsmethoden nach der vorgestellten Vorgehensweise in [14, 23] identifiziert. Der Gesamtalgorithmus wurde in Python implementiert und in den Sensorknoten integriert. Abbildung 9 zeigt die erzielte Klassifizierungsgenauigkeit unterschiedlicher Algorithmen mit verschiedenen Signalkennwerten.

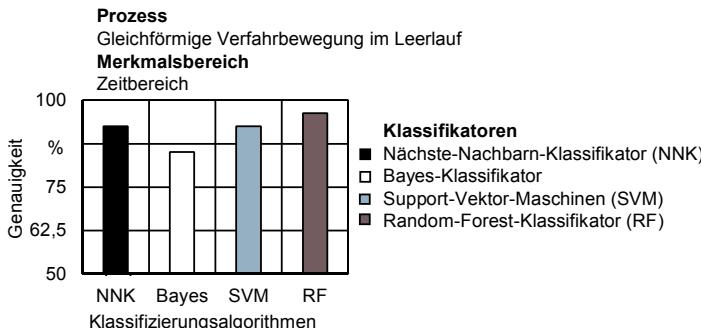


Abbildung 9: Klassifizierungsergebnisse unterschiedlicher Algorithmen

## 8.4 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis von einfachen Elektronik-Komponenten lassen sich hoch integrierbare, skalierbare und kosteneffektive Sensornetzwerke zum Condition-Monitoring von Produktionsmaschinen und -anlagen sowie ihren Komponenten realisieren. Diese Lösungen sind aufgrund dezentraler Datenverarbeitung auf Sensorknoten, der Konzentration von Daten und Diensten in der Cloud, mobiler Bereitstellung von Auswertungen sowie der Zusammenführung mehrerer verteilter Sensoren in einem Sensornetzwerk einfach an spezifische Anwendungen zu adaptieren. Diese Condition-Monitoring-Lösungen lassen sich in unterschiedliche Anwendungen, wie z. B. Produktionsanlagen, Nebenaggregate wie Pumpen oder mobile Systeme einsetzen. Zudem können mit dieser Lösung sowohl die Neu- als auch Bestandsanlagen für Predictive Maintenance im Kontext von Industrie 4.0 befähigt werden.

## 8.5 Literatur

- [1] Abele, E.; Sielaff, T.; Schiffler, A.; Rothenbücher, S.: Analyzing Energy Consumption of Machine Tool Spindle Units and Identification of Potential for Improvements of Efficiency. In: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Berlin Heidelberg: Springer, 2011
- [2] N. N. actech-Position actech-Position: Smart Maintenance für Smart Factories – Mit intelligenter Instandhaltung die Industrie 4.0 vorantreiben, 2015
- [3] Albarbar, A.; Mekid, S.; Starr, A.; Pietruszkiewicz, R.: Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring. An experimental study. Sensors 8 (2008), S. 784-799.
- [4] Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D.; Ganschar, O: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, 2014
- [5] Brecher, C.; Rudolf, T.: Signalvorverarbeitung zur Anwendung steuerungsintegrierter Prozessüberwachung. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 7/8, S. 479-486
- [6] Chaudhury, S.B.; Sengupta, M.; Mukherjee, K.: Vibration Monitoring of Rotating Machines using MEMS Accelerometer. International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER) 9 (2014) 2, S. 5-11
- [7] DINISO10816-1 DIN ISO 10816-1, 1997: Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen
- [8] Hodapp, W.: Die Bedeutung einer zustandsorientierten Instandhaltung – Einsatz und Nutzen in der Investitionsgüterindustrie. In: Betriebliche Instandhaltung. Hrsg.: Reichel, J.; Müller, G; Mandelartz, J. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, S. 135-149

