

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

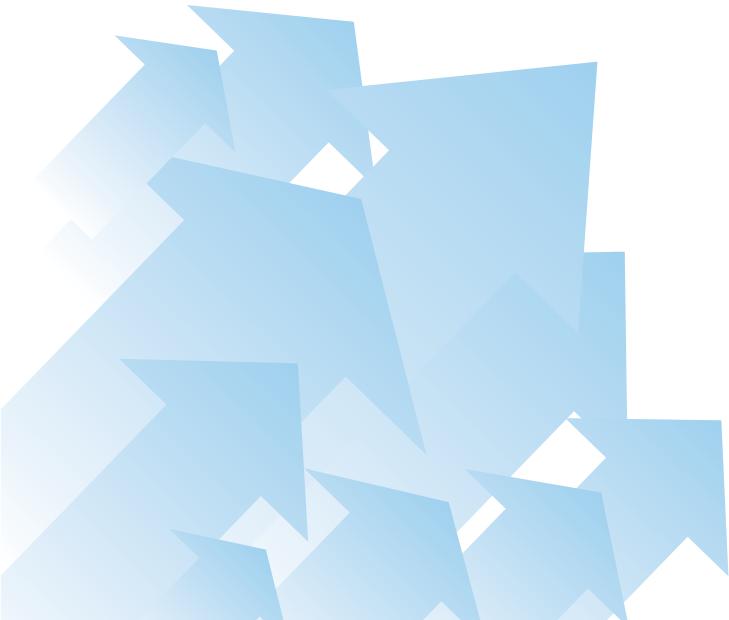
Reihe 2

Fertigungstechnik

Nr. 698

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Aachen
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, Stuttgart (Hrsg.)
Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel, Stuttgart (Hrsg.)
Dr.-Ing. Armin Lechner, Stuttgart (Hrsg.)

Industrie 4.0 – Wert-schöpfungspotenziale in der dienstebasierten Produktion



Industrie 4.0 -

Wertschöpfungspotenziale in der

dienstebasierten Produktion

Berichte zum aktuellen Stand der Forschung aus dem WZL (RWTH Aachen), dem PTZ (Produktionstechnisches Zentrum Berlin) und dem ISW (Universität Stuttgart)



Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Aachen
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, Stuttgart (Hrsg.)
Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel, Stuttgart (Hrsg.)
Dr.-Ing. Armin Lechler, Stuttgart (Hrsg.)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2018

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 2

Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Aachen
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, Stuttgart (Hrsg.)
Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel, Stuttgart (Hrsg.)
Dr.-Ing. Armin Lechner, Stuttgart (Hrsg.)

Nr. 698

Industrie 4.0 – Wert-
schöpfungspotenziale
in der dienstebasierten
Produktion

VDI verlag

Brecher, Christian; Krüger, Jörg; Uhlmann, Eckart; Verl, Alexander;
Riedel, Oliver; Lechler, Armin

Industrie 4.0 – Wertschöpfungspotenziale in der dienstebasierten Produktion

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 698. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

90 Seiten, 55 Bilder, 1 Tabelle.

ISBN 978-3-18-369802-8, ISSN 0178-9406,

€ 38,00/VDI-Mitgliederpreis € 34,20.

Für die Dokumentation: Industrie 4.0 – Produktionsabläufe – Wertschöpfungspotentiale – Maschinenverfügbarkeit – Lageerkennungsalgorithmen – Kompensationsalgorithmen – Dienstebasierte Montageprozesse – Informationsrückführung – Service-Oriented Architecture – Bildverarbeitungsdienste

Der vorliegende Band dokumentiert die Aktivitäten der produktionstechnischen Institute aus Aachen (WZL/IPT), Berlin (IWTF/IPK) und Stuttgart (ISW) im Zusammenhang mit dem Thema „Industrie 4.0 – Wertschöpfungspotentiale in der dienstebasierten Produktion“ und gibt einen Ausblick auf mögliche Anwendungsfelder und Entwicklungsrichtungen dieses Themenbereichs. Im Rahmen der Entwicklungen von Industrie 4.0 werden häufig neuartige Technologien angeführt. Diese Technologien sind Enabler, um die Produktion effizienter zu gestalten. Sie allein reichen aber nicht aus, um eine wirkliche „Revolution“ der bisherigen Produktion hervorzurufen. Auch die Definition von Referenzmodellen und Verwaltungsschalen führen zwar zu einem gemeinsamen Verständnis und möglichen Modellierungen der Produktion und ihrer Systeme, aber erst einmal nicht zu einer höheren oder effizienteren Wertschöpfung.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.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
www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

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 978-3-18-369802-8

Vorwort

Im Rahmen der Entwicklungen von Industrie 4.0 werden häufig neuartige Technologien angeführt. Diese Technologien sind Enabler, um die Produktion effizienter zu gestalten. Sie allein reichen aber nicht aus, um eine wirkliche „Revolution“ der bisherigen Produktion hervorzurufen. Auch die Definition von Referenzmodellen und Verwaltungsschalen führen zwar zu einem gemeinsamen Verständnis und möglichen Modellierungen der Produktion und ihrer Systeme, aber erst einmal nicht zu einer höheren oder effizienteren Wertschöpfung.

Erst durch neuartige Mehrwertdienste in der Produktion werden größere Effizienzsteigerungen unter Zuhilfenahme neuer Technologien erreicht. Dabei kann es sich sowohl um Verbesserungen bestehender Prozessketten und Produktionsabläufe handeln als auch um ganzheitlich neuartige Geschäftsmodelle, die eine komplett andere Form der Zusammenarbeit hervorrufen.

Im Rahmen des alljährlich stattfindenden Treffens von wissenschaftlichen Mitarbeitern des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen, der Institute des Produktionstechnischen Zentrums (PTZ) Berlin und des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart wurde am 22. und 23. Juni 2017 der aktuelle Stand der Forschung zum Thema „Industrie 4.0 – Wertschöpfungspotentiale in der dienstbasierten Produktion“ diskutiert. Der hier vorliegende Band enthält die Ergebnisse der diesjährigen Veranstaltung in Stuttgart.

Unser Dank gilt den Autoren der Beiträge für ihren Einsatz und ihre Mühe bei der Erstellung dieses Buches. Insbesondere danken wir dem VDI-Verlag für die Möglichkeit, diese neuen Erkenntnisse aus der Forschung im Rahmen dieses Buches an die Öffentlichkeit zu tragen.

Aachen 2017 Ch. Brecher

Berlin 2017 J. Krüger, E. Uhlmann

Stuttgart 2017 A. Verl, O. Riedel, A. Lechler (Herausgeber)

Inhalt

1	Digitale Produktion - Konzept einer baukastenbasierten Plattform für die Rückführung von Informationen in die reale Produktion <i>T. Korb, A. Verl und O. Riedel</i>	1
2	In-Process Quality Assurance for Selective Laser Melting through Online Generation of Key Performance Indicators in Context of Industrie 4.0 <i>Rodrigo Pastl Pontes und E. Uhlmann</i>	11
3	Potentiale zur Steigerung der Maschinenverfügbarkeit durch schnellrechnende Komponentenmodelle am Beispiel Kugelgewindetrieb (KGT) <i>B. Eßner, M. Frey und Ch. Brecher</i>	23
4	Dienstbasierte Integration objektspezifischer Lageerkennungsalgorithmen am Beispiel eines roboterbasierten Greifszenarios <i>M. Rudorfer und M. Chemnitz</i>	35
5	„Energy-as-a-Service“ - Dienstbasiertes, modulares Leitsystem zur energieflexiblen Fertigung <i>Ch. Fimmers und Ch. Brecher</i>	45
6	Reduzierung von Ausschuss und Nacharbeiten durch intelligente Datenauswertung und Kompensationsalgorithmen in mehrstufigen Produktionssystemen <i>F. Eger, A. Lechler und A. Verl</i>	57
7	Präzise gestenbasierte Roboterprogrammierung <i>O. Heimann, J. Hügler und J. Krüger</i>	67
8	Dienstbasierte Planung kollaborativer Montageprozesse <i>S. Storms und W. Herfs</i>	75

1 Digitale Produktion

Konzept einer baukastenbasierten Plattform für die Rückführung generierter Informationen in die reale Produktion

T. Korb, A. Verl und O. Riedel, ISW, Uni Stuttgart

1.1 Motivation und Problemstellung

Bereits mit der dritten industriellen Revolution in den 1970er Jahren änderte sich das Bild der Produktionslandschaft von rein physischen Maschinen zu mechatronischen Systemen mit eigenem Softwareanteil. Dieser wird durch die aktuelle Bewegung Industrie 4.0 weiter ausgebaut. Neben den einzelnen mechatronischen Systemen steht nun die Kommunikation zwischen den Komponenten für den Austausch von Produktionsinformationen im Vordergrund. Für die Datenerfassung dient sowohl herkömmliche, wie auch speziell nachgerüstete Sensorik der Produktionsanlagen. Über, an die Maschinensteuerung angeschlossene, Gateways können diese Daten eingesammelt und abseits des Shopfloors ausgewertet werden. Hierbei wird ein digitales Abbild der physischen Produktion erstellt. Dieses Maschinenabbild, kombiniert mit moderner IT-Infrastruktur ermöglicht eine gewinnbringende Verarbeitung der vorhandenen Informationen. Analyseservices und Visualisierungstechnologien generieren aus den Rohdaten der Maschine Informationen, die den Produktionsprozess verbessern können. Präventive Wartung und energieeffizientere Prozesse sind zwei Anwendungsszenarien dieses Vorgehens.

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 ist bereits 2011 im Aktionsplan „Hightech-Strategie 2020“ [1] von der Bundesregierung verabschiedet worden. Sieben Jahre später ist der beschriebene Ablauf der Datenerfassung, Analyse und Rückführung für die meisten Firmen weiterhin ein Zukunftsprojekt. Wie lässt sich dieses Problem erklären?

Eine VDMA Mitgliederbefragung [2] versucht Antworten auf diese Frage zu geben. 234 Maschinen- und Anlagenbauer sowie 602 Firmen aus dem verarbeitenden Gewerbe wurden durch den VDMA befragt. Ein Teilergebnis der Studie ist eine Industrie 4.0 Readiness Skala, die zeigt wie bereit die Unternehmen in diesem Umfeld sind. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse der Studie für beide Berufsgruppen aufgezeigt. Über 75% der Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau sowie fast 90% der Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe haben sich entweder überhaupt nicht mit Industrie 4.0 beschäftigt oder sind gerade in den Anfängen. Das andere Ende der Skala ist bei beiden Berufsgruppen nicht abgedeckt. Keines der befragten Unternehmen hat die höchste Stufe erreicht. Lediglich 1% bzw. 0,6% sind in der zweihöchsten Stufe einzurordnen. Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Schlüsse ziehen. Entweder sind die Unternehmen nicht daran interessiert auf Industrie 4.0 Technologien zu setzen oder sie sind nicht in der Lage dazu.

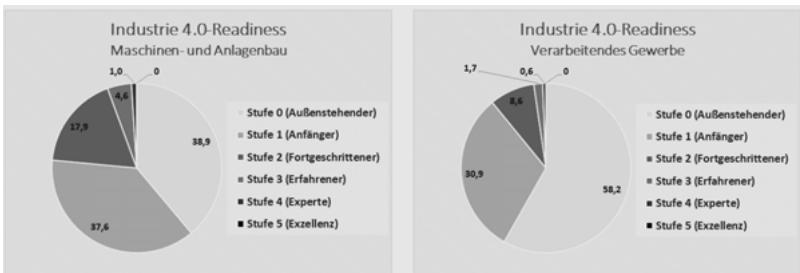


Abbildung 1: Bereitschaft von Firmen für die Umsetzung von Industrie 4.0 nach einer Studie des VDMA

Abbildung 2, ebenfalls ein Ergebnis aus der Studie des VDMA, zeigt, dass es nicht am Interesse der Firmen scheitert. Fast 90% von 134 befragten Unternehmen sehen in der Bewegung eine Chance sich am Markt zu differenzieren. Über 75% sehen es als selbstverständlich an, als Technologieführer die neuen Thematiken anzugehen. Ein Großteil der Unternehmen möchte sich in Richtung der vierten industriellen Revolution bewegen. Dies führt zum Schluss, dass die Firmen derzeit nicht in der Lage sind, diese Schritte zu gehen.

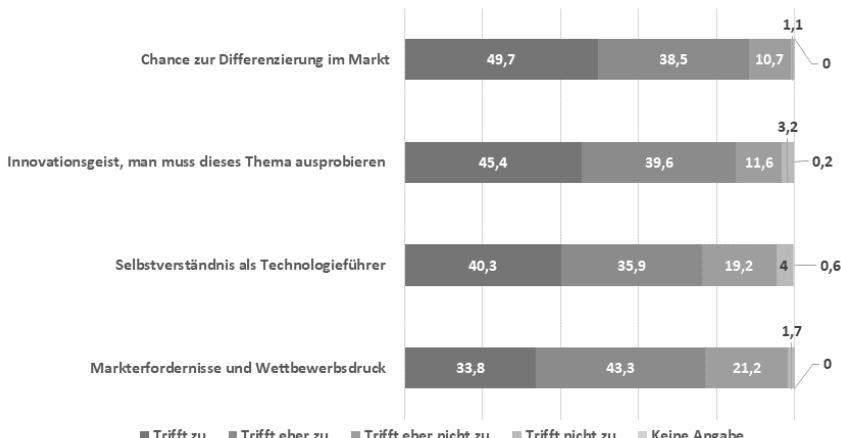


Abbildung 2: Gründe für den Einsatz von Industrie 4.0 Technologie nach einer Studie des VDMA

Die Ergebnisse einer weiteren Studie [3], durchgeführt vom Institut für Innovation und Technik aus Berlin im Rahmen des Programms für Industrie 4.0, bestärken diese Aussagen. Ergebnisse der Studie, dargestellt in Abbildung 3, zeigen, dass vor allem kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) derzeit nicht in der Lage sind, die Anforderungen für einen erfolgreichen Einstieg in die Digitalisierung zu meistern. Unter den meist genannten Hindernissen sind fehlende Ressourcen, technologisch und menschlich, sowie das fehlende Fachwissen der Mitarbeiter führend. Letzteres unterteilt sich in Personal, das bisher fern von informationstechnischen Systemen gearbeitet hat und Personal, das die richtigen Grundlagen besitzt, jedoch weitergebildet werden muss.

Hindernisse bei der Nutzung von Industrie 4.0 Technologien

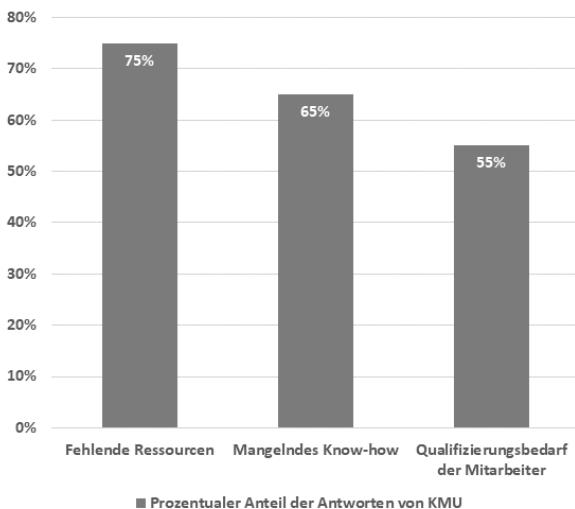


Abbildung 3: Drei meist genannte Hindernisse bei der Nutzung von Industrie 4.0 Technologien nach [2]

Die dargelegten Tatsachen zeigen, dass es einer Lösung bedarf, die einerseits den Firmen einen Einstieg in die komplexe Thematik der Digitalisierung und Vernetzung der Produktion ermöglicht und andererseits genau diese Komplexität vom Anwender verbirgt.