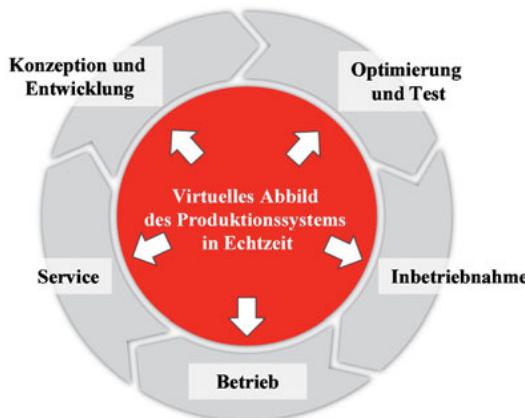
- [9] Thomä, M: Maschinenüberwachung mit intelligenten Sensoren. Pressemitteilung zum Projekt „AMELI4.0“, Robert Bosch GmbH. <http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/maschineneuerwachung-mit-intelligenten-sensoren-44917.html> [Stand: 10.09.2016]
- [10] Klein, U.: Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen. Düsseldorf: Stahleisen, 1998
- [11] Klein, W. H.: Zustandsüberwachung von Rollen-Profilschienenführungen und Kugelgewindetrieben. In: Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Klocke, F.; Schuh, G.; Brecher, C.; Schmitt, R. H. Aachen, Apprimus, 2011
- [12] Kolerus, J.; Wassermann, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen, 2008
- [13] Kuhn, A.; Schuh, G.; Stahl, B.: Trends, Potenziale und Handlungsfelder Nachhaltiger Instandhaltung. Frankfurt am Main: VDMA, 2006
- [14] Laghmouchi, A.; Hohwieler, E.; Geisert, C.; Uhlmann, E.: Intelligent Configuration of Condition-Monitoring Algorithms. In: Progress in Production Engineering: Selected, peer reviewed papers from the 2015 WGP Congress, 2015, S. 355- 362
- [15] Manyika, J.; Chui, M.; Bisson, P.; Woetzel, J.; Dobbs, R.; Bughin, J.; Aharon, D.: The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. McKinsey Global Institute, 2015
- [16] Schaudt Mikrosa GmbH: Kronos M - Flexibilität für mittlere Werkstücke. Leipzig. Firmenschrift, 2013
- [17] Schenk, M.: Instandhaltung technischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [18] Schönitz, E.-M.; Reichert, T.; Zwettler, M.: Intelligentes Condition-Monitoring erkennt realen Bauteilverschleiß. MM Maschinen Markt – Das Industriemagazin (2010) 45, S. 46-48
- [19] Schuh, G.; Kampker, A.; Franzkoch, B.: Studie Intelligent Maintenance - Potenziale zustandsorientierter Instandhaltung, 2005
- [20] Stockinger, M.: Untersuchung von Methoden zur Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinenachsen mit Kugelgewindetrieb. Dissertation Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2010
- [21] TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH: Lasersysteme: Jeder Aufgabe gewachsen. Ditzingen. Firmenschrift, 2014
- [22] Uhlmann, E.; Laghmouchi, A.; Hohwieler, E.; Geisert, C.: Zustandsüberwachung in der Cloud. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 1-2, S. 1-5
- [23] Uhlmann, E.; Pastl Pontes, R.; Laghmouchi, A.; Bergmann, A.: Intelligent pattern recognition of a SLM machine process and sensor data. In: Proceedings of 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Procedia CIRP 34 (2016)
- [24] Uhlmann, E.; Rau, N.; Geisert, C.: Unterstützungs Potenziale der Automatisierungstechnik im technischen Kundendienst. Schriftreihe: Märkte kennen – Trends nutzen. Fraunhofer IPK, 2013
- [25] Wellhausen, J.; Webber, O.: Detektion von Wälzlagerschäden durch Signalklassifikation von Körperschallsignalen. In: 6. VDI-Fachtagung Schwingungsüberwachung, At Leonberg, Germany, Volume: VDI-Berichte 2151. S. 57-66, 2011
- [26] Wörmer, N.: Energieautarke Sensoren für die Industrie 4.0. <http://www.elektroniknet.de/marke-technik/messen-testen/energieautarke-sensoren-fuer-die-industrie-4-0-132792.html> [Stand: 10.08.2016]
- [27] N. N.: MEMS digital output motion sensor. <http://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis3dh.html> [Stand: 30.11.2016]

## 9 Von der Virtuellen Maschine zur Virtuellen Produktion mit Ansätzen der Echtzeit-Co-Simulation

C. Scheifele, A. Verl

### 9.1 Einleitung

Produktionssysteme bestehen aus miteinander vernetzten mechatronischen Systemen, welche über das synergetische Zusammenwirken der Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik gekennzeichnet sind [1]. Die Formulierung einer „vierten industriellen Revolution“ („Industrie 4.0“) trägt der wachsenden Bedeutung insbesondere der Informationstechnik Rechnung. Mit ihrem steigenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines mechatronischen Systems, steigt der Stellenwert und Einfluss der industriellen Steuerungstechnik bei der Entwicklung und Optimierung von Produktionssystemen. Zur Verkürzung der Entwicklungszeiten und Erfüllung der massiven Anforderungen an Produktivität, Qualität und Wirtschaftlichkeit industrieller Produktionssysteme werden virtuelle Ansätze bis hin zum Digitalen Zwilling benötigt, um das Engineering, die Inbetriebnahme und eine produktionsbegleitende Optimierung von Produktionssystemen zu ermöglichen: der Einsatz von *virtuellen Methoden und Werkzeugen* zur Beherrschung der steigenden Komplexität wird unabdingbar.



**Abbildung 1:** Die Echtzeitsimulation von komplexen Produktionssystemen nimmt eine Schlüsselfunktion im Engineering und der produktionsbegleitenden Beobachtung, Regelung und Optimierung von Produktionssystemen ein

Als eines der ersten Methoden hat sich in den letzten Jahren die *Virtuelle Inbetriebnahme* (VIBN) unter Einsatz eines virtuellen Abbilds etabliert. Sie dient nach der VDI/VDE-Richtlinie 3693 dem „Aufdecken und Beheben von Fehlern aus dem Engineering des Automatisierungssystems“ [2]. Ihr zentrales Ziel ist die Optimierung von Steuerungsprogrammen und die Verkürzung der Inbetriebnahmezeit.

Von der Konzeption und der Entwicklung über die Optimierung und Evaluation bis hin zur Inbetriebnahme und einer produktionsbegleitenden Simulation (Digitaler Zwilling) von Produktionssystemen nimmt die *Echtzeitsimulation* eine Schlüsselfunktion ein, da nur so anhand

des Signalaustauschs mit realen Steuerungssystemen online das Systemverhalten insbesondere für zeitkritische Prozesse berechnet werden kann (vgl. Abbildung 1).

Dieser Beitrag betrachtet die Architektur von Hardware-in-the-Loop Simulatoren, bei denen Virtuelle Maschinen zum Einsatz kommen. Der Beitrag motiviert den Einsatz von Ansätzen zur Echtzeit-Co-Simulation, um den steigenden Anforderungen an Echtzeitsimulationen zur Abbildung des dynamischen Verhaltens von Produktionssystemen als auch deren umfangreicheren Einsatz über den vollständigen Lebenszyklus einer Produktionssystems gerecht zu werden.

## 9.2 Realität: Die Virtuelle Maschine

Der Einsatz von Virtuellen Maschinen (VM) zur Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) des vollständigen und unveränderten Steuerungssystems einer CNC-Maschine wurde von Pritschow und Röck am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart wissenschaftlich betrachtet [3][4]. Eine spezielle Testmethode der Virtuellen Inbetriebnahme ist die sogenannte *Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation*. Im Rahmen einer HIL-Simulation wird das reale Steuerungssystem über die reale Kommunikationsperipherie mit der simulierten Maschine oder Anlage, die zeitsynchron mit dem Steuerungssystem interagiert, verbunden (vgl. Abbildung 2). Mittlerweile ist die HIL-Simulation bei Herstellern von CNC-Maschinen ein gängiges Hilfsmittel bei der VIBN von CNC-Steuerungen [5].

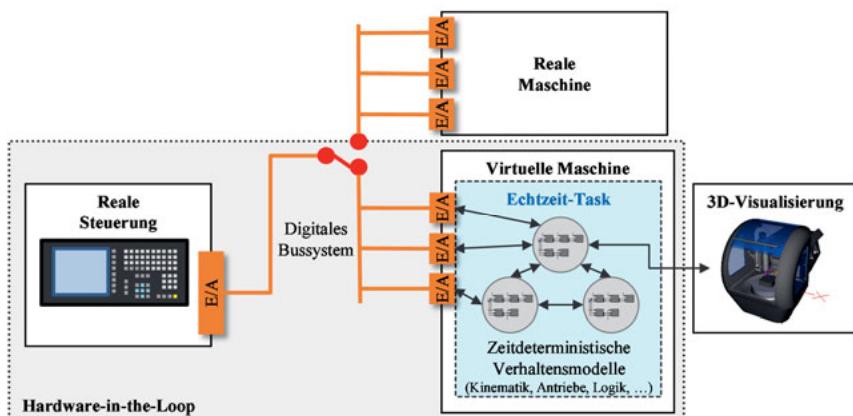


Abbildung 2: *Virtuelle Maschine zur Inbetriebnahme von Steuerungssystemen*

Bei der HIL-Simulation repräsentiert eine VM die steuerungstechnischen Maschinenkomponenten am digitalen Bussystem. Um eine zum Steuerungstakt (bei CNC-Maschinen üblicherweise  $\sim 1\text{ms}$ ) zeitsynchrone und verlustfreie Datenverarbeitung sicherzustellen, muss die VM eine Bereitstellung der Steuerungs-E/As (Eingangs- und Ausgangssignale) im Steuerungstakt garantieren. Hierfür wird der Rechenkern der Simulation auf einem Echtzeitbetriebssystem ausgeführt. Dies führt zwangsläufig zu hohen Anforderungen bzgl. zeitlicher Berechnungsfizienz an die eingesetzten Algorithmen.

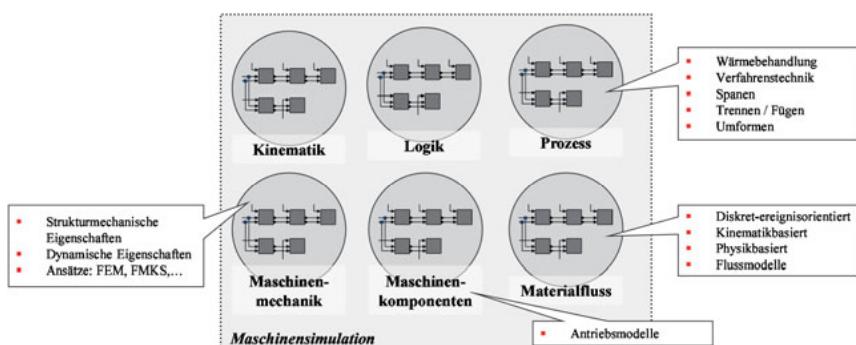
Folgende Anforderungen werden nach Röck [4] an den HIL-Simulationsaufbau bei CNC-Maschinen gestellt:

- verlustfreie und zeitsynchrone Kommunikation zwischen Steuerung und Simulation  
→ zeitdeterministischer Rechenkern als Echtzeit-Task auf einem Echtzeitbetriebssystem,
- zeitdeterministische Algorithmen zur Beschreibung der VM.

Zur ganzheitlichen Modellierung der VM müssen Simulationsansätze aus unterschiedlichen Fachdisziplinen miteinander gekoppelt werden. Man kann daher bei der Abbildung des Verhaltens auch von einer sogenannten *multidisziplinären Simulation* sprechen (vgl. Abbildung 3). Die Systemdynamik bildet hierbei die Grundlage zur Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme. Um eine Bereitstellung der Simulationsergebnisse innerhalb eines Steuerungstakts zu gewährleisten, setzt sich die VM aus Verhaltensmodellen mit zeitdeterministischen und recheneffizienten Algorithmen aus den entsprechenden Fachdisziplinen zusammen. Innerhalb der Simulationsdisziplinen müssen hierfür geeignete Simulationsansätze gefunden werden und notwendige Vereinfachungen hinsichtlich der Modelltiefe oder des Modellumfangs vorgenommen werden.