1.2 Lösungsansatz

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts *iSrv – intelligentes Servicesystem* soll zur Lösung des dargelegten Problems eine Plattform erschaffen werden, mit der KMU Produktionsdaten erfassen, analysieren und gewinnbringend rückführen können. Der Aufbau der Plattform erfolgt nach der Methodik des baukastenbasierten Engineerings. In drei Baukästen werden die Fachdisziplinen Datenerfassung, Analyse und Rückführung gekapselt und über ein grafisches Bedienfeld angeboten. Dank der Abstraktion der Komplexität benötigt ein Nutzer kein Expertenwissen über die Fachdisziplin, die er nutzen möchte.

In Abbildung 4 ist das abstrakte Konzept des gesamten Kreislaufes der digitalen Produktion mit iSrv zu sehen. Die einzelnen Schritte werden so realisiert, dass eine einfache Nutzung gewährleistet wird.

Für die Datenerfassung werden definierte Gateways an die Plattform angebunden, so dass eine manuelle Einrichtung dieser Technologie auf ein Minimum beschränkt werden kann. Ein Baukasten erlaubt das Hinzufügen neuer Gateways und die Parametrisierung angeschlossener Technologie über eine grafische Nutzeroberfläche.

Erfasste Daten werden anschließend in Verhaltens- und Zustandsmodelle überführt. Auf Basis dieser Modelle werden unterschiedliche Analyseverfahren angewendet, um Erkenntnisse aus den Rohdaten zu erhalten. Diese Schritte, Modellbildung und Analyse, werden ebenfalls in einem eigenen Baukasten abstrahiert, in dem der Nutzer lediglich angibt welche Daten zur Verfügung stehen und

welche Analysen durchgeführt werden sollen. Wie die Modellbildung und die Analyseverfahren funktionieren und interagieren, wird vor dem Benutzer versteckt.

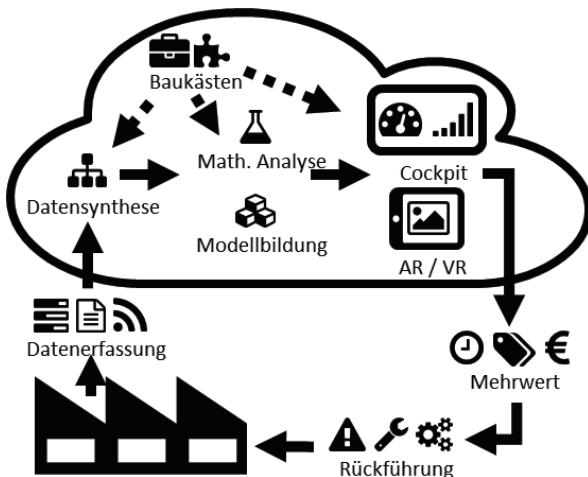


Abbildung 4: Abstrakter Lösungsansatz für ein baukastenbasiertes Servicesystem

Eine Rückführung der Informationen ist nötig, um erzeugte Informationen gewinnbringend nutzen zu können. Aus diesem Grund werden gewonnene Ergebnisse anschließend auf drei Arten zur Verfügung gestellt. Ein grafisches Cockpit ist in der Lage Datenreihen und Zusammenhänge zwischen Daten in verschiedenen Diagrammtypen darzustellen und so eine Übersicht zu gewähren. Die zweite Möglichkeit der Rückführung ist die Nutzung eines Baukastens für Augmented und Virtual Reality Anwendungen. Bereitgestellte 3D-Modelle können mit gewonnenen Informationen verbunden und in Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. Eine weitere Methode der Rückführung ist der semiautomatisierte Prozesseingriff durch Feinjustierung von Prozessparametern. Hierbei werden jedoch keine Parameter automatisiert verändert, um rechtliche Probleme zu vermeiden. Vorschläge werden an eine menschliche Person übermittelt, die eine Entscheidung für oder gegen die Änderung trifft.

Jeder der drei Baukästen soll durch Drittanbieter erweiterbar sein. So wird sichergestellt, dass Fachexperten ihr Wissen beitragen und als Service innerhalb der Plattform anbieten können. Darüber hinaus wird hierdurch auch der Wunsch nach Individualisierung gewährleistet. Möchte ein Unternehmen einen gewissen Anwendungsfall angehen, können Experten auf dem jeweiligen Gebiet ihr Wissen in einen iSrv-Baustein verpacken und zur vorhandenen Servicelandschaft des Kunden hinzufügen.

1.3 Aktuelle Serviceplattformen

iSrv ist nicht das erste System, das versucht, unerfahrenen Unternehmen den Umgang mit aktuellen Technologien zu ermöglichen. Aus diesem Grund wird ein Überblick der aktuellen Plattformlandschaft gegeben. Nachfolgend wird zwischen profitorientierten, gewerblichen Plattformen und wissenschaftlich orientierten Plattformen aus dem Bereich der Forschung unterschieden.

Vertreter der gewerblichen Industrie 4.0 Plattformen sind meist Konzerne oder Großunternehmen, die früh mit der Digitalisierung begonnen und dadurch realisiert haben, dass es einem Rahmenwerk bedarf. Im europäischen Markt ist Mindsphere von Siemens eine der am häufigsten genutzten Serviceplattformen. Bosch mit der Bosch IoT Suite, TRUMPF mit AXOOM und EcoStruxure von Schneider Electric sind weitere Plattformen, die bei der Informationsgenerierung durch Datenanalyse unterstützen sollen. Im Amerikanischen Raum ist PREDIX von General Electric die größte Plattform auf dem Markt. Diese Lösungen haben eine Eigenschaft gemeinsam. Sie wurden geschaffen, um möglichst viele Kunden, Anwender oder Produzenten, einen Zugriff auf die sich entwickelnde Servicewelt zu bieten. Beide gezeigten Studien zeigen, dass hierbei der Fokus auf die einfache Bedienbarkeit verloren gegangen ist. Nichts destotrotz werden die genannten und viele weitere Plattformen industriell genutzt. In einem Praxisreport der Acatech [4] werden mehrere Plattformen und ihr Einsatzgebiet beschrieben.

Eine, im Oktober 2017 von DMG MORI, Dürr, Software AG, Zeiss und ASM PT, veröffentlichte Lösung ist die Adamos IIoT-Plattform. Das System wird von dem genannten Konsortium als Plattform von Maschinenbauern für Maschinenbauern und somit als einfach zu nutzendes System beworben. Das Konzept dieser Plattform deckt sich mit den bisher beschriebenen Erkenntnissen. KMU sind mit dem Umgang größerer Serviceplattformen überfordert. Deswegen wird mit Adamos versucht, Maschinenbauer zu befähigen, ihren Kunden ein Servicepaket anzubieten, ohne dass diese sich mit der Technologie befassen müssen. Wie dieses Konzept umgesetzt wird und ob es die bestehenden Probleme löst, wird sich zeigen sobald Adamos tatsächlich genutzt wird.

In der Forschung werden derzeit ebenfalls unterschiedliche Plattformen entwickelt, die sich mit der Thematik der Digitalen Produktion auseinander setzen. Im, vom BMBF geförderten Projekt ScaleIT, wird eine verteilte Plattform auf Basis der Container-Technologie Docker entwickelt. Fokus des Projekts liegt auf der Erfassung und Weiterleitung der Daten des Shopfloors [5]. Weiterhin ist die Skalierbarkeit der Lösung ein Anliegen, das durch die Nutzung von Docker gelöst werden soll. Die simple Nutzung steht nicht im Vordergrund der Lösung.

Im Projekt SePiA.Pro, gefördert vom BMWi, entsteht ein Servicesystem, das einen zu iSrv ähnlichen Ansatz verfolgt. Einzelne datenverarbeitende Services werden in Pakete verpackt und interagieren miteinander, um als Ergebnis den Produktionsprozess zu verbessern. Einige Unterschiede sind jedoch vorhanden. Das entwickelte System wird stark auf die zwei im Konsortium vorhanden Anwendungspartner fokussiert. Beide sind große Konzerne, die das nötige Wissen besitzen, um mit einer reinen Softwarelösung umzugehen. Diese Tatsache wird genutzt, um auf eine Integration und Einrichtung generischer Gateway-Lösungen zu verzichten.

Ein weiteres Projekt, das sich mit der Orchestrierung und Umsetzung von Servicelandschaften beschäftigt, ist das vom BMBF geförderte Projekt MultiCloud. Fokus dieses Vorhabens liegt auf dem Deployment verschiedener Smart Services auf unterschiedlichen Cloudplattformen. Wie bei den anderen Forschungsprojekten wird in diesem Projekt nicht explizit auf die Rückführung der gewonnenen Informationen eingegangen. Diese Tatsache stellt einen Unterschied von iSrv zu den restlichen Projekten dar. Die Rückführungskomponente, visuell sowie prozesseingreifend, ist fester Teil des Umsetzungsplans und wird in Form eines eigenen Baukastens realisiert.

Zusätzlich werden Eigenschaften wie Skalierbarkeit und die Unterstützung multipler Cloud-Plattformen im Projekt iSrv zwar beachtet, jedoch fokussiert sich das Projekt nicht darauf. Eben diese Eigenschaften sind für größere Firmen mit weitreichenderen Produktionslandschaften dringend nötig. Für KMU, die den Einstieg in die Servicewelt angehen, sind sie jedoch überflüssig und bezogen auf die Komplexität sogar hindernd.

1.4 Konzeption und Umsetzung

In diesem Kapitel werden die Konzepte der einzelnen Disziplinen innerhalb des intelligenten Servicesystems detaillierter vorgestellt. Zusätzlich zu den einzelnen Komponenten wird ein Konzept des architekturellen Aufbaus der Gesamtplattform dargestellt. Diese wird die einzelnen Baukästen verbinden und den durchgängigen Informationsfluss sicherstellen.

1.4.1 Anlagenanbindung

Die Aufgabe dieser Komponente ist es, die Verbindung zwischen einer Produktionsanlage und dem Servicesystem herzustellen. Besonderer Fokus liegt hierbei auf einer simplen Einrichtung. Zusätzlich sollen erfasste Daten grafisch mit der „Modellbildung und Analyse“-Komponente verbunden werden und deren als Eingangsparameter dienen. Im Folgenden wird erläutert, mit welchem Ansatz diese Komponente die Aufgabe löst.

Um iSrv an unterschiedliche Produktionsanlagen anbinden zu können, ist die Unterstützung von herstellerunabhängigen Kommunikationsprotokollen nötig. Dank der Unterstützung der OPC Unified Architecture (OPC UA), dem Kommunikationsstandard im Umfeld Industrie 4.0, können aktuelle Steuerungen verschiedener Anbieter angesprochen werden. Nichts destotrotz sollen weitere Kommunikationsstandards wie CAN, Profibus und M-Bus unterstützt werden. Hierbei wird vor allem auf ältere Maschinen abgezielt, deren Steuerung nicht mit einem OPC UA Server ausgestattet ist. Retrofitting, das Aufrüsten und Anbinden älterer Maschinen an aktuelle Technologie, ist gerade für kleinere Unternehmen sehr interessant. Um die verschiedenen Kommunikationsprotokolle bedienen zu können und gleichzeitig die Kommunikation zur iSrv-Plattform simpel zu halten, wird eine Gateway-Lösung angestrebt. Der Gateway soll hierbei in der Lage sein, die Datenmodelle der unterschiedlichen Protokolle auf ein einzelnes Datenmodell zu übertragen. Diese Daten werden anschließend über die Nachrichten-Protokolle MQTT oder AMQP an iSrv-Bausteine übertragen. In Abbildung 5 ist eine abstrakte Darstellung des beschriebenen Datenflusses zu sehen.

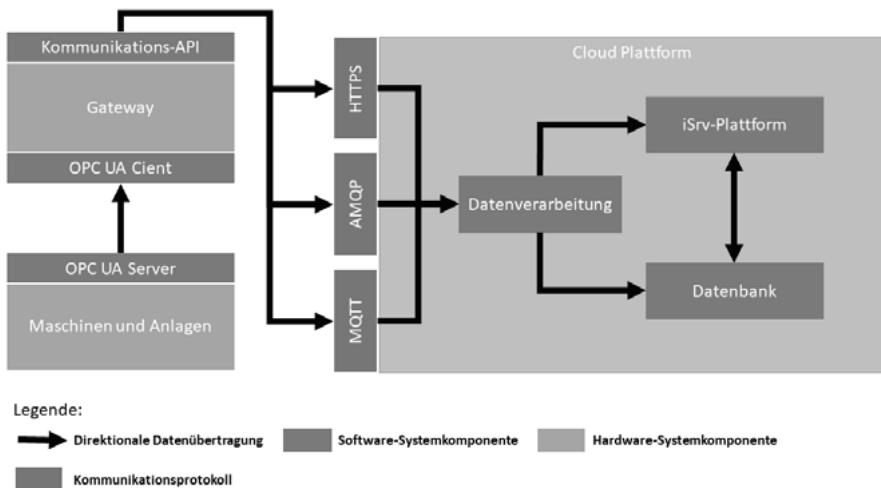


Abbildung 5: Datenerfassungskonzept des intelligenten Servicesystems iSrv

Von angeschlossenen Produktionsanlagen sollen sowohl Ist- und Solldaten als auch Prozessparameter wie etwa Temperatur und Energieverbrauch erfasst werden. Letztere sind wichtig, um eine Anpassung des Prozesses evaluieren zu können nachdem Anpassungen getätigt wurden. Wie in

Abbildung 5 dargestellt, ist bisher kein direkter Rückweg über eine bidirektionale Kommunikation vorgesehen. Prozessanpassungen werden ausschließlich über Maschinenbetreiber oder andere externe Systeme veranlasst. Analyseergebnisse aus iSrv geben Optimierungsmöglichkeiten in Form visueller Rückführung vor, ohne diese automatisiert durchzuführen.

Daten, die auf der ausführenden Plattform ankommen, können auf zwei Arten verarbeitet werden. Ein Service empfängt die Daten und gibt sie entweder an eine Datenbank zur persistenten Speicherung weiter oder sie werden direkt in weiteren Bausteinen weiterverarbeitet. Eine Kombination beider Möglichkeiten ist ebenfalls möglich. Bietet ein Service-Baustein die entsprechenden Schnittstellen an, kann dieser auch direkt vom Datengateway angesprochen werden, ohne über eine optionale Datenverarbeitungs-Komponente zu gehen.

1.4.2 Modellbildung und Analyse

Das Ziel dieser Komponente ist die Verarbeitung der erfassten Rohdaten zur Generierung von Informationen. Grundsätzlich sind hierfür zwei Schritte vorgesehen, die in Abbildung 6 zu sehen sind. Im ersten Schritt werden die erfassten Daten genutzt, um ein digitales Abbild der realen Produktionsanlage zu bilden. Auf Basis dieses Modells werden anschließend durch Analysen Erkenntnisse gewonnen. Es besteht die Möglichkeit, gewonnene Erkenntnisse direkt in das digitale Modell der Produktion einfließen zu lassen, um potentielle Optimierungen zu testen. Letzteres bietet die Option Änderungen virtuell zu testen, ohne die reale Produktion zu beeinflussen. Innerhalb dieser Komponente entsteht ein Optimierungskreislauf, dessen Ergebnis an die Rückführungskomponente übergeben werden kann.