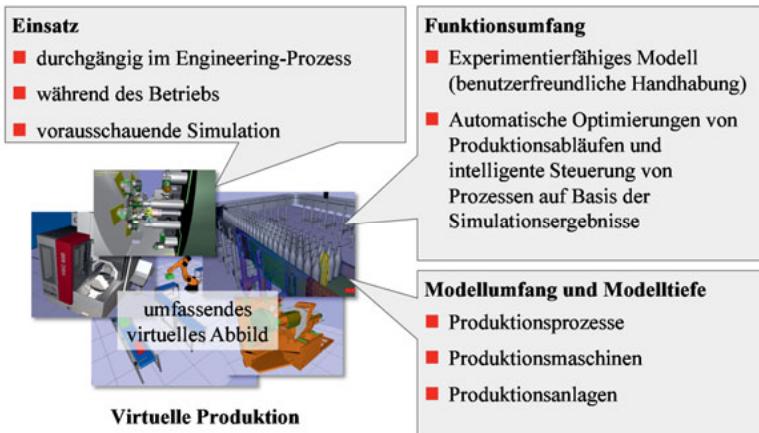
Wichtige Simulationsdisziplinen sind:

- Simulation des kinematischen Verhaltens der mechanischen Maschinenkomponenten (z.B. Berechnung der kinematische Kette),
- Simulation des logischen Verhaltens /z.B. logische Beziehung zwischen Sensorik und Aktorik),
- Simulation des Prozesses (z.B. Ermittlung der Prozesskräfte),
- Simulation der Maschinenmechanik (z.B. Abbildung strukturmechanischer oder dynamischer Eigenschaften),
- Simulation von steuerungstechnischen Maschinenkomponenten (z.B. Verhalten von Antrieben am digitalen Bussystem),
- Simulation von Materialflüssen (z.B. Abbildung des physikalischen Verhaltens von Fördergütern, Analyse der Synchronität zwischen Materialflusselementen),
- Simulation der 3D-Simulationsszene (z.B. Erkennen von Kollisionen, Untersuchung des Arbeitsraums).



**Abbildung 3:** Überblick über Modelle bei der multidisziplinären Simulation einer Maschine

## 9.3 Vision: Die Virtuelle Produktion



*Abbildung 4: Abbildung, Einsatz und Funktionsumfang der Virtuellen Produktion*

Industrie 4.0 beschreibt eine steigende Vernetzung und Komplexität industrieller Produktionssysteme. Um zukünftige Produktionssysteme beherrschbar zu machen, spielt vor diesem Hintergrund die „Digitale Fabrik“ und die damit verbundene Vision einer „Virtuellen Produktion“ (VP) eine immer stärkere Rolle. Die VM bezeichnet die „[...] durchgängige, experimentierfähige Planung, Evaluation und Steuerung von Produktionsprozessen und –anlagen mit Hilfe digitaler Modelle“ [12].

Eine VIBN muss damit über die Einzelmaschine hinaus das gesamte Produktionssystem erfassen und fordert hierzu eine Erweiterung der VM zum Digitalen Zwilling der Produktionsanlage, der diese in ihrem gesamten Lebenszyklus begleitet.

Einen hohen Stellenwert hat dabei die Echtzeitsimulation: Von der VIBN bis hin zur produktionsbegleitenden und prädiktiven Simulation muss zur Beobachtung, Regelung und Optimierung das Systemverhalten online aus Informationen der realen Steuerungssysteme berechnet werden. Der Funktionsumfang geht dabei über ein rein experimentierfähiges Modell hinaus und entwickelt sich zu einem intelligenten System, das automatische Optimierungen von Produktionsabläufen auf Basis der Simulationsdaten vornimmt und in die Steuerung von Prozessen im Produktionssystem eingreift.

Betrachtet man die VP aus Sicht des Modellumfangs und der Modelltiefe, so steigen diese im Vergleich zur VM rasant an. Ein umfassendes virtuelles Abbild setzt eine genaue Abbildung der vollständigen Produktionsanlage bis hin zum Prozess voraus. Darüber hinaus lässt sich die Betrachtung der VP in unterschiedliche Granularitätsstufen einteilen, zwischen denen während der Simulation je nach Untersuchungsziel gewechselt werden muss. (vgl. Abbildung 4)

## 9.4 Enabler: Echtzeit-Co-Simulation

Zur zeitdeterministischen Simulation des dynamischen Verhaltens von Maschinen wurde die Modellbildung unter den speziellen Randbedingungen, die an eine VM gestellt werden, in unterschiedlichen Fachdisziplinen betrachtet [6]. Trotz bekannter Verfahren zur Modellreduk-

tion, effizienten numerischen Methoden und optimierten Simulationsansätzen können detaillierte Modelle der Strukturmechanik (Finite Elemente Methode, Flexible Mehrkörpersysteme), hochgenaue Prozesssimulationen (Materialabtrag, Spanbildung), präzise 3D-Kinematiksimulation mit hochauflösender Kollisionserkennung und komplexe Materialflussysteme nur mit starken Vereinfachungen und Anpassungen berücksichtigt werden (vgl. [7], [8], [9], [10] und [11]). Zusätzlich wurde erkannt, dass eine Integration vorhandener Simulationsbibliotheken in den vorhandenen Rechenkern aufgrund der Anforderungen an einen Echtzeit-Task oft zu Problemen führt.