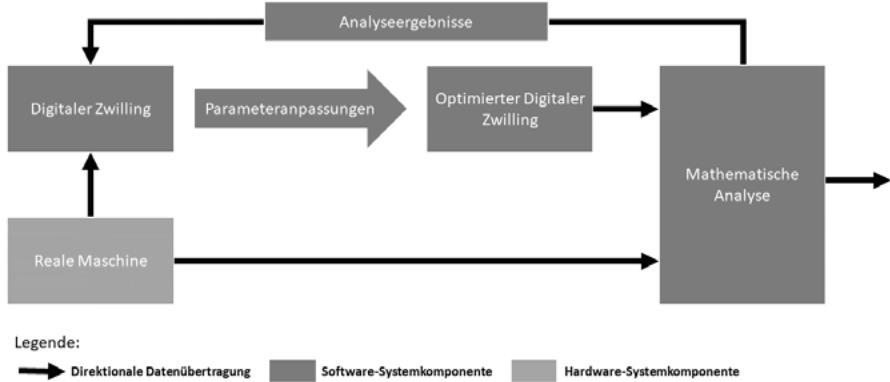


Abbildung 6: Kopplung von Verhaltensmodellen und mathematischen Analysen in iSrv

1.4.3 Informationsrückführung

Diese Komponente sorgt für einen geschlossenen Kreislauf der digitalen Produktion. Eine Erfassung und Analyse von Produktdaten erzeugt erst dann einen Mehrwert, wenn die generierten Informationen in die Produktion zurückfließen. In iSrv werden hierfür mehrere Ansätze angeboten. Die einfachste Art der Rückführung besteht in einer Visualisierung der Rohdaten durch Einbeziehung der Zeitachse. Ein Dashboard mit Diagrammen, die den Verlauf bestimmter Werte über einen gewissen Zeitraum darstellen, bildet eine feste Komponente des intelligenten Servicesystems. Einen Schritt weiter geht der Baukasten für die Visualisierung durch Augmented und Virtual Reality Anwendungen. Hierfür wird Unity, eine Spiele-Engine, an iSrv angebunden. Es ist hierdurch möglich, gewonnene Informationen direkt in eine Augmented oder Virtual Reality Anwendung zu überführen. In Abbildung 7 ist die Anbindung verschiedener Anlagen mit unterschiedlichen

Kommunikationsprotokollen visuell umgesetzt. Jedes der dargestellten Modelle bezieht seine Daten vom physischen Gegenstück und bewegt sich synchron dazu. Neben einer solchen 3D-Animation ist auch eine simplere 2D Visualisierung einer Produktionsstätte realisierbar. Bei beiden Optionen steht die Anbindung der Modelle an die erfassten Daten im Vordergrund. Diese Brücke zwischen physischer und digitaler Welt wird von iSrv geschlossen.

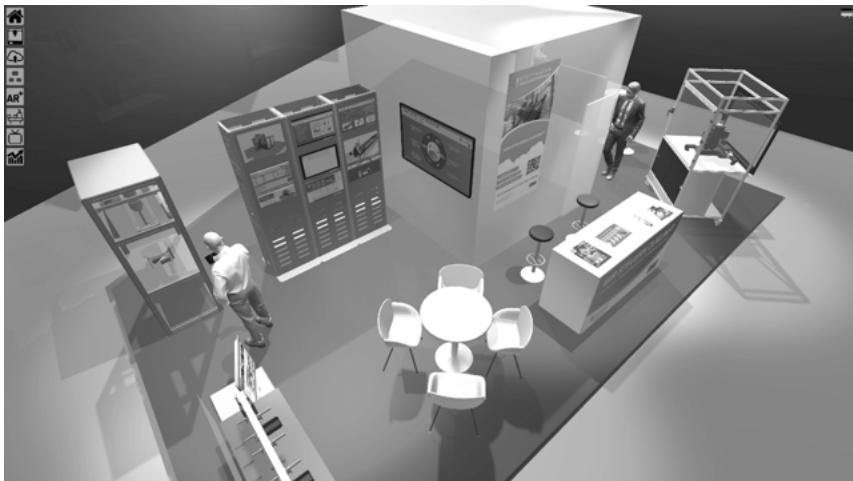


Abbildung 7: Visuelle Informationsrückführung in Form eines animierten Produktionsabbilds am Beispiel eines vernetzten Messestandes

1.4.4 Servicekonzepte

Zu Beginn des Forschungsprojekts wurden 17 unterschiedliche Firmen in einem offenen Gespräch, geleitet durch einen präparierten Interviewleitfaden, zur potentiellen Nutzung von iSrv befragt. Eine Erkenntnis aus diesen Befragungen ist die Tatsache, dass Firmen aus unterschiedlichen Branchen oft ein ähnliches Nutzungskonzept für iSrv haben. Aus diesem Grund werden in iSrv neben den einzelnen Baukästen und ihren Bausteinen auch komplett Servicekonzepte angeboten.

Ein Servicekonzept ist in diesem Fall definiert als die Aggregation einzelner Bausteine, die kombiniert einen wiederverwendbaren Nutzen erzeugen. Ein simples Beispiel ist das Servicekonzept Anlagenüberwachung, das aus einem Datenerfassungsbaustein besteht, der seine Daten in einen Analyseservice überführt. Dieser überprüft den zeitlichen Verlauf der Werte und erkennt Unregelmäßigkeiten. Diese Informationen werden vom Dashboard-Baustein visualisiert und stehen so dem Shopfloor-Verantwortlichen zur Verfügung. Das Servicekonzept besteht entsprechend aus drei Bausteinen und ist mit unterschiedlicher Parametrisierung mehrmals anwendbar.

Auch komplexere Servicekonzepte lassen sich auf diese Weise zusammenfassen. Soll beispielsweise nicht nur auf Anomalien im Werteverlauf analysiert, sondern Grenzwerte für gewisse Werte beachtet werden, sind zusätzliche Parameter nötig. Für die Parametrisierung der einzelnen Bausteine ist in diesem Fall nicht das Servicekonzept verantwortlich. Die Bausteine selbst übernehmen diese Aufgabe, indem Sie eine grafische Einstellungsmöglichkeit für eingehende Werte, ausgehende Werte sowie für weitere lokale Parameter bieten. Lokal zu definierende Parameter sind im genannten Beispiel etwa die obere und untere Grenze für gelesene Werte.

Durch die Nutzung von Servicekonzepten wird der Umgang mit iSrv bei Bedarf noch weiter vereinfacht. Für Experten besteht durch die Möglichkeit, Bausteine frei zu kombinieren jedoch weiterhin der volle Funktionsumfang des Systems. Des Weiteren können Servicekonzepte als

Vorlage für eine komplexere Servicelandschaft genutzt werden, indem man das gewählte Servicekonzept anschließend mit zusätzlichen Bausteinen erweitert.

1.4.5 Baukasten-Konzept

Die bisher beschriebene Funktionalität von iSrv lässt die Fragen offen, wie die Bausteine genau aufgebaut sind und durch welche Methodik sie sich aggregieren lassen. Die Darstellung aus Abbildung 8 gibt die Antworten auf diese Fragen. Jeder Baustein enthält eine Beschreibung in Form einer Konfigurationsdatei, die drei verschiedene Informationen bereitstellt.

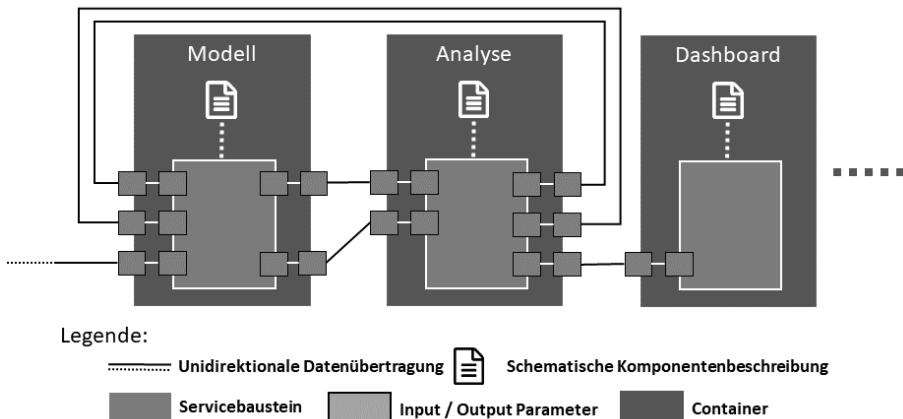


Abbildung 8: Realisierungskonzept der Bausteine im intelligenten Servicesystem

In einem funktionsbeschreibenden Teil der Datei wird beschrieben, was der Baustein leisten kann. Diese Informationen sind für den Nutzer wichtig, der den Baustein in seine Servicelandschaft integrieren möchte und daher wissen muss, welche Funktionalität geboten wird. Die Beschreibung ist in menschlicher Sprache festgehalten, da Sie nicht von einer Maschine interpretiert werden muss. Jeder Anbieter eines Bausteins ist dafür verantwortlich in diesem Text zu erklären, was der Baustein macht und wie er genutzt werden kann.

In einer Schnittstellenbeschreibung sind die Informationen dargestellt, die für die tatsächliche Nutzung des Bausteins wichtig sind. Insbesondere die Definition der Eingangs- und Ausgangsparameter sind in diesem Teil zu finden. Neben einem eindeutigen Namen für jeden Parameter sind Attribute wie ein primitiver Objekttyp und eine Updatrate anzugeben. Sind diese Angaben für beide Parameter, Ein- und Ausgang, definiert, lassen sich Verbindungen zwischen ihnen bilden. Ein vorgegebenes Schema für diese Beschreibung sorgt für eine einheitliche Schnittstellenbeschreibung eines jeden Bausteins. Dies ermöglicht nicht nur Verbindung von Ein- und Ausgang eines Bausteins, sondern ebenfalls eine Verbindung über Bausteingrenzen hinweg. Das Verknüpfen beliebiger Bausteine ist somit möglich. Um eine möglichst systemunabhängige Ausführung der Bausteine zu gewährleisten, sind alle Bausteine in Software-Containern verpackt.

Die dritte Form der Beschreibung eines Bausteins vermittelt Informationen über die benötigte Infrastruktur, um den Baustein auszuführen. Hierbei wird sowohl die Software- als auch die Hardwareinfrastruktur beschrieben. Für beide Infrastrukturtypen liegt ein Schema vor, an das sich die Beschreibung halten muss. Die Softwareinfrastruktur beinhaltet Abhängigkeiten wie das unterliegende Betriebssystem, externe Bibliotheken, benötigte Frameworks und andere Software. Das Schema dient zwei Zwecken. Zum einen kann der menschliche Nutzer sehen, welche Software im

Baustein ausgeführt wird. Zum anderen kann die Beschreibung genutzt werden, um automatisiert einen Softwarecontainer zu bauen, der die gewünschte Infrastruktur bietet. Die Hardwareinfrastruktur sorgt für eine passende Zuordnung des Bausteins zu angebotenen Infrastrukturpaketen des gewählten Cloud-Anbieters zur Ausführung des Bausteins.

1.5 Zusammenfassung und Ausblick

Fast sieben Jahre nach dem offiziell ausgerufenen Start von Industrie 4.0 ist eine konkrete Umsetzung bei vielen KMU noch nicht gestartet. Die Ursache ist Studien [2, 3] nach zu urteilen, die Komplexität der eingesetzten Technologien sowie die fehlende Fachausbildung der Mitarbeiter. Dies hat zur Folge, dass viele KMU das Potential der Digitalen Produktion nicht nutzen können.

Das vorgestellte Konzept kann diese Komplexität senken und Technologien für KMU nutzbar machen. Dies wird durch die Verwendung eines baukastenbasierten Ansatzes zur Erstellung und Orchestrierung einer Servicewelt ermöglicht. Ein Benutzer soll durch die Nutzung von grafischen Oberflächen ein Servicekonzept für seine Produktion wählen können. Dieses Konzept besteht aus Bausteinen der Kategorien Datenerfassung, Datenmodellierung, Datenanalyse und Rückführung. Aggregiert ergeben diese Bausteine einen kompletten Zyklus der Digitalen Produktion.

Im nächsten Schritt werden die vorgestellten Konzepte weiter ausgebaut und für mehrere Anwendungsfälle konkret umgesetzt. Ein wirtschaftlicher Nutzen ist bisher nicht möglich, da im System weder eine Nutzerverwaltung, noch ein Abrechnungssystem integriert ist. Diese Komponenten sollen im weiteren Verlauf des Projekts prototypisch umgesetzt werden.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Forschungsprogramm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen (Förderkennzeichen 02K16C010) gefördert und vom Projekträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

1.6 Literatur

- [1] Bundesregierung, *Hightech-Strategie: Innovationen für Deutschland*. [Online] Available: <https://www.hightech-strategie.de/>.
- [2] VDMA, *Industrie 4.0-Readiness IMPULS Studie*. Available: <http://www.vdma.org/article/-/articleview/10153247>. Accessed on: Jan. 23 2018.
- [3] B. T. iit-Berlin, *Industrie 4.0: Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland*.
- [4] acatech (Hrsg.), *SMART SERVICE WELT: Digitale Serviceplattformen –. BEST PRACTICES*.
- [5] Beu, A. et.al.: “Industrielle Apps für den Mittelstand erleichtern Industrie-4.0-Anwendungen,” *Einkaufsführer Produktionsautomatisierung 2018*.

2 In-Process Quality Assurance for Selective Laser Melting through Online Generation of Key Performance Indicators in Context of Industrie 4.0

R. Pastl Pontes, E. Uhlmann, IPK, TU Berlin

2.1 Introduction

The Additive Manufacturing (AM) technology has been showing itself as an alternative for manufacturing workpieces. The reason is because it enables the production of parts with more complex geometries in comparison to the conventional manufacturing technologies [1, 2, 3]. The numbers of commercial Additive Manufacturing machines in use worldwide jumped from 355 in 2008 to around 23,000 in 2013 [4]. Approximately 66 % of these machines are installed especially in the USA (38 %), Japan (9.4 %), Germany (9.1 %), and China (8.8 %) [5].

Such machines are being used by different sectors of the industry such as energy, aviation, automotive and medicine. These sectors are focusing their efforts on learning and using AM technology to manufacture products with optimized geometries. For this purpose, they are using distinct and innovative materials, and new process parameters [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. In addition, they are researching and applying the results to their products to improve efficiency, decrease weight and, consequently, the manufacturing costs. This reinforces that the demand for flexible and innovative manufacturing technologies at the industrial sector is increasing.

These efforts of the industry are also reflected, for instance, on the 3.71 billion euros globally generated by the relevant market participants of Additive Manufacturing in 2014 [5]. An exponential increase of revenue to more than 21 billion Euros is expected by year 2020. According to [5], Europe is the second most important market for AM with 29.1 %, directly after North America with 40.2 %.

Due to this raising demand and importance of the Additive Manufacturing technologies trend studies and market analysis have been carried out since 2010 by [17, 18]. Such studies and analyses have been performed in order to understand the current needs of the industry. One outcome of those surveys is that amid the several technologies that comprise Additive Manufacturing, the Selective Laser Melting (SLM) is the most attractive technology for the interviewed companies. The major reason for this attraction is the fact that SLM technology can manufacture metallic functional and lightweight workpieces.

However, in order to use these machines in mass production, the process performance must be considered [13, 18]. Taking into account the satisfaction rate of the companies that are using the SLM technology the majority of the interviewed companies was satisfied with a rate of 52 % regarding component reproducibility. In general, around 19 % of the companies were completely unsatisfied with the SLM technology.

Within this context, four main questions appear and are addressed in this work with the purpose of improving the SLM technology and machines. The first addresses what should be measured at the machine. The second question is related to how the data could be acquired from the machine. The third concerns the data processing and visualization and, the last one, is connected to the information that could be extracted from the processed data of the machine. The use of trend line of ‘Industrie 4.0’ approach helps to access and visualize the data online during the manufacturing of a workpiece, leading to an early identification of failures in the process.

2.2 Related Concepts

2.2.1 Selective Laser Melting

The AM is a technology to manufacture workpieces through addition of material, by joining layers with equal thickness [3, 19]. This technology is also commonly known as Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, and Layer Manufacturing [20, 21, 22]. The significance of such technology has been increasing over the years due to its capability of manufacturing complex geometries with varied materials [5].

According to [23], all those names are a representation of a main group. A precise specification of an individual technique is performed by [19]. In that work, the differentiation was carried out by categorizing the techniques according to the state of aggregation of the used material (i.e. liquid, solid, or gas), to the physical principles (i.e. melting, polymerization and cutting), and the used method (i.e. stereolithography, laser melting, heat melting, etc.).

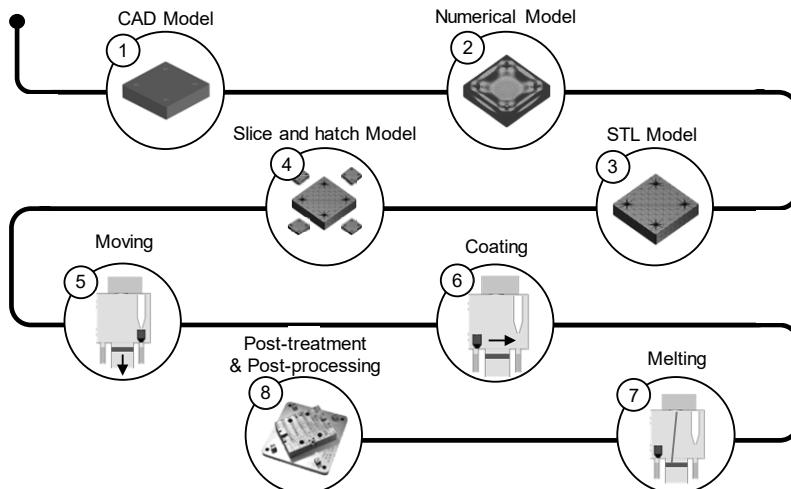


Figure 2.2.1: Steps to manufacture a workpiece with SLM technology [3]

SLM manufacturing technology is a special technology of AM. It is a manufacturing process that uses a metal powder bed and a thermal energy supplied by a computer controlled and focused laser beam to build a workpiece [1, 24]. The layer thickness varies from 20 µm to 150 µm and the size of the metal grain has a range from 10 µm to 75 µm [17, 19]. The main steps to complete the part manufacturing are shown in Figure 2.2.1. It starts from the design in Computer-Aided Design (CAD) software and finishes in a post-processing stage, in which the desired mechanical characteristics are reached. According to [3, 19], the manufacturing of a workpiece starts with the three-dimensional CAD model. After that, the model is digitally optimized in order to reach the dimensional tolerances and properties.

Once those are reached, the CAD model is transformed into a Stereolithography (STL) model, which is a triangulated representation of the CAD model. By manipulating the data of the STL model, it is possible to define the desired position and angles for building the part as well as the melting strategy. With this characteristic determined, the thickness of a layer is specified and the STL model sliced digitally. The generated data containing the manufacturing details is then downloaded to the SLM machine in order to be able to manufacture the workpiece. When the generated data is processed by

the SLM machine, the manufacturing process can be started and a cycle begins. Firstly, a platform is lowered in order to give the desired thickness of the layer. Secondly, a thin layer of metal powder is placed on the platform using a recoating system. Thirdly, a laser beam is used to melt the selected geometry in the top-most layer of this powder bed. This cycle is repeated until the last layer of the workpiece is built. The last step is the post-processing of the built workpiece. After the part is manufactured, it is separated from the platform, cleaned, and depending on the requirements of the customer, it may be polished and/or grinded to achieve the specifications.

2.2.2 Process Model and Key Performance Indicators

The process model is a representation of the sequence of performed actions and tasks by the process that are necessary to transform the inputs into the output [25]. The map documents processes, describes how the tasks are performed and how the internal processes (main steps) are connected to each other. In addition, it provides information to understand the complete transformation process, allowing the teams to identify non-conformity points and solve the detected problems.

The measurement of the production in any business is necessary in order to show the gap between the current and the desired performance. Such performance is measured through carefully selected indicators that are important to the business, normally known as Key Performance Indicator (KPI) [26]. KPIs help the company to evaluate its own achievements during a determined period of time. Furthermore, it supports the company to define goals, and to take actions to avoid problems. For instance, they can measure the time to deliver the product to the customer, the production time, the costs to produce one single component, and the number of failures that influenced the product quality. They also aid to verify how a company responds after a change might have been performed in an internal process. A KPI depends on the company and on the area that it is inserted, as critical factors differ from area to area.

2.2.3 Industrie 4.0

The term ‘Industrie 4.0’ is a symbol of the fourth generation of industrial activity characterized by smart systems and Internet-based solutions [27]. The first revolution took place in the 1800-1900’s century, when production was mechanized. It meant that production was moved from the home or small workshops to large factory units and a new social class was born. The second revolution occurred in the 1900 century when the production was electrified and parts and processes were standardized. The archetype of this revolution is Ford’s assembly line. The digitization of production, marked by introduction of Programmable Logic Controllers (PLC) in late 1960s, is usually called the third revolution.

This fourth industrial revolution is based on the Information and Communication Technologies (ICT) evolution and data driven decision-making processes by the means of Big Data. Within the characteristics of this fourth industrial revolution, two are focused: cyber-physical systems and intelligent factories [28]. According to [29], cyber-physical systems are integrated computer-based or digital components that monitor and control physical devices, also called embedded systems. They communicate over a network based on internet technology, and create an ‘Internet of Things (IoT)’. With the combination of these two concepts, a distributed network of embedded systems communicating with each other in an ad hoc and dynamic way can be created. This could lead to an improved quality of services, new savings, enhanced resource utilization and efficiency. Industrie 4.0 could provide foundation for the next generation of manufacturing technologies based on the use of advanced information logistics analytics to transform the current state of the art manufacturing platforms into a network of collaborative machine communities’ seamlessly manufacturing and delivering goods and services in a planned way.

2.3 Methodology

The methodology carried out in this work is shown in Figure 2.3.1. At first, the developed SLM model by [30] and the functionalities of the chosen SLM machine are studied. Then, from the KPIs also developed by [30], a set is selected. From this point, two paths are followed. The left path from the figure is related to how the data could be acquired from the SLM machine, processed and visualized online. The right path of the same figure is concerned at the identification of failures that impact the manufacturing process. Then, an analysis is performed in order to observe whether connections are found between KPI and failures by manufacturing a workpiece containing the chosen failures. Lastly, this work is concluded.

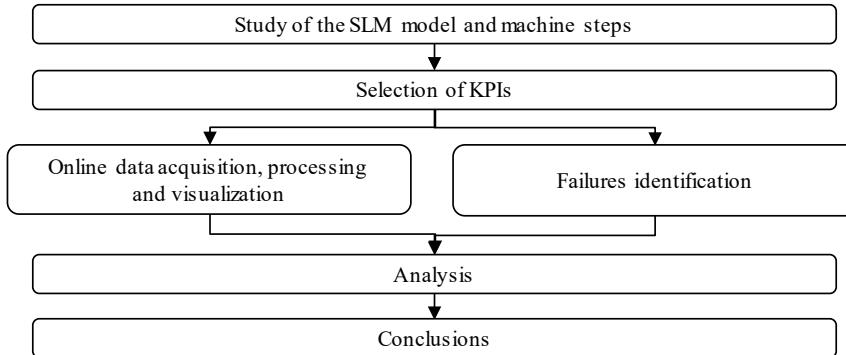


Figure 2.3.1: Applied methodology

2.3.1 Selective Laser Melting machine steps and model

The Selective Laser Melting machine chosen for this work is the model SLM250HL from the company SLM Solutions AG, Germany. The machine is comprised essentially of a laser device, a cooling device, seven motors for the motion of internal components, and pumps for the protection gas and vacuum system. Moreover, a computer is used to control the process and to gather the data, to input the workpiece design in layers and to configure the melting strategy. Figure 2.3.2a brings the outlook of the SLM machine.

Figure 2.3.2b shows the general steps performed by this specific machine to manufacture a workpiece. The manufacturing process starts with the process settings being configured. Then, the first layers are made by operating the recoater device manually. Consequently, the related layer geometry is melted. At this point the automatic manufacturing process takes place. The platform goes down and the recoater device is driven to the front side of the process chamber. After the recoater reaches the front side, the next layer geometry is melted. The platform goes down and the recoater device is driven back to the initial position (rear position). This is considered one cycle of the machine. After repeating several cycles until the workpiece is manufactured, the process is finished.

The process model for this machine was developed in [30] and it is shown in Figure 2.3.3. The manufacturing process starts after the five considered inputs from the figure are available. Then, the operator of the machine can add metal powder to the platform. In addition, the computer begins the machine warm up, waiting for some parameters of the machine to reach their values, such as the oxygen percentage inside of the process chamber and the platform temperature. Only when these parameters are reached the process is allowed to continue, unblocking the laser device. This is the ‘Warm-up’ lane. The necessary time to perform this task is called t_{START} .

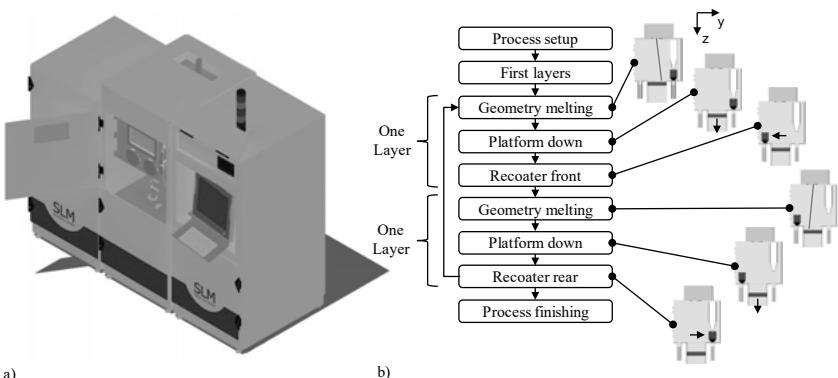


Figure 2.3.2: Selective Laser Melting machine tool and its manufacturing process steps:
a) chosen machine tool model; b) manufacturing steps of the chosen machine tool

With the laser device unblocked, the process goes to next lane ‘Laser’. This lane represents the laser device itself. It receives the command to release the power to melt the desired geometry for the specific layer. After the respective geometry is melted, the laser device is blocked. Subsequently, it is checked if the melted layer is the last layer of the workpiece. In case of the last layer, the workpiece is ready, and the machine can be switched off. The needed time to melt a single layer is called t_{LASER} .

When the melted layer is not the last one, the platform is then released to reach the desired layer thickness, what is done within the time $t_{PLATFORM}$ inside the lane ‘Platform’. After reaching the desired thickness, the platform is blocked and the recoater device is unblocked. Before moving the recoater device, the amount of powder is checked in the lane ‘Filling’ and the level of material verified. If there is not enough metal powder in the recoater tank, it is refilled. During this task, the necessary time $t_{FILLING}$ is calculated. If the amount of powder is within the range, the recoater device is allowed to move, and the process goes to the lane ‘Recoater’.

Once in this lane, the recoater current position is analysed to define in which direction it should be moved. This is made because the recoater can spread metal powder in both directions, due to the characteristic of the observed machine. This recoater motion time is also calculated and called $t_{RECOATER}$. After the recoater device moved from one side to another and the metal powder is available on the platform, the recoater device is blocked. Then, the laser device is unblocked. Thus, the process returns to the ‘Laser’ lane, but with the parameters of the new layer to be melted.

The spent time to lower the platform, to fill the recoater tank, and to spread the metal powder on the platform of single a layer is called $t_{LAYERING}$. This time represents the sum of the spent time of the subsystems responsible for creating a metal powder layer.

The last point to be reviewed regarding time of a single layer is the following. Once the machine is not performing any of the described tasks of either layering or melting in a layer, it is considered as the machine is found in an idle situation. This situation is a result of system or component failures, leading the machine to stop in a specific layer. This is an undesired circumstance for any process. Therefore, it must be considered, and it was described as t_{IDLE} .

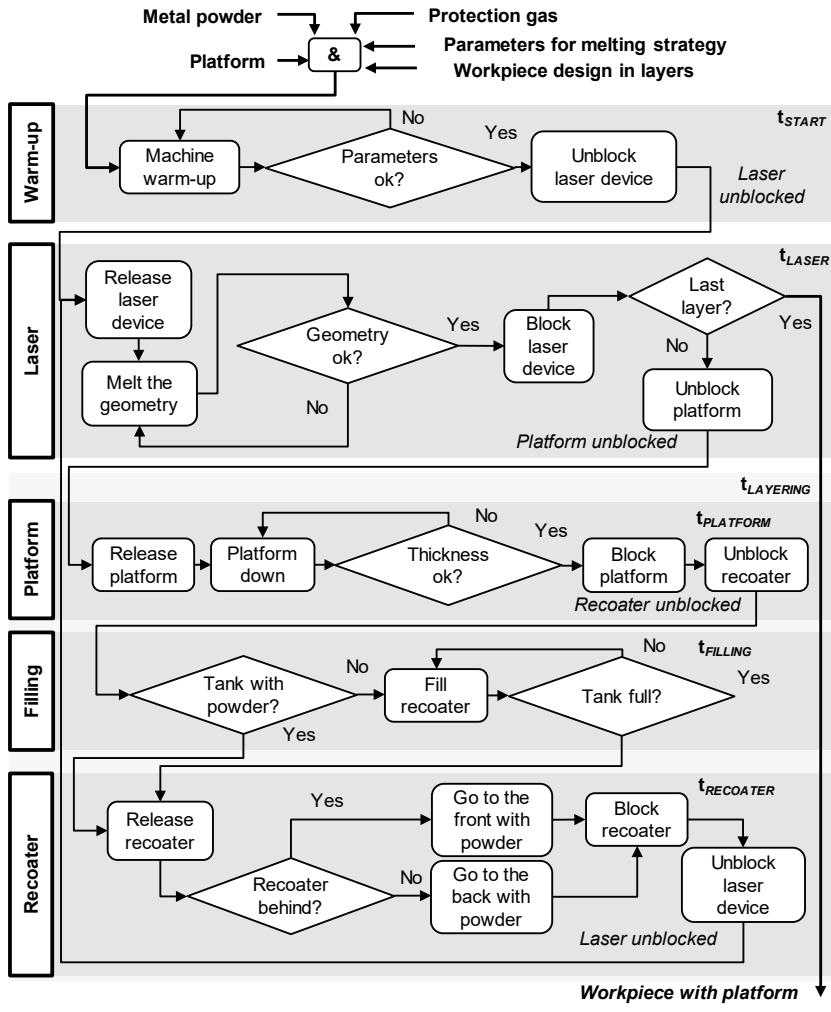


Figure 2.3.3: Process model for the chosen Selective Laser Melting machine tool [30]

2.3.2 Selection of Key Performance Indicators

The KPIs developed in [30] are shown in Figure 2.3.4. They are separated into three levels. The indicators are related to the failures and the necessary time to manufacture a single layer, the time needed per each step, the total time to manufacture a workpiece and the failures that occurred during the manufacturing process.

In order to observe the behavior of the machine in a single layer during a manufacturing process, two of the 15 indicators were chosen. The selected indicators are highlighted in black in Figure 2.3.4, which are concerned at the layering time in seconds per layer and the idle time in seconds per layer.

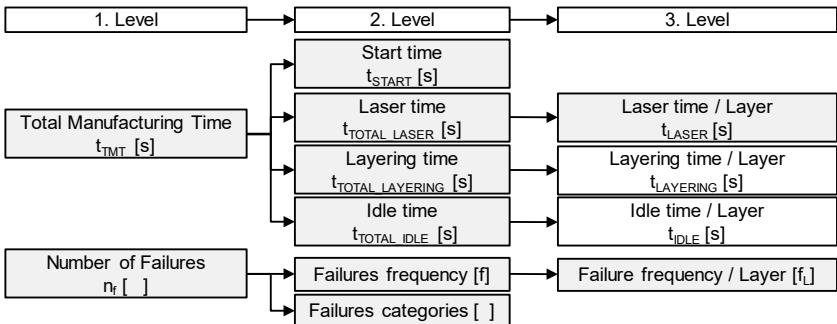


Figure 2.3.4: Developed Key Performance Indicators [30]

2.3.3 Online data acquisition, processing and visualization

In order to acquire the data from the log file written and stored by the machine controller, it was necessary to follow the steps from Figure 2.3.5. This was performed due to the strategy of the SLM machine manufacturer. The information of the machine and process cannot be accessed directly from the machine controller. Therefore, a solution based on low cost computers was developed to acquire, process, and send the data to the cloud.