Möchte man diese Vereinfachungen oder Anpassungen nicht vornehmen (da man beispielsweise ein präziseres Prozessmodell benötigt), vorhandene Simulationsbibliotheken vereinfacht integrieren können oder steigt der Modellumfang stark an (wie es bei einer Abbildung der VP oder präzisen Prozessmodellen einer VM der Fall wäre), lassen sich folgende Einschränkungen der bisherigen VM formulieren:

### **Beschränkung auf einzelnen Echtzeit-Rechenkern**

Die Architektur der VM beschränkt sich auf einen einzelnen Rechenkern, der als Echtzeit-Task auf einem Echtzeitbetriebssystem ausgeführt wird. Damit ist die zur Verfügung stehende Rechenkapazität beschränkt, was zu Problemen bei komplexen Modellen führt. Zusätzlich unterwirft der einzelne Rechenkern das Gesamtmodell einem einheitlichen Simulationstakt, welcher taktsynchron zum Steuerungssystem bzw. des digitalen Bussystems ist. Neue Entwicklungen im Bereich der parallelen Berechnung auf Basis von Multi-Core- oder Grafikkartenprozessoren (GPGPU - general-purpose computing on graphics processing units) versprechen eine deutliche Leistungssteigerung auf einer Recheneinheit, können aber aktuell aufgrund einer fehlenden Aufteilung in Teilmodelle und fehlenden Synchronisierungsstrategien nicht genutzt werden. Darüber hinaus versprechen echtzeitfähige Netzwerke aus mehreren Recheneinheiten (Computer-Cluster, Computer-Grid) eine nach oben unbeschränkte Rechenkapazität, erfordern allerdings ebenfalls eine Aufteilung des Gesamtmodells in Teilmodelle.

### **Fehlende Integrationsmöglichkeiten vorhandener Simulationsbibliotheken**

Im Bereich der Produktionstechnik sind in den letzten Jahren eine Vielzahl hoch spezialisierter Simulationswerkzeuge sowie technologiespezifische Simulationsbibliotheken entstanden. Mit diesen Entwicklungen ist es möglich, verschiedene Aspekte der Produktion in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus einer Produktionsanlage präzise virtuell abzubilden. Diese bilden allerdings Insellösungen - eine ganzheitliche Planung und Optimierung kann nicht nur mit einem einzigen Simulationswerkzeug bewerkstelligt werden. Ein Übergang zwischen den Simulationsmodellen existiert aktuell nur rudimentär. Darüber hinaus müssen Verhaltensmodelle, welche auf Basis hochspezialisierter technologiespezifischer Simulationsbibliotheken erstellt wurden, in die VM oder VP integrierbar sein. Ein Beispiel hierfür sind Physik-Engines, deren Einsatzmöglichkeiten sich von der Starrkörperdynamik bis hin zu verformbaren Körpern oder Fluiden erstreckt und aufgrund der Beschränkung auf zeitdeterministische Algorithmen und einem geringen Simulationstakt (< 10 ms) aktuell nicht in das virtuelle Abbild integrierbar sind [8]. Durch die fehlende Integrationsmöglichkeit spezieller Simulationsbibliotheken können darüber hinaus wichtige Querabhängigkeiten und -verknüpfungen entlang der Produktionskette und damit wichtige Optimierungsmöglichkeiten nicht berücksichtigt werden.

Um die Einschränkungen einer VM vor dem Hintergrund der VP zu beheben, werden Erweiterungen an der Architektur von VM erforderlich. Eine Möglichkeit wäre, das komplexe Gesamtsystem, das sich aktuell auf einen einzelnen Rechenkern konzentriert, in sinnvolle Teilsysteme aufzuteilen. Die Teilsysteme können dann getrennt voneinander simuliert werden und zu diskreten Zeitpunkten Daten miteinander austauschen.

Vorteile einer Trennung in Teilsysteme sind:

- Das Gesamtsystem wird durch das Aufteilen in Teilsysteme einfacher handhabbar. Darüber hinaus ergibt sich die Möglichkeit im Laufe des Engineering-Prozesses einzelne Teilsysteme durch detailliertere Modelle zu ersetzen (mitwachsendes Simulationsmodell).
- Jedes Teilsystem ist für sich erprobt und kann getrennt vom Gesamtmodell a priori optimiert werden.
- Die einzelnen Teilsysteme können parallel berechnet werden, wodurch die Berechnungseffizienz insbesondere im Hinblick neuer Rechnerarchitekturen stark erhöht wird. Es kann eine Geschwindigkeitssteigerung durch die Parallelisierung von Berechnungen auf Basis von Multi-Core und GPGPU erzielt werden. Zusätzlich ist eine Trennung in Teilsysteme die Voraussetzung für eine verteilte Simulation auf mehreren Rechnersystemen. Entwicklungen im Bereich TSN (TSN - Time Sensitive Networking) ermöglichen eine echtzeitfähige Kommunikation über Ethernet-Netzwerke zwischen den Teilsystemen.
- Vorhandene hochspezialisierte Simulationsbibliotheken können durch die Standardisierung der Kopplung, Kommunikation und Synchronisation von Teilsystemen in das Gesamtsystem integriert werden.
- Durch die Aufteilung in einzelne Teilsysteme können unterschiedliche Zykluszeiten und Echtzeitanforderungen innerhalb des Gesamtsystems ermöglicht werden, ohne die verlustfreie und zeitsynchrone Kommunikation zwischen Simulation und Steuerungssystem zu gefährden. Die einzelnen Teilsysteme können hinsichtlich der Online-Simulation optimiert werden, insbesondere bezüglich des Zeitdeterminismus und der Recheneffizienz (Schrittweite, Zykluszeit, Echtzeitkontext, ...).