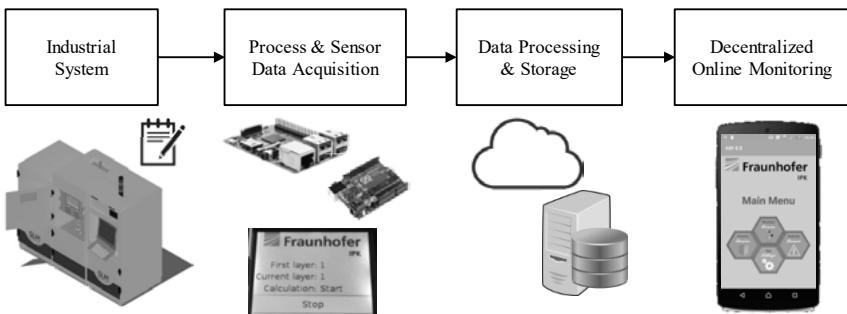


Figure 2.3.5: Steps to acquire, process, store and visualize the SLM machine tool data

The developed device is connected via USB to the machine where it reads the process and sensors log files each 2 seconds. During the reading, it identifies the current manufacturing step, calculates the KPIs and pre-processes the sensor data. Then, it sends the data to local server (the cloud) via wireless network. After the data is available in the cloud, an android application is able to read the data online remotely using the local wireless network.

2.3.4 Failures identification

The identification of failures is performed taking into account a database with the process data of 150 manufacturing processes from 2014 to 2016. It is first observed which are the subsystems of the SLM machine that were most influenced by failures. The overview is represented in Table 2.1. The five first subsystems were selected. Cooling system, platform mechanism, gas pump, heating system and process room pressure system were the subsystems that more individually contributed to the amount of failures within the mentioned period. The causes are still being analyzed. Therefore, the observed behavior of each subsystem after a failure is described in the same table. The goal is to simulate the

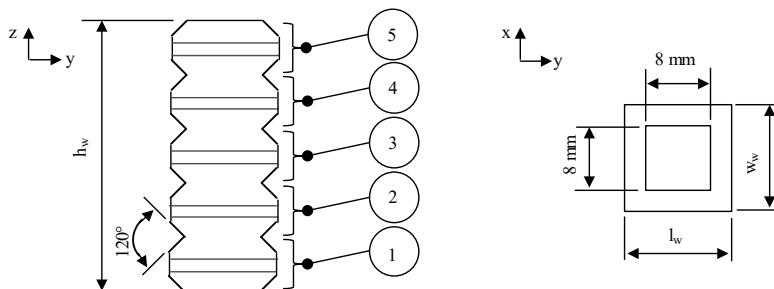
same behavior to observe if the KPIs change and whether a generic workpiece layer is affected by such faulty conditions.

Table 2.1: Most influenced subsystems due to failures

Subsystem	Influence Percentage (%)	Observed Behavior
Cooling System	26	Off
Platform Mechanism	16	Under Sensor On
Gas Pump	10	Off
Heating System	9	Off
Process Room Pressure System	9	Off
Others	30	It depends on subsystem

2.3.5 Analysis

The objective of the analysis is to verify if the selected KPIs are able to sense the combination of symptoms addressed in Table 2.1. The acquisition is performed by designing and manufacturing a workpiece, where the faulty behaviors of the machine are reproduced during the production of specific layers.



Workpiece geometry and failures distribution per layer

1. Platform	Layers 210 and 240	Height	h_w	=	125	mm
2. Pressure	Layer 280	Length	l_w	=	10	mm
3. Heater, cooling, pump and pressure	Layers 310 and 340	Width	w_w	=	10	mm
4. Heater, pump and pressure	Layers 360 and 380	Layer thickness	e_w	=	50	μm
5. Heater, cooling and pressure	Layers 410 and 440	Number of layers	n_w	=	250	

Figure 2.3.6: Workpiece geometry and failures distribution to acquire the KPIs

The workpiece characteristics are shown in Figure 2.3.6. In total, the workpiece together with support structure have 450 layers with 50 μm each, resulting in a height of 225 mm (125 mm from the workpiece and 100 mm from the support structure). Five regions were defined in the workpiece where the combination of the behaviors is simulated. The material used to manufacture the workpiece is the aluminum alloy AlSi10Mg.

2.4 Results

During the manufacturing of the workpiece, the information about the two selected KPIs from Figure 2.3.4 were gathered online and the results are plotted in Figure 2.4.1. In the figure, it can be observe that the faulty conditions simulated were detected by the KPIs. The peaks in Figure 2.4.1a are not failures, but the time necessary to fill up the recoater tank. However, the lowest valleys (highlighted by the circles) represent failures (regions R1, R3 and R5). The faulty behaviors in the regions R2 and R4 did not influence the indicator ‘layering time per layer’.

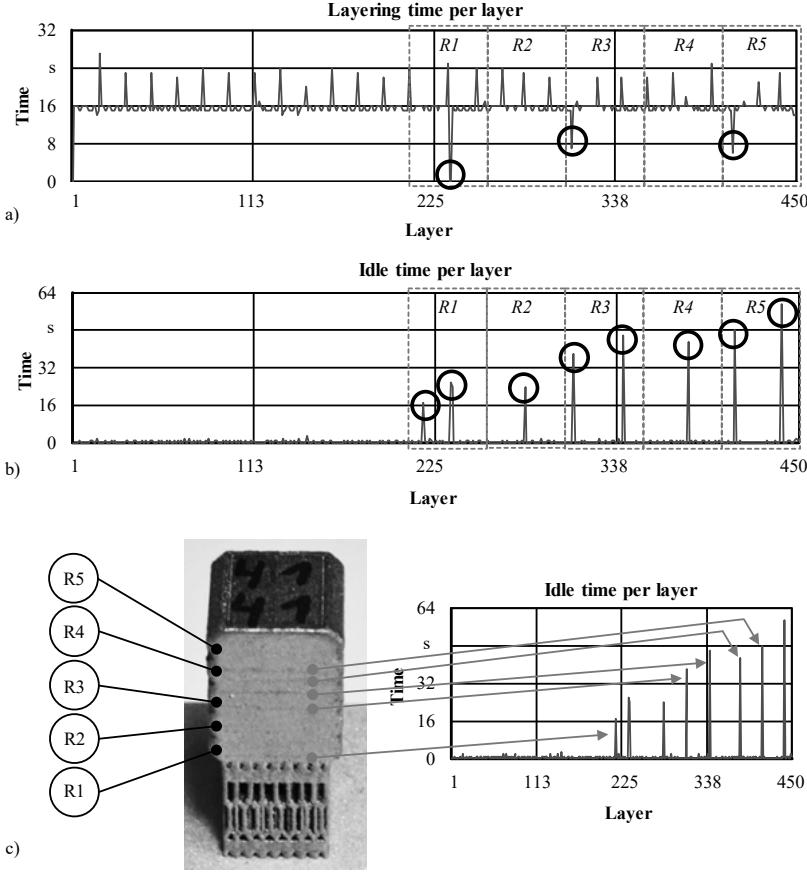


Figure 2.4.1: Values of the KPIs after the manufacturing:
a) layering time per layer; b) idle time per layer;
c) final workpiece geometry and the surface connection to the KPI

In region R1, from the two simulated behaviors, only the second one resulted in variation in the KPI, which came from the platform sensor faulty behavior. In R3, only the combination of the cooling system and gas pump was perceived, because the machine functions were hold in standby situation. In region R5, only the combination of a faulty heater system and cooling system was detected by this

indicator. Regarding this KPI, the identification only occurred because the machine did not spread metal powder for the layers 240, 310 and 410, which led to a smaller workpiece in, at least, 150 µm.

Analyzing the KPI “idle time per layer” plotted in Figure 2.4.1b, high peaks are observed. These peaks represent the machine behavior due to the simulated faulty conditions combined. All the faulty conditions made the machine stop. The variation of idle time (the peaks) is not dependent on the combination, but on how fast the situation is recognized, solved and released by the operator.

The only combination not identified by the KPI was from heater and gas pump. When a failure occurs, either at heater or at gas pump, the machine does not consider any of them as a condition to stop the machine. Therefore, the KPI could not interpret as an idle situation. In general, from nine simulated conditions, eight were detected by the KPIs, especially by the “idle time per layer”, resulting in an identification percentage of 89 %.

Figure 2.4.1c brings the manufactured workpiece and the chart of the KPI “idle time per layer”, showing the possible connections between visual identification of the resulting faulty behaviors at the workpiece and peaks from the KPI. The surface encountered on the layers where the faulty conditions were simulated showed imperfections and they could be detected by the KPI. Five from the faulty conditions could be observed in the figure (red arrows), reaching a total of 56 % of the detection.

However, more experiments should be performed in order to investigate deeper the relation between the KPIs and failures. Nevertheless, the connection can be observed. The use of the “idle time per layer” could be used to monitor if the workpiece will have imperfections on the surface. In addition, the utilization of the “layering time per layer” could be performed to estimate the final size of the workpiece.

2.5 Conclusions

In this work was carried out the development of the concept for data acquisition for monitoring the component quality produced with SLM technology by generating and supervising online the KPIs following Industrie 4.0 approach. Therefore, it was firstly studied the behavior and the process model of a SLM machine. Then, two from the already developed KPIs were selected to monitor the process. After that, a device was developed to read the data from the machine, process and send them to the cloud, where the online visualization of the information during the manufacturing process takes place.

Next, the subsystems most influenced by the number of failures were prioritized and their observed behavior listed. A reference workpiece in aluminum alloy AlSi10Mg was manufactured in order to verify possible changes in the chosen KPIs, simulating the combination of the diverse observed behaviors in specific layers. By monitoring the KPIs, 89 % of the simulated faulty conditions were detected, especially by the “idle time per layer”. Connections between visual identification of the resulting faulty behaviors at the workpiece and peaks from the KPI were observed, detecting 56 % of surface failures. The other KPI, “layering time per layer” could be used to estimate the final size of the workpiece.

More experiments will be performed in future works. They will address other materials and geometries in order to investigate more quality issues. Furthermore, the measurement of the workpiece will be also considered to compare the real results to the estimation realized using the values of the “layering time per layer”.

2.6 References

- [1] Kruth, J. P.: Material Increase Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 40/2, 1991, pp. 603-614
- [2] Kruth, J. P.; Leu, M. C.; Nakawa, T.: Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, CIRP Annals – Manufacturing Technology 47/2, 1998, pp. 525-540
- [3] Zaeh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien – AnwenderLeitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. Munich: Hanser, 2006
- [4] N.N: Number of commercial 3D-printing machines in use worldwide in 2008 and 2013 2015, available at: [http://www.statista.com/statistics/261737/number-ofcommercial-3d-printing-machines-worldwide/](http://www.statista.com/statistics/261737/number-of-commercial-3d-printing-machines-worldwide/)
- [5] Wohlers, T: Wohlers Report 2015 – 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. ISBN 978-0-9913332-1-9, 2015
- [6] Meier, H.; Haberland, CH.: Experimental studies on selective laser melting of metallic parts, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 39, No. 8, 2008, DOI: 10.1002/mawe.200800327
- [7] Thijss, L.; ET AL.: A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. Acta Materialia Journal 58, 2010, pp. 3303-3312
- [8] Bartkowiak, K.; ET AL.: New Developments of Laser Processing Aluminium Alloys via Additive Manufacturing Technique. Physics Procedia Journal 12, 2011, pp. 393-401
- [9] Emmelmann, C.; ET AL.: Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design. Physics Procedia Journal 12, 2011, pp.364-368
- [10] Brotan, V.: A new method for determining and improving the accuracy of a powder bed additive manufacturing machine, In: International Journal of Advanced Manufacturing Technologies 74, 2014, pp. 1187-1195
- [11] Matilainen, V.; Piili, H.; Salminen, A.; Syvänen, T., Nyrhilä, O.: Characterization of Process Efficiency Improvement in Laser Additive Manufacturing, In: Proceedings of the 8th International Conference on Photonic Technologies (LANE 2014): Physics Procedia 56 2014, pp. 317-326
- [12] Godfrey, D.: Additive Manufacturing (AM) and the Honeywell Global Initiative, In: Proceedings of the ISABE 2015, 2015
- [13] Kinsella, M. E.; Dutton, R.; Carlson, D.: Additive Manufacturing Overview: The Qualification Pathway, In: Proceedings of the ISABE 2015, 2015
- [14] König-Urban, K.: Additive Fertigung von Nickelbasis-Superlegierungen mittels Laserstrahlschmelzen am Beispiel von Diamalloy 4004NS. Berichte aus dem Produktions-technischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2015
- [15] Mansson, T.; Forsman, S.; Heralic, H.; Sjunnesson, A.: Proposed qualification strategy for additively manufactured materials in load carrying applications for jet engines, In: Proceedings of the ISABE 2015, 2015
- [16] Sebastian, J.; Olson, G.; Snyder, D.: QuesTek's Integrated Computational Materials Engineering (ICME) approach to the design and development of new materials for aerospace and additive manufacturing applications. In: Proceedings of the ISABE 2015, 2015
- [17] Uhlmann, E.; Urban K.: Markt- und Trendstudie 2010 Laserstrahlschmelzen; ISBN 978-3-9814405-1-5; Fraunhofer IPK, 2011

- [18] Uhlmann, E.; Bergmann A.: Markt- und Trendstudie 2013 Laserstrahlschmelzen; ISBN: 978-3-945406-00-7; Fraunhofer IPK, 2014
- [19] Gebhardt, A.; Hötter, J.: Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Hanser, 2016
- [20] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Munich: Hanser, 2007
- [21] VDI3404, (12.2009) Generative Fertigungsverfahren – Rapid-Technologien (Rapid Prototyping): Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarkeiten. Berlin: Beuth
- [22] VDI3405-2, (08.2013) Additive Fertigungsverfahren – Strahlschmelzen metallischer Bauteile – Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung. Berlin: Beuth
- [23] DIN 8580-09, (2003) Fertigungsverfahren – Begriff, Einleitung. Berlin: Beuth
- [24] Levy, G. N.; Schindel, R.; Kruth, J.-P.: Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State Of the Art and Future Perspectives. CIRP Annals, Vol. 52/2, 2003
- [25] Peter, P.S.; Neuman, R.S.; Cavanagh, R.R.: The Six Sigma way: how to maximize the impact of your change and improvement efforts, 2nd edition, New York, McGraw-Hills Companies, 2014
- [26] Weber, A.; Thomas, R.: Key Performance Indicators (KPI), Measuring and Managing the Maintenance Function, Ivara Corporation, Burlington, 2005
- [27] Lasi, H.; Fettke, P.; Feld, T.; Hoffmann, M.: Industry 4.0, Business & Information Systems Engineering: Vol. 6: Iss. 4, 2014, pp. 239-242, available at:
<https://aisel.aisnet.org/bise/vol6/iss4/5>
- [28] Ashton, K.:That “Internet of Things” Thing. RFID Journal, 22, 2016, 97-114
- [29] Lee, E. A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges, Technical Report No. UCB/EECS-2008-8, 2008, available at: <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8.html>
- [30] Uhlmann, E.; Pastl Pontes, R.; Bergmann, A.: Prozessmodell für selektives Laserstrahlschmelzen: Ein Prozessmodell für das Qualitätsmanagement des Fertigungsprozesses. Wt Werkstatttechnik online, 106 7/8, 2016, pp. 563-568

3 Potentiale zur Steigerung der Maschinenverfügbarkeit durch schnellrechnende Komponentenmodelle am Beispiel Kugelgewindetrieb (KGT)

B. Eßer, M. Fey, Ch. Brecher, WZL, RWTH Aachen

3.1 Einleitung

Die Fertigungsqualität einer Produktionsanlage, z.B. einer Werkzeugmaschine, wird wesentlich von ihrer Arbeitsgenauigkeit und Leistungsfähigkeit sowie ihres Umweltverhaltens bestimmt. [1] Bei der Produktfertigung müssen unterschiedliche, sich widersprechende Kriterien ausbalanciert werden. So gilt es, die erforderliche Qualität bei der Produktfertigung zu erzielen, gleichzeitig muss jedoch eine hohe Produktivität und Maschinenverfügbarkeit gewährleistet sein. Um diese widersprüchlichen Kriterien bestmöglich vereinen zu können, sind Kompromisslösungen bei der Produktfertigung unumgänglich. So muss es das Ziel der Fertigung sein, die geforderte Qualität zu erzielen, diese jedoch nicht zu übertreffen, um somit die Produktivitätspotentiale der Anlage möglichst optimal auszunutzen. Zudem gilt es, durch geeignete Produktivitätsanpassungen die Verfügbarkeit der Maschinen sicherzustellen und folglich unplannede Wartungsarbeiten, welche in hohen Kosten resultieren, zu verhindern. Um die ideale Kombination aus Qualität, Produktivität und Verfügbarkeit zu realisieren, ist ein vollständiges Prozess- und Anlagenverständnis von Nöten, welches es erlaubt geeignete Stellgrößen zu erkennen. Dieses vollständige Verständnis erfordert jedoch die übergreifende und prozessindividuelle Beherrschung des Produktionssystems und setzt fortwährendes Lernen voraus. Es gilt daher die bereits gewonnenen Erkenntnisse einzubringen und neue Wirkzusammenhänge zu erkennen. Abbildung 1 zeigt die industrielle Zielsetzung sowie Herausforderung bei der Produktfertigung. [2]

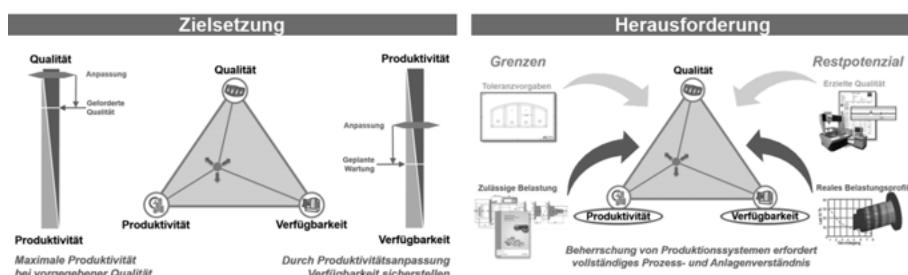


Abbildung 1: Industrielle Zielsetzung und Herausforderung bei der Produktfertigung, nach [2]

Bei der Sicherstellung und Planung der Verfügbarkeit von Produktionssystemen sind die Maschinenkomponenten von zentraler Bedeutung. Im Segment der Werkzeugmaschinen besitzen insbesondere die Hauptspindel mit ihren Maschinenkomponenten sowie die Vorschubachse mit ihren Maschinenkomponenten großen Stellenwert.

Im Rahmen dieses Artikels sollen Potentiale zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen mittels schnellrechnender Komponentenmodelle am Beispiel des Kugelgewindetriebs aufgezeigt und erläutert werden.

Kugelgewindetriebe sind die meist verbreiteten Vorschubantriebe in Werkzeugmaschinen und lassen sich der Gruppe der Spindelantriebe zuordnen. Sie werden vornehmlich zur Wandlung einer

rotatorischen Antriebsbewegung in eine Linearbewegung eingesetzt [1]. Im Wesentlichen bestehen die Komponenten aus einer KGT-Spindel, einer KGT-Mutter sowie den Kugeln.

Abbildung 2 zeigt den allgemeinen Aufbau eines Kugelgewindetriebs. KGT-Spindel und KGT-Mutter weisen ein Gewindeprofil auf, dessen Flanken einem Kugelprofil nachempfunden sind [1]. Das Gewindeprofil kann je nach KGT-Typ als Rundbogen- oder gotisches Spitzbogenprofil ausgeführt sein. Die Kugeln trennen die Gewindelaufbahnen von KGT-Spindel und KGT-Mutter und wälzen auf ihnen ab, weshalb vorrangig Rollreibung vorliegt. Beim Abwälzen vollziehen die Kugeln sowohl eine Tangential- als auch eine Umfangsbewegung. Um den nutzbaren Verfahrbereich abzudecken, müssen die Kugeln zum Ausgangspunkt ihrer Bewegung rückgeführt werden. Allgemein wird zwischen interner und externer Kugelrückführung unterschieden. Bei externer Kugelrückführung werden die Kugeln durch ein am Außenrand der Mutter montiertes Umlenkrohr oder durch einen axialen Rückführkanal in der Mutter nach mehreren oder allen Gewindegängen an ihren Ausgangspunkt rückgeführt [3]. Die Anzahl der tragenden Kugeln ist höher als bei interner Kugelrückführung. Die Mutter baut, bei gleicher axialer Steifigkeit, kürzer. Interne Kugelrückführungen führen die Kugeln nach einem Umlauf wieder in den vorherigen Gang zurück. Dazu werden in der Mutter montierte Umlenkstücke verwendet. Es werden s-förmige Umlenkstücke und gerade Umlenkstücke unterschieden. Interne Kugelrückführungen ermöglichen die Herstellung von Muttern geringeren Durchmessers, zudem ist die Herstellung einfacher als die eines in der Mutter liegenden axialen Rückführkanals [3].

Der Wirkungsgrad von Kugelgewindetrieben ist aufgrund der günstigeren Reibungsverhältnisse um ein Vielfaches höher als bei Bewegungsgewinden, bei denen die Gewindelaufbahnen ohne trennende Bestandteile direkt aufeinander gleiten [1]. Zusätzlich zu den bereits benannten Bestandteilen werden vielfach Dichtungen und Abstreifer verwendet um den Wälzbereich zwischen KGT-Spindel und KGT-Mutter (vgl. Abbildung 2) vor dem Eindringen unerwünschter Fremdstoffe zu schützen und den eingebrachten Schmierstoff langwierig im Wälzkontakt zu halten.

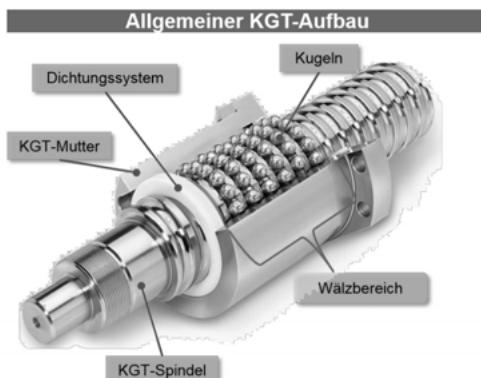


Abbildung 2: Allgemeiner Aufbau eines Kugelgewindetriebs nach [4]

Seit einigen Jahren finden Kugelgewindetriebe, aufgrund ihrer positiven Eigenschaften hinsichtlich Reibung und Zuverlässigkeit, zusätzlich zu den Anwendungen in Produktionsanlagen wie Werkzeugmaschinen vermehrt in alternativen Anwendungen Verwendung. Hierzu gehören u.a. der Luft- und Raumfahrtsektor, wo KGT beispielweise in Leitwerken verbaut sind, die Gebäudetechnik, in der KGT in aktiven Dämpfungseinheiten zum Erdbebenschutz eingesetzt werden sowie der Automotive Bereich, in welchem KGT in Lenk- und Bremssystemen Anwendung finden [5]. Im Zuge eines gesteigerten Umwelt- und Ressourcenbewusstseins ersetzen Kugelgewindetriebe zudem verstärkt pneumatische und hydraulische Aktuatoren in Handling Anwendungen [6].

3.2 Kugelgewindetriebe in Werkzeugmaschinenanwendungen

Um hochpräzise Verfahr- und Positionierbewegungen auszuführen werden in Werkzeugmaschinen vorgespannte Kugelgewindetriebe verwendet. Vielfach kommen KGT in Doppelmutterbauweise mit O-Vorspannung zum Einsatz. Bei dieser Bauart werden zwei Mutterhälften, üblicherweise eine Flansch- und eine Gegenmutter, so gegeneinander verdreht, dass eine definierte innere Kraft die beiden Mutterhälften auseinander drückt. Um eine Trennung der Mutterhälften zu gewährleisten werden die Mutterhälften zueinander verdrehgesichert. Weitere Vorspannmöglichkeiten können aus der Fachliteratur sowie den Herstellerkatalogen entnommen werden.

Einen schematischen Aufbau eines Kugelgewindetriebs in Doppelmutterbauweise mit O-Vorspannung exakter axialer Kraft zeigt das linke Teilbild in Abbildung 3. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die an Mutterhälfte 2 angreifende externe axiale Kraft in einer erhöhten Belastung von Mutterhälfte 2 und einer Entlastung von Mutterhälfte 1 resultiert.

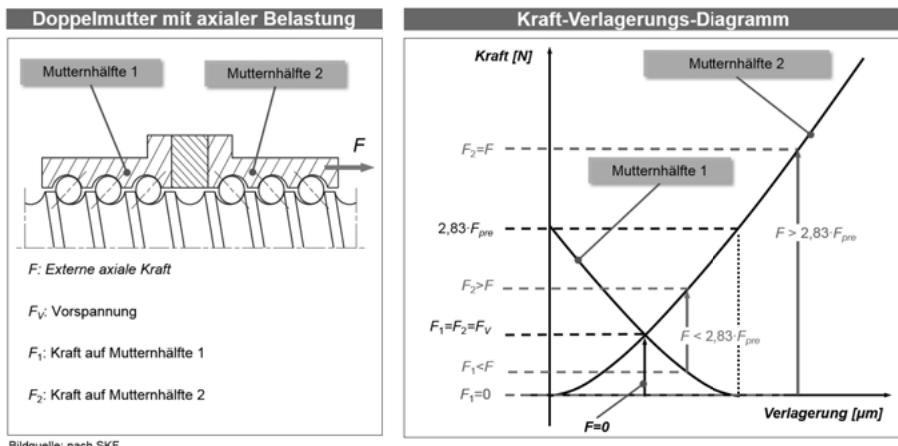


Abbildung 3: Doppelmutter unter axialer Belastung mit Verspannungsschaubild

Dieser Sachverhalt wird im Kraft-Verlagerungs-Diagramm (rechtes Teilbild Abbildung 3) verdeutlicht. Das Kraft-Verlagerungs-Diagramm zeigt die Federkennlinien beider Mutternhälften, welche entgegengesetzt verlaufen. Da beide Mutternhälften als geometrisch identisch und gleich belastet angenommen werden entsprechen sich die Federkennlinien. Wenn ausschließlich die Vorspannung auf die Mutterhälften wirkt ($F = 0$), weisen beide Mutterhälften die gleiche Verlagerung auf. Wird nun eine externe axiale Kraft an Mutterhälfte 2 wie im linken Teilbild in Abbildung 3 eingeleitet, so wird diese zusätzlich belastet, was eine Vergrößerung der Verlagerung zur Folge hat. Die auf Mutterhälfte 2 resultierende Kraft F_2 , als Superposition der externen Kraft F und der Vorspannung F_V , ist größer als die externe axiale Kraft F . Gleichzeitig findet eine Entlastung von Mutterhälfte 1 statt, woraus eine verringerte Verlagerung dieser hervorgeht. Die resultierende Kraft F_1 auf Mutterhälfte 1, als Superposition der externen Kraft F und der Vorspannung F_V , ist folglich geringer als die externe axiale Kraft F .

Wesentliches Auslegekriterium bei der Planung und Konstruktion von Kugelgewindetrieben in Werkzeugmaschinen ist die Berechnung der Komponentenlebensdauer nach DIN ISO 3408-5 [7]. Die Lebensdauerberechnung berücksichtigt, analog zur Betrachtung bei Wälzlagern, ausschließlich den Verschleißmechanismus der Ermüdung. Andere aufgrund der Kinematik und anwendungsspezifischen Belastungen auftretende Verschleißmechanismen werden zur Beurteilung nicht herangezogen [3]. Mit dem Auftreten eines ersten Risses an der Oberfläche der Gewindelaufbahn von KGT-Spindel, KGT-Mutter oder den Kugeln erreicht ein Kugelgewindetrieb sein Lebensdauerende. Allgemein berechnet sich die Lebensdauer von Kugelgewindetrieben in Umdrehungen nach Gl. 1.1. Die Berechnung berücksichtigt eine 90 %ige Erlebenswahrscheinlichkeit.

$$L = \left(\frac{C_{am}}{F_m} \right)^3 * 10^6 \quad \text{Gl. 1.1}$$

Die Lebensdauer setzt sich aus dem Quotienten der dynamischen Tragzahl des Kugelgewindetriebs C_{am} und der äquivalenten dynamischen axialen Belastung F_m auf den Kugelgewindetrieb zusammen. Die Berechnung der dynamischen Tragzahl beinhaltet die Geometrie des Kugelgewindetriebs, u.a. werden die Schmiegeung und der Lastwinkel berücksichtigt, sowie Korrekturfaktoren für die Oberflächenhärte, Stahlerschmelzung und die Toleranzklasse. Die äquivalente dynamische Belastung berechnet sich aus den prognostizierten Axialkräften, welche der Kugelgewindetrieb während seines Betriebs erfahren soll, sowie Gewichtungsanteilen dieser über einen Zeitanteil und ein Drehzahlverhältnis jeder Axialkraft. Bei dem zu Grunde gelegten Axialkräften handelt es sich um Annahmen, reale Belastungswerte werden nicht berücksichtigt. In der industriellen Praxis lassen sich die tatsächlich auf die Kugelgewindetriebe aufgebrachten Belastungen nur schwerlich prognostizieren, da diese signifikant vom späteren Verwendungszweck bestimmt werden.

Allgemein vernachlässigt die DIN ISO 3408-5 unterschiedliche Einflussgrößen. Dazu gehören beispielsweise die Lastverteilung innerhalb der Gewindelaufbahn von KGT-Spindel und KGT-Mutter und die damit einhergehende Änderung des Lastwinkels unter Einwirkung externer axialem Kräfte. Zudem wird dem Schmierstoff sowie der Art der Kugelrückführung keine Bedeutung beigemessen. Die Berechnung der wirkenden Lasten vernachlässigt jegliche Form stoß- oder vibrationsartiger Beanspruchungen und basiert wie bereits beschrieben auf angenommenen Werten [8].

Aufgrund der beschriebenen Ungenauigkeiten können unterschiedlichste Belastungen für Kugelgewindetriebe in identischen Berechnungsergebnissen der Komponentenlebensdauer resultieren. Wie in Abbildung 4 dargestellt gehen aus unterschiedlichen Belastungskollektiven identische äquivalente dynamische Belastungen und daraus schließlich gleiche Lebensdauerprognosen hervor.

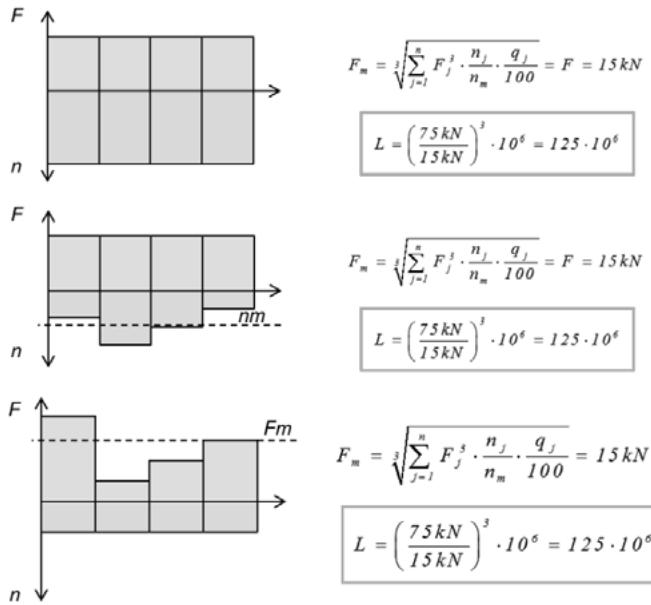


Abbildung 4: Beispielhafte Lebensdauerberechnung für unterschiedliche Lastkollektive

Es ist leicht einzusehen, dass sich stark unterscheidende Belastungen in Drehzahl und externer axiale Kraft deutlich abweichende Lebensdauern der Kugelgewindetriebe provozieren. Des Weiteren bedingt die Vernachlässigung relevanter Einflüsse, wie der Lastverteilung und Lastwinkeländerung, eine unzureichende Kenntnis der tatsächlich vorherrschenden Belastungen und des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben.