Im Bereich der Automobilindustrie ist bei der Simulation von Fahrzeugen die Kopplung von Teilsystemen zu einem Gesamtmodell unter dem Begriff der Co-Simulation oder modularen Simulation bekannt [16][17]. Die Co-Simulation findet hier bereits große Anwendung, um das Gesamtfahrzeug vollständig virtuell auf Basis fachspezifischer Teilmodelle beschreiben zu können. Vorteile dieses Ansatzes ist zum einen der gekoppelte Einsatz leistungsfähiger fachspezifischer Simulationsprogramme, der hohe Grad an Modularität bei der Produktentwicklung als auch die Möglichkeit einer parallelen Entwicklung von Teilsystemen in Expertenteams [16].

Ein Standard zur Co-Simulation mit Anwendung vor allem in der Automobilindustrie ist das „Functional Mock-up Interface“ (FMI) [18]. Es wurde die Problematik erkannt, dass Zulieferer bereits über sehr detaillierte digitale Simulationsmodelle ihrer Produkte verfügen. Nachdem diese jedoch in der realen Produktion integriert wurden, musste der OEM-Hersteller das fertige Produkt erneut aufwendig virtuell modellieren. Durch die Schnittstelle FMI lassen sich diese Modelle unterschiedlicher Software koppeln und zu einem Gesamtmodell zusammensetzen.

Dabei unterscheidet das FMI zwischen zwei Anwendungen [18]:

- *Austausch von Modellen zwischen Simulationswerkzeugen („FMI for Model Exchange“):*  
Das Ziel ist die Integration vorhandener Modelle, die in einem anderen Simulationswerkzeug modelliert wurden, in das eigene Simulationswerkzeug (Integration von Modellen in einen Rechenkern).

- *Co-Simulation („FMI for Co-Simulation“):*  
Simulation des Gesamtmodells mit unterschiedlichen Simulationswerkzeugen durch Kopplung der Werkzeuge (Kopplung von Rechenkernen).

Vor dem Hintergrund der VP müssen Erkenntnisse aus der Automobilindustrie in die Produktionstechnik übertragen werden, um ein umfassendes Abbild von Produktionssystemen zu erreichen. FMI bildet im Rahmen einer Co-Simulation ein Netzwerk aus beliebigen Teilmodellen, die über ihre Ein- und Ausgänge miteinander gekoppelt sind. Die einzelnen Teilmodelle werden von einem Simulations-Master synchron getaktet. Hierzu werden die einzelnen Teilsysteme angestoßen und nach Abschluss der parallelen Simulationen die Simulationsergebnisse zwischen den Teilsystemen über die Kopplungen verteilt. Erst nach Abschluss der Berechnung des langsamsten Teilsystems erfolgt der nächste Rechenschritt. Eine Äquidistanz ist nicht gegeben - ein strenger Bezug zu einer Echtzeituhr ist nicht vorhanden.

Bei der Echtzeitsimulation der VP muss ein äquidistanter Signalaustausch mit realen Steuerungssystemen gewährleistet werden: Trotz der Zerlegung in Teilsysteme muss am digitalen Bussystem die verlustfreie und zeitsynchrone Kommunikation zwischen Steuerung und Simulation erhalten bleiben. Die Teilmodelle, die mit realen Steuerungssystemen gekoppelt sind, müssen taktsynchron und äquidistant angestoßen werden. Ein Abschluss der Berechnungen vor Erreichen des Folgetaktes muss gewährleistet werden. Bei unterschiedlichen Zykluszeiten der einzelnen Teilsysteme müssen Strategien zum Austausch von Simulationsergebnissen entwickelt werden (vgl. Abbildung 5).

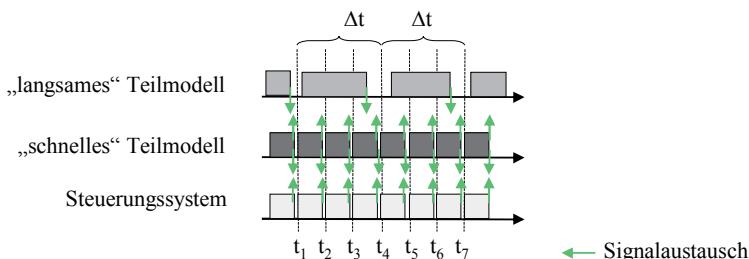


Abbildung 5: Unterschiedliche Zykluszeiten parallel laufender Teilmodelle

„Langsamere“ Teilmodelle haben die Anforderung an eine Taktsynchronität, wenn für den Algorithmus eine Schrittweite gesetzt und damit die Simulationsergebnisse nach Abschluss der Simulation vom Taktgeber zur richtigen Simulationszeit eingesortiert und verteilt werden müssen. Ist die Vorgabe einer Schrittweite nicht erforderlich, wie beispielsweise bei einer reinen 3D-Kollisionserkennung, entfällt diese Anforderung.

Bei einer Kopplung von Teilmodellen benötigen die „schnelleren“ Teilsysteme die Simulationsergebnisse der „langsameren“ Teilsysteme zur weiteren Berechnung. Es ist daher von Bedeutung, Algorithmen zu integrieren, die die Zeiträume zwischen den Simulationsergebnissen der langsameren Teilsysteme mit Werten füllen (vgl. Abbildung 6). Solche Kopplungen werden auch *Multirate Methoden* genannt [13][14][15].

Hierfür bestehen unterschiedliche Möglichkeiten:

- *Zero-order-hold:*  
Halten des letzten Ausgangswerts  $y$  als Eingang  $u$ , bis ein neuer Ausgangswert  $y$  zur Verfügung steht ( $0 \leq a \leq 1$ ):

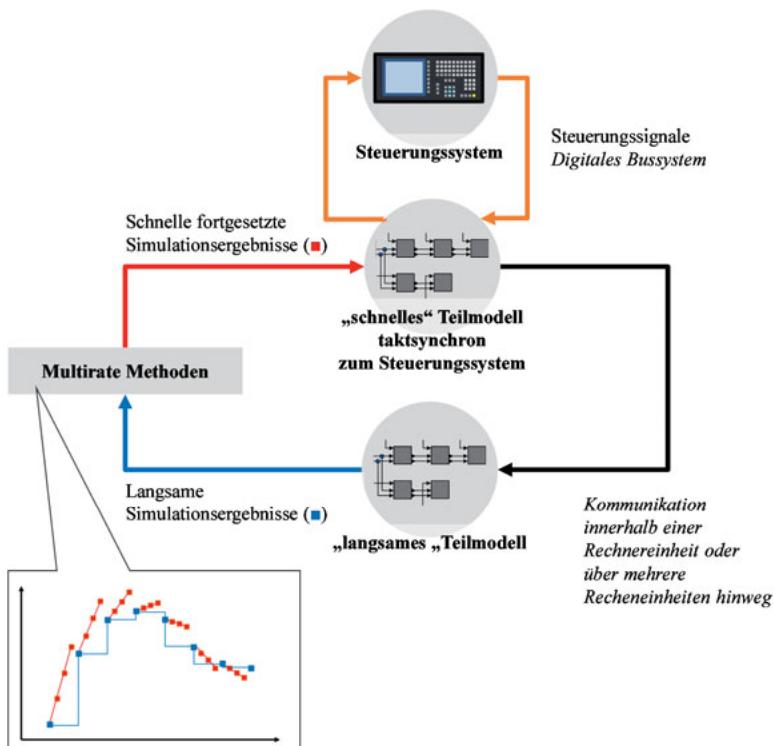
$$u_{n+a} = y_n \quad (5)$$

- *Interpolation:*  
Berechnung neuer Eingangswerte  $u$  aus bekannten zukünftigen Ausgangswerten  $y$  z.B. Interpolation 1. Ordnung ( $0 \leq a \leq 1$ ):

$$u_{n+a} = y_n + a(y_{n+1} - y_n) \quad (6)$$

- *Extrapolation:*  
Schätzung des Eingangswerts  $u$  aus vorherigen Ausgangswerten  $y$  z.B. Extrapolation 1. Ordnung ( $0 \leq a \leq 1$ ):

$$u_{n+a} = y_n + a(y_n - y_{n-1}) \quad (7)$$



**Abbildung 6:** Fortführung der langsamten Simulationsergebnisse durch Multirate Methoden bei einem in Teilmodelle zerlegten Gesamtmodells, welches mit dem realen Steuerungssystem gekoppelt ist

Eine weitere Möglichkeit ist die Abbildung des gleichen Verhaltens in mehreren Teilmodellen mit jeweils unterschiedlichen Simulationsansätzen unterschiedlichster Granularitätsstufen. Hier können sogenannte *mehrskalige Modelle* zum Einsatz kommen. Das vereinfachte und performante Modell im „schnellen“ Teilmодell wird von einem präzisen und berechnungintensiven Modell im „langsam“ Teilmодell geführt. Die einzelnen Modelle basieren auf unterschiedlichen Simulationsansätzen, die die Realität auf unterschiedlichen Skalen abbildet. Ein Beispiel ist die Abbildung eines Materialflusses in unterschiedlichen Genauigkeitsstufen: Ein performanter kinematisches Materialflussmodells, das den Materialfluss ohne physikalische Effekte und damit sehr idealisiert betrachtet, wird durch ein präzises physikbasiertes Materialflussmodell, das allerdings nicht den Anforderungen an einen zeitdeterministischen Algorithmus erfüllt, geführt [15].

## 9.5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Architektur von Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulatoren für eine Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) industrieller Steuerungssysteme näher betrachtet. Mittlerweile ist der Einsatz solcher Virtueller Maschinen (VM) im Engineering-Prozess von CNC-Maschinen ein gängiges Hilfsmittel zur Optimierung von Steuerungsprogrammen und Verkürzung der Inbetriebnahmezeit. Im Kontext der Industrie 4.0 entstehen neue Anforderungen an den Umfang und den Einsatz virtueller Methoden und Werkzeugen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktionssystems. Vor diesem Hintergrund wurde der Begriff der Virtuellen Produktion (VP) näher betrachtet. In diesem Beitrag wurde ein Handlungsbedarf hinsichtlich der Architektur von HIL Simulatoren festgestellt, um den kommenden Anforderungen an die Realisierung des „Digitalen Zwillings“ eines Produktionssystems gerecht zu werden. Zur Lösung der im Beitrag aufgeführten Beschränkungen einer VM wurde die Zerlegung des Gesamtsystems in einzelne Teilsysteme motiviert. Man spricht damit von einer Echtzeit-Co-Simulation.