Das Betriebsverhalten von Kugelgewindetrieben bestimmt deren Reaktion auf externe axiale Kräfte. Insbesondere die statische axiale Steifigkeit sowie das Leerlaufdrehmoment werden zur experimentellen Beurteilung des Komponentenverhaltens herangezogen. So sollen KGT für Werkzeugmaschinenanwendungen eine möglichst hohe statische axiale Steifigkeit bei gleichzeitig möglichst geringem Leerlaufdrehmoment ausweisen. Diese messtechnisch erfassbaren Größen können zudem zur Beurteilung des Gebrauchsstandes herangezogen werden. Mit zunehmendem Verschleiß verringert sich die statische axiale Steifigkeit signifikant. Im Gegensatz zum Lebensdauerende ist das Gebrauchsdauerende nicht fest definiert, sondern gibt für die jeweilige Anwendung eine Schwelle der einzuhaltenden Positionier- und Wiederholgenauigkeit an.

Eine detaillierte Beschreibung des Betriebsverhaltens erfordert somit eine zutreffende Beschreibung der einzelnen Wälzkontakte zwischen den Gewindelaufbahnen von KGT-Spindel und KGT-Mutter und den Kugeln sowie des Verhaltens des gesamten Kugelgewindetriebs.

Das Betriebsverhalten von Kugelgewindetrieben wird durch die Betriebslasten und die spezifischen Komponentengrößen bestimmt. Abbildung 5 verdeutlicht die Zusammenhänge zur Beschreibung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben. Die im Einzelwälzkontakt zwischen Kugel und Gewindelaufbahnen von KGT-Spindel und KGT-Mutter wirkenden Lasten generieren Reibung und Verschleiß, welcher in einem Ende der Gebrauchs- und Lebensdauer der Komponente resultiert. Mittels experimenteller Untersuchungen können die im Einzelwälzkontakt wirkenden Lasten nicht

erfasst werden. Experimentelle Untersuchungen ermöglichen nur eine Beschreibung des Gesamtverhaltens der Kugelgewindetriebe hinsichtlich seiner statischen und dynamischen Eigenschaften wie der statischen axialen Steifigkeit und des Leerlaufdrehmoments und der Gebrauchs- bzw. Lebensdauer der Komponente. So ist es nur möglich eine Korrelation zwischen der Lebensdauer des KGT und den Betriebsbedingungen zu erfassen, da die Untersuchungen ausschließlich die Beschreibung des aufgetretenen Schadens ermöglichen und nicht geeignet sind, die zum Schaden führenden Ursachen beschreiben.

Wesentlich für das Verständnis des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben ist jedoch die Beschreibung der Korrelation zwischen den Lasten in jedem Wälzkontakt und der Gebrauchs- und Lebensdauer.

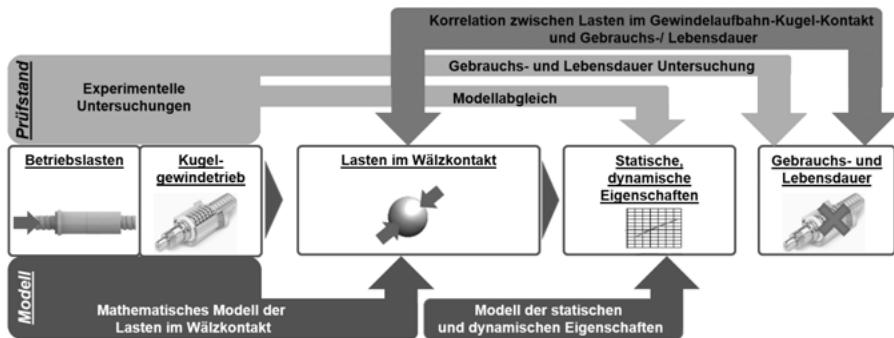


Abbildung 5: Beschreibung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Wie deutlich wird bedingt eine detaillierte Systembeschreibung zur Steigerung der Maschinenverfügbarkeit und Generierung eines erweiterten Verständnisses des Maschinenelementes Kugelgewindetrieb ein mathematisches Komponentenmodell, welches in der Lage ist sowohl die Belastungen jedes Einzelwälzkontakte als auch das daraus resultierende Gesamtverhalten zu beschreiben. Ziel ist es daher die Entwicklung eines schnellrechnenden und parametrierbaren Komponentenmodells zur Korrelation der Lasten im Einzelwälzkontakt und des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben.

3.3 Komponentenmodell für Kugelgewindetriebe

Um eine detaillierte mathematische Beschreibung von Kugelgewindetrieben zu ermöglichen müssen unterschiedliche Aspekte beschrieben werden. Das entwickelte Modell erlaubt sowohl die mathematische Berechnung der in jedem Einzelwälzkontakt auftretenden Belastungen als auch die Beschreibung des gesamten Kugelgewindetriebs.

Das Betriebsverhalten eines Kugelgewindetriebs wird durch die Bestimmung des quasistationären Gleichgewichts zwischen allen an der KGT-Spindel und KGT-Mutter wirkenden Kräften und Momenten berechnet. Die auf den Kugelgewindetrieb wirkenden Belastungen in Form der Kräfte und Momente werden durch geometrische Verschiebungen der Kugeln sowie der KGT-Spindel zur ortsfest angenommenen KGT-Mutter in das geforderte Gleichgewicht gebracht. Die zur Schaffung des Gleichgewichtszustands durchgeführten Verschiebungen resultierenden unmittelbar in Kontaktkräften zwischen den Kugeln und Gewindelaufbahnen von KGT-Spindel und KGT-Mutter. Zielsetzung ist es den quasistationären Gleichgewichtszustand jedes Wälzkontakte durch Verschiebung der KGT-Spindel und Kugeln einzustellen. Dabei beeinflussen sich die optimalen Positionen der Kugeln sowie der KGT-Spindel gegenseitig, weshalb die Berechnung des quasistationären Gleichgewichts einen iterativen Ablauf erfordert. Die Vorgehensweise bei der

Berechnung wird am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen bereits in der Wälzlag erforschung, vgl. [9], [10], eingesetzt und ist durch experimentelle Untersuchungen für unterschiedlichste Bauformen von Wälzlagern abgeglichen. Für die Anwendung bei Kugelgewindetrieben wurde das erprobte Vorgehen angepasst und erweitert.

Zusätzlich zu den Berechnungsvorschriften für den Einzelwälzkontakt erfordert eine zutreffende Beschreibung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben die Berechnung der Lastverteilung innerhalb des Wälzbereiches zwischen KGT-Spindel und KGT-Mutter. Aufgrund der Funktionsweise und des geometrischen Aufbaues von Kugelgewindetrieben können die Kugeln identische Positionen in der x-y-Ebene einnehmen, jedoch nie gleiche Positionen in z-Richtung aufweisen. Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau eines Kugelgewindetriebs und das verwendete kartesische Koordinatensystem zur Beschreibung der Systemachsen eines Kugelgewindetriebs.

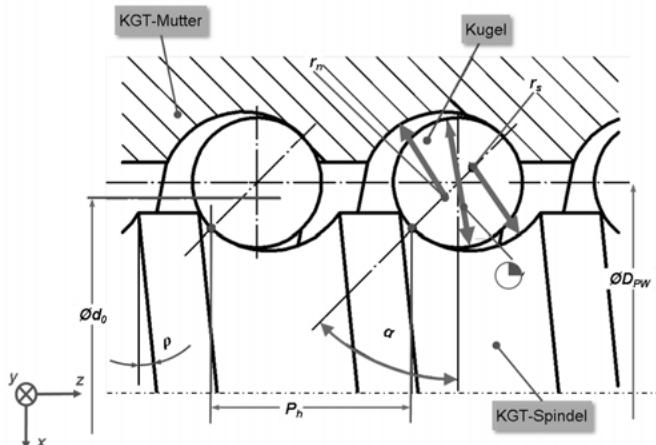


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Geometrie eines Kugelgewindetriebs nach [7]

Die Einleitung externer Axialkräfte auf den Kugelgewindetrieb erfolgt mittels einer Verbindung zwischen der KGT-Spindel und Umgebungsstruktur (oftmals Wälzlag er der KGT-Spindel) sowie der KGT-Mutter und Umgebungsstruktur (vielfach Verbindung Mutterflansch mit Maschinenstrukturauteilen). Es ist leicht einzusehen, dass, analog zum Verständnis von Befestigungsgewinden, an den in z-Richtung unterschiedlich positionierten Kugeln gänzlich unterschiedliche Kräfte und Momente wirken. Die KGT-Spindel und die KGT-Mutter weisen ein ausgeprägtes Federverhalten auf, welches bei der Berechnung des quasistationären Gleichgewichtes in Form unterschiedlicher Kräfte und Momente auf den jeweiligen Einzelwälzkontakt berücksichtigt wird. Um dies zu ermöglichen sind KGT-Spindel und KGT-Mutter durch ein FE-Modell (Finite-Elemente-Modell) im Berechnungsmodell implementiert, welches es erlaubt die axiale Verformung abzubilden. Abbildung 7 verdeutlicht die Berechnungsgrundlagen und stellt deren Kopplung zur Beschreibung des Gesamtsystems Kugelgewindetrieb dar.

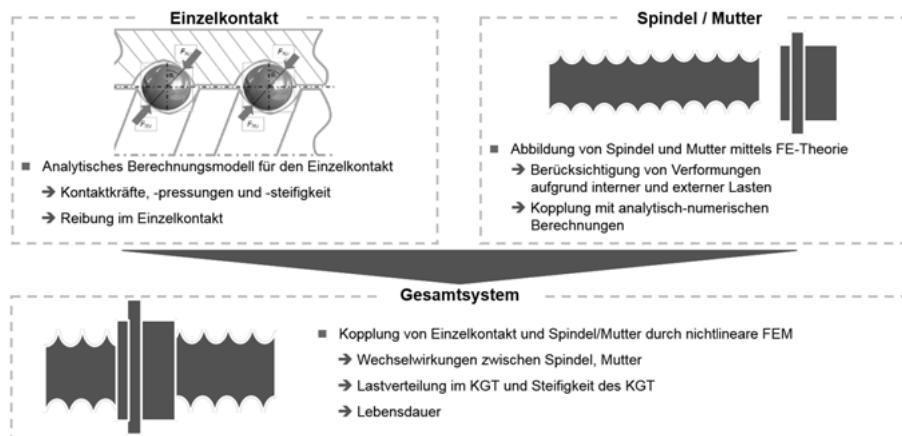


Abbildung 7: Beschreibung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Die Einzelwälzkontakte werden mittels eines analytisch-numerischen Lösungsalgorithmus berechnet. Der Algorithmus erlaubt es die Kontaktkraft, -pressung und -steifigkeit sowie den Kontaktwinkel jedes Einzelkontakte zu berechnen und die Kugelposition in x, y und z-Richtung exakt darzustellen. Zudem ist es möglich, durch gezielte Erweiterungen bereits existenter Berechnungsgrundlagen der Wälzlagerforschung (vgl. [11]), die Reibung jedes Einzelkontakte zu berechnen.

Das FE-Modell der KGT-Spindel und KGT-Mutter erlaubt es die aus internen und externen Belastungen resultierenden Verformungen der Bauteile zu berechnen. Dabei lassen sich, je nach Forderungen, unterschiedliche FE-Elemente zur Approximation der KGT-Spindel und KGT-Mutter auswählen. Im einfachsten Fall rein axialer Verformung werden KGT-Spindel und KGT-Mutter durch FE-Balkenmodelle approximiert.

Durch Kopplung der beiden Teilberechnungsmodelle wird das Gesamtsystem Kugelgewindetrieb berechnet. Dabei werden, ausgehend von den Ergebnissen jedes Einzelwälzkontakte, insbesondere die Lastverteilung, die axiale Steifigkeit sowie die Gesamtreibung ausgegeben. Des Weiteren werden der Kugelmittenkreisdurchmesser sowie dessen Änderung und die Verlagerung der Kugeln und der KGT-Spindel ausgegeben.

Die entwickelte Berechnungsumgebung erlaubt die Berechnung unterschiedlicher Bauformen von Kugelgewindetrieben. Abbildung 8 zeigt die vereinfachte Modelldarstellung sowie das zugehörige FE-Ersatzschaubild eines Kugelgewindetriebs in Doppelmutterbauweise und O-Vorspannung.

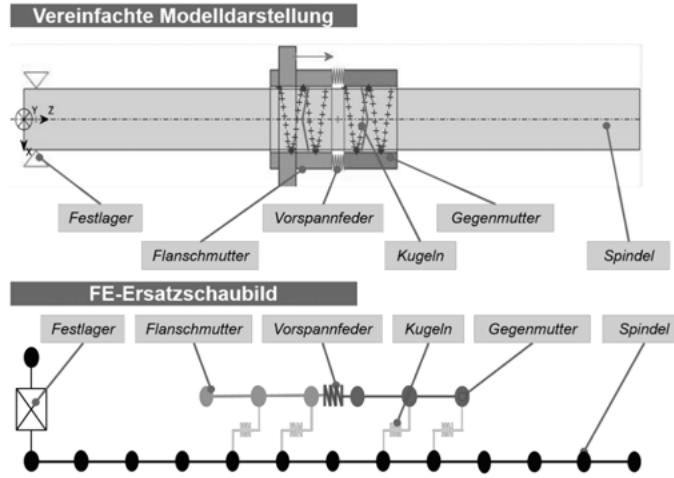


Abbildung 8: Modelldarstellung eines Kugelgewindetriebs innerhalb der Berechnungsumgebung

Die vereinfachte Modelldarstellung zeigt die grafische Darstellung eines Kugelgewindetriebs innerhalb der Berechnungsumgebung. Es werden die Bauteile: Festlager, KGT-Flanschmutter, Vorspannfeder, Kugeln, KGT-Gegemutter und KGT-Spindel sowie eine angreifende externe Axialkraft abgebildet. Das verwendete kartesische Koordinatensystem ist analog zu Abbildung 6. Die Modellbeschreibung der Bauteile Kugeln, KGT-Flanschmutter, KGT-Gegemutter und KGT-Spindel enthält deren geometrischen Größen sowie die spezifischen Materialeigenschaften wie Dichte und Elastizitätsmodul. Das Festlager dient zur Verknüpfung der KGT-Spindel mit der Umgebung. Die Vorspannfeder erzeugt die interne Kraft zwischen der KGT-Flanschmutter und KGT-Gegemutter, Wirkrichtung und Größe der Kraft sowie z-Position und Federsteifigkeit können frei gewählt werden. Die Modellierung der Vorspannung über die Vorspannfeder erlaubt eine detaillierte Berechnung des aus der Vorspannung resultierenden Betriebsverhaltens des Kugelgewindetriebs ohne zusätzliche externe Axiallast.

Durch die externe Axialkraft wird das Betriebsverhalten des Kugelgewindetriebs unter Belastung beschrieben. Bedingt durch die verwendeten Linearführungssysteme werden KGT in Werkzeugmaschinen Applikationen nahezu ausschließlich durch axial wirkende externe Kräfte belastet, weshalb nur diese betrachtet werden.

3.4 Potentiale zur Steigerung der Maschinenverfügbarkeit

Wie zuvor beschrieben gehören Kugelgewindetriebe zu den zentralen Maschinenkomponenten in Vorschubachsen moderner Werkzeugmaschinen, sodass ungeplante Austausch- und Wartungsarbeiten mit erheblichen finanziellen Aufwänden verbunden sind. Eine gezielte Komponentenüberwachung, welche die auf die Kugelgewindetriebe wirkenden Axiallasten in die realen Belastungen der Einzelwälzkontakte wandelt, ermöglicht es detaillierte Aussagen zum Betriebsverhalten sowie des Gebrauchszustands und zur Restlebensdauer von Kugelgewindetrieben zu treffen.

Geht man davon aus, dass die externen Axialkräfte auf den Kugelgewindetrieb bekannt sind, vgl. [2], versetzt das beschriebene Berechnungsmodell den Anwender in die Lage unzulässige Überlasten einzelner Wälzkontakte oder KGT-Segmente, welche vom Anwender eingeteilt werden können, zu

detektieren und die Restlebensdauer des Kugelgewindetriebs oder einzelner KGT-Segmente zu bestimmen. Dazu gilt es die Lebensdauerberechnung nach [7], unter Berücksichtigung der realen Lasthistorie des Kugelgewindetriebs, auf das Gesamtsystem sowie einzelne KGT-Segmente bis hin zu Einzelwälzkontakten, anzuwenden. Folgend soll das Vorgehen bei einer erweiterten Lebensdauerbetrachtung für Kugelgewindetriebe vorgestellt werden.

Grundlage dieser erweiterten Lebensdauerberechnung sind die international gültigen Normen für Kugelgewindetriebe nach [7]. Abweichend vom in der Norm aufgeführten Vorgehen erfolgt die Lebensdauerberechnung der Kugelgewindetriebe nicht ausschließlich in der Konstruktionsphase vor Beginn der Verwendung, sondern fortwährend. Zudem wird der Kugelgewindetrieb nicht ausschließlich als Gesamtsystem betrachtet, sondern segmentiert. Das bedeutet es werden Bereiche der KGT-Mutter, welche während der Nutzung unterschiedliche hohe Belastungen erfahren, segmentiert und separat betrachtet. Ermöglicht wird dies durch das zuvor vorgestellte Komponentenmodell. Zielstellung ist eine optimierte Nutzung des Kugelgewindetriebs hinsichtlich seiner Lebensdauer. Die segmentierte Berechnung erlaubt es innerhalb der KGT-Mutter unterschiedliche Ermüdungszustände zu detektieren. Hieraus ergeben sich vielfältige Möglichkeiten zur Steigerung der Maschinenverfügbarkeit. Einerseits kann aufgrund der detaillierteren Kenntnisse die Wartung bzw. der Austausch des Kugelgewindetriebs besser geplant und terminiert werden. Zudem kann durch eine gezielte Änderung des Bearbeitungsprozesses, beispielsweise bei der Serienfertigung von Bauteilen, die Belastung innerhalb der KGT-Mutter gezielt geändert werden, wodurch andere Segmente höher belastet werden und die Restlebensdauer des Kugelgewindetriebs gezielter genutzt werden kann.

Abbildung 9 stellt das Vorgehen zur erweiterten Lebensdauerberechnung von Kugelgewindetrieben dar.

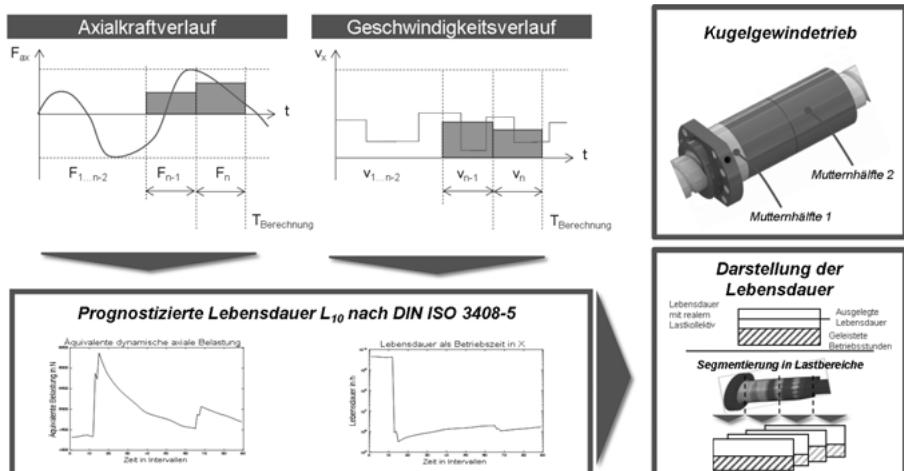


Abbildung 9: Erweiterte Lebensdauerbetrachtung für Kugelgewindetriebe

In einem ersten Schritt werden die auf den Kugelgewindetrieb wirkenden Axialkräfte sowie die zugehörigen Drehzahlen der Achse in frei wählbaren, aber festgelegten Zeitanteilen, kumuliert, zusammengeführt und analog zum Vorgehen in [7] Teil 5 zu einer äquivalenten dynamischen axialen Belastung des entsprechenden Zeitanteils berechnet. Daran anschließend erfolgt die Lebensdauerberechnung des gesamten Kugelgewindetriebs. Dabei werden bereits erfolgte Belastungen in Form einer Lasthistorie des Kugelgewindetriebs einbezogen. Ergebnis ist eine fortwährend angepasste Restlebensdauerprognose des Kugelgewindetriebs.

Unter Nutzung des entwickelten Komponentenmodells und des zuvor beschriebenen Vorgehens lässt sich die Prognose der Restlebensdauer von Kugelgewindetrieben weiter präzisieren. Die Einteilung in unterschiedliche Segmente erlaubt so die detaillierte Berechnung der Restlebensdauer dieser Segmente sowie die Identifizierung hochbelasteter Bereiche im Betrieb.

3.5 Zusammenfassung

Zur Erhaltung und Steigerung der Leistungsfähigkeit moderner Produktionsanlagen müssen unterschiedliche Kriterien beachtet und ausbalanciert werden. Um dies bestmöglich zu realisieren braucht es ein tiefes Verständnis des Produktionsprozesses sowie der eingesetzten Maschinenkomponenten. In Vorschubachsen von Werkzeugmaschinen kommt Kugelgewindetrieben eine exponierte Bedeutung zu, weshalb ein tiefgreifendes Verständnis der auf die Komponenten wirkenden Belastungen erforderlich ist. Mit Hilfe des vorgestellten Komponentenmodells ist es möglich, die auftretenden Belastungen jedes Einzelwälzkontakte zu benennen und daraus resultierend eine erweiterte Lebensdauerberechnung zur Steigerung der Maschinenverfügbarkeit durchzuführen. Die erweiterte Lebensdauerberechnung kann dabei auf einzelne Lastsegmente innerhalb des Kugelgewindetriebs heruntergebrochen werden.

3.6 Literatur

- [1] Brecher, Ch.; Weck, M. (Hrsg.): Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung. Berlin: Springer Vieweg 2017
- [2] AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium: Internet of Production für agile Unternehmen. Aachen: Apprimus Verlag 2017
- [3] Golz, H.: Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1990
- [4] Kugelgewindetriebe und Zubehör. HIWIN GmbH 2011
- [5] Schaeffler: Kugelgewindetrieb (KGT) für elektromechanische Lenkung
- [6] Merkelbach, S.; Murrenhoff, H.; Brecher, Ch. et al.: Pneumatic or electromechanical drives. a comparision regarding their exergy efficiency. Dresden 2016
- [7] DIN ISO 3408: Kugelgewindetriebe Teil 1 - Teil 5
- [8] Haberkern, A.: Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1998
- [9] Brecher, Ch.; Falker, J.: Floating Roller Ball Lager. Ein neuartiges Loslagerkonzept für Hochgeschwindigkeitsanwendungen (2016)
- [10] Tüllmann, U.: Das Verhalten axial verspannter, schnelldrehender Schräkgugellager. Dissertation, RWTH, Aachen 1999
- [11] Steinert, T.: Das Reibmoment von Kugellagern mit bordgeföhrtem Käfig. Dissertation, RWTH, Aachen 1995

4 Dienstebasierte Integration objektspezifischer Lageerkennungsalgorithmen am Beispiel eines roboterbasierten Greifszenarios

M. Rudorfer, M. Chemnitz, IAT, TU Berlin

4.1 Einleitung

Die Informationstechnologie erfuhr in den vergangenen Jahrzehnten einen starken Wandel. Der Weg führte weg von komplexen, monolithischen Anwendungen hin zur Nutzung verschiedener dienstebasierter Konzepte, wie zum Beispiel Service-Oriented Architecture (SOA) oder Microservices. Alle dienstebasierten Architekturen stellen die Nutzung von Funktionalitäten als Dienst in den Mittelpunkt, und sind damit grundsätzlich verteilte Systeme. Entscheidende Vorteile gegenüber monolithischen Anwendungen sind eine bessere Skalierbarkeit, Entkopplung der Komponenten, und eine Vereinfachung von Entwicklung, Test und Bereitstellung der Software. [1]

Um ebenfalls von diesen Vorteilen profitieren zu können, zeigt sich ein ähnlicher Wandel auch in der Produktionstechnik. Wie in [2] festgestellt, finden Cloud-Technologien, das Internet der Dinge und die App-Orientierung zunehmend ihren Weg in die Produktionswelt und fördern die Vernetzung und die Auflösung der Automatisierungspyramide. Die hierarchische Informations- und Kommunikationsstruktur soll dabei einer vernetzten Struktur weichen, um die klassische Trennung von der Feldebene über die Leitebene bis hin zur Fabrik- und Unternehmenssteuerung zu überwinden. Herausforderungen für die dienstebasierte Bereitstellung von Automatisierungsfunktionen sind dabei insbesondere die Komposition der Dienste, die Einhaltung von Echtzeitanforderungen, sowie die Entkopplung der bereitgestellten Funktionen von spezifischer Hardware.

Bei Bildverarbeitungsaufgaben hat die dienstebasierte Bereitstellung viele Vorteile. Durch mehr Rechenkapazität in der Cloud können leistungsfähigere Algorithmen eingesetzt werden, zum Beispiel zur Verarbeitung von 3D-Daten. Es könnten auch komplexe Funktionen wie die optische Qualitätskontrolle potentiell von der Fähigkeit des maschinellen Lernens profitieren [2]. Eine Bereitstellung des gelernten Wissens an einem anderen Standort wäre ohne weiteres möglich. Je nach Bildverarbeitungsaufgabe und deren Einbindung in den Produktionsprozess sind die Anforderungen an das Echtzeitverhalten sehr unterschiedlich. Für dienstebasierte Lösungen bei harten Echtzeitanforderungen sind spezielle Netzwerktechnologien notwendig, wie zum Beispiel Time Sensitive Networking (TSN).

In dieser Arbeit stellen wir die dienstebasierte Integration einer beispielhaften Objekterkennung in eine prototypische, industrielle Anwendung – eine robotergestützte Handhabungsaufgabe – vor. Ein zentraler Bestandteil der Arbeit ist die Komposition der Dienste, die wir auf Basis eines Diensteverzeichnisses sowie einer dezentralen Ablaufsteuerung realisieren.

Die Struktur der Arbeit ist wie folgt: Zunächst stellen wir im Stand der Technik relevante Arbeiten mit Bezug zu dienstebasierter Bildverarbeitung sowie zur Komposition von Diensten vor. Nach einer Erläuterung des roboterbasierten Greifszenarios präsentieren wir unsere umgesetzte Kompositionslösung. Anschließend beschreiben wir den Bildverarbeitungsdienst sowie dessen Integration in das Szenario, und diskutieren die Vor- und Nachteile unserer Umsetzung. Wir schließen den Beitrag mit einer kurzen Zusammenfassung und geben einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

4.2 Stand der Technik

Bildverarbeitungsdienste sind insbesondere in der Informationstechnologie bereits weit verbreitet. Beispiele hierfür sind die Google Cloud Vision API [3], Amazon Rekognition [4] oder IBM Watson Visual Recognition [5]. Diese APIs konzentrieren sich hauptsächlich auf Anwendungen wie die Zuordnung von Schlagwörtern zu Bildern (relevant z.B. für Bildersuche), die Segmentierung und Beschriftung von Objekten, und die Erkennung von Gesichtern. Eine Nutzung ist über ein Pay-per-Use-Schema möglich, die Dienste können so ohne große Hürden direkt in eigene Anwendungen integriert werden. Die Anwendungen sind zwar grundsätzlich sehr generisch und universell, die Objekterkennung bezieht sich jedoch nur auf Alltagsobjekte. Die Erkennung industrieller Werkstücke oder sogar individueller Bauteile und Baugruppen ist nicht möglich, da die Dienste überwiegend mit online frei verfügbaren Bildern angelernt werden. Für spezifische Produkte sind oft zu wenige Trainingsdaten verfügbar, um solche Modelle des maschinellen Lernens benutzen zu können.

Es gibt jedoch auch Bildverarbeitungsdienste kleinerer Granularität, die so auch in der industriellen Bildverarbeitung eingesetzt werden könnten. Ein Beispiel hierfür ist das Open Source Projekt „imaginary“ [6]. Dieses bietet grundlegendere Bildverarbeitungsoperationen an, wie beispielsweise Skalieren, Zuschneiden, Glätten, Farbkonvertierung und viele weitere.

Alle diese Bildverarbeitungsdienste sind als Webservice implementiert und können über HTTP-Requests und -Responses benutzt werden. Die Ergebnisse werden dabei oft im JSON Format verschickt. Diese und viele weitere Webservices orientieren sich an REST (REpresentational State Transfer, [7]), einem Programmierparadigma für verteilte Systeme. Ein grundlegendes Prinzip von REST ist die Zustandslosigkeit des Protokolls: In jeder Nachricht sind sämtliche Informationen enthalten, die zum Verstehen und Verarbeiten dieser Nachricht notwendig sind. Da keinerlei Session-Informationen gespeichert werden müssen, ist eine viel bessere Skalierbarkeit z.B. durch Lastverteilung auf verschiedene Instanzen des Dienstes möglich.

Die Komposition beschreibt die Art und Weise, wie die einzelnen Dienste miteinander verknüpft werden. Dabei werden im Wesentlichen zwei Varianten unterschieden: Die Orchestrierung und die Choreographie (siehe Abbildung 1). Die Orchestrierung beschreibt das flexible Kombinieren von Diensten zu einem ausführbaren Prozess. In der Regel gibt es dabei eine zentrale Instanz, die den Prozessfluss kontrolliert und die Dienste aufruft. Dies ist eine deutliche Abgrenzung zur Choreographie, bei der keine zentrale Instanz existiert. Vielmehr kennt jeder einzelne Dienst seine Rolle im Prozess, und der Fokus liegt darauf wann und wie zwischen den Diensten kommuniziert wird. [8] [9]

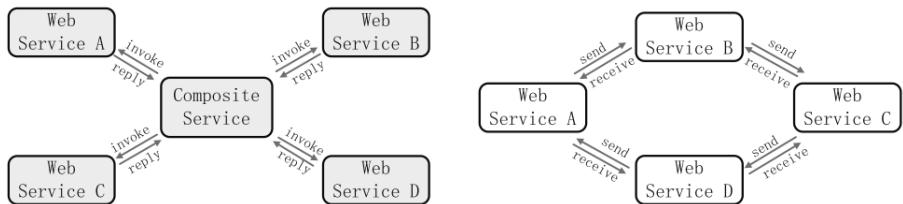


Abbildung 1: Orchestrierung (links) und Choreographie (rechts) im Vergleich. [10]

Für die Orchestrierung von Webservices wurde der Standard BPEL (Business Process Execution Language) etabliert [11]. Durch WSDL (Web Service Description Language) werden die Schnittstellen und gültigen Operationen für jeden