Erste Versuche zur Machbarkeit wurden am ISW erfolgreich durchgeführt. In folgenden Untersuchungen sollen signal- und fachspezifische Techniken zur Echtzeit-Synchronisation der Teilsysteme näher betrachtet werden. Zusätzlich zu den aufgezählten Multirate Methoden sollen modellbasierte Techniken als auch mehrskalige Modelle zum Einsatz kommen. Darüber hinaus soll ein Framework zur einfachen Anbindung und Kommunikation eines Teilsystems an die VP und zur Optimierung und Analyse des Gesamtsystems erstellt werden.

## 9.6 Literatur

- [1] VDI-Richtlinie, VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004.
- [2] VDI/VDE-Richtlinie, VDI/VDE 3693: Blatt 1: Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2016.
- [3] Pritschow, G.; Röck, S.: Hardware in the Loop Simulation of Machine Tools. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 53(1), 295–298, 2004.
- [4] Röck, S.: Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen. Dissertation, Universität Stuttgart. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2007.
- [5] ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH: ISG-virtuos, online, <http://www.isg-stuttgart.de/de/isg-virtuos/virtuos.html>, 2016.

- [6] Röck, S.: Hardware in the loop simulation of production systems dynamics. *Production Engineering* 5.3, S. 329-337, 2011.
- [7] Röck, S.: Real-time simulation of process machine interactions—a numerical analysis. *Proceedings of the CIRP second international conference: process machine interactions*, UBC, Vancouver, Canada, 2010.
- [8] Hoher, S.; Verl, A.: Multi-Simulator-Materialflusssimulation für die virtuelle Inbetriebnahme. *SPSIPCDRIVES 2012 Tagungsband*, S. 387-396, VDE Verlag, 2012.
- [9] Hoher, S.; Schindler, P.; Göttlich, S.; Schlepper, V.; Röck, S.: System Dynamic Models and Real-time Simulation of Complex Material Flow Systems. *4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV '11)*, pp. 316-321, Springer, 2011.
- [10] Hoher, S.; Röck, S.: A contribution to the real-time simulation of coupled finite element models of machine tools—A numerical comparison. *Simulation Modelling Practice and Theory* 19.7, S. 1627-1639, 2011.
- [11] Sekler, P.; Verl, A.: Real-time computation of the system behaviour of lightweight machines. *IEEE First International Conference on Advances in System Simulation 2009, SIMUL '09*, IEEE, Porto, vol. 144–147, pp. 20–25, 2009.
- [12] Reinhard, G.; Grundwald, S.; Rick, F.: Virtuelle Produktion – Virtuelle Produkte im Rechner produzieren. *VDI-Z integrierte Produktion*. Bd. 141, Nr. 12, S. 26-29, 1999.
- [13] Gear, C. W.; Wells, D. R.: Multirate linear multistep methods. *BIT Numerical Mathematics* 24(4), pp. 484.502, 1984.
- [14] Murray-Smith, D. j.: *Modelling and simulation of integrated systems in engineering: issues of methodology, quality, testing and application*. Elsevier, 2012.
- [15] Scheifele, C.; Verl, A.: Hardware-in-the-Loop Simulation for Machines Based on a Multi-Rate Approach. *9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, EUROSIM2016*, 2016.
- [16] Kübler, R.: *Modulare Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Technische und Numerische Mechanik, 2000.
- [17] Kübler, R.; Schiehlen, W.: Modular simulation in multibody system dynamics. *Multibody System Dynamics* 4 (2–3), S. 107–127, 2000.
- [18] Blochwitz, T.; et al.: Functional mockup interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models. *Proceedings of the 9th International MODELICA Conference; September 3-5; 2012; Munich; Germany*. No. 076. Linköping University Electronic Press, 2012.

# Online-Buchshop für Ingenieure

■■■ VDI nachrichten

Online-Shops



**Fachliteratur und mehr - jetzt bequem online recherchieren & bestellen unter: [www.vdi-nachrichten.com/](http://www.vdi-nachrichten.com/)**  
Der-Shop-im-Ueberblick



**Täglich aktualisiert: Neuerscheinungen VDI-Schriftenreihen**



## BUCHSHOP

Im Buchshop von [vdi-nachrichten.com](http://vdi-nachrichten.com) finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

### **VDI-Berichte** und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

### **Fortschritt-Berichte VDI:**

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen

### **Newsletter „Neuerscheinungen“:**

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

### **Autoren-Service:**

Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI

### **Buch- und Medien-Service:**

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

VDI nachrichten

BUCHSHOP [www.vdi-nachrichten.com/Der-Shop-im-Ueberblick](http://www.vdi-nachrichten.com/Der-Shop-im-Ueberblick)

## Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
- 2 Fertigungstechnik
- 3 Verfahrenstechnik
- 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- 6 Energietechnik
- 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- 10 Informatik/Kommunikation
- 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- 15 Umwelttechnik
- 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
- 21 Elektrotechnik
- 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-369602-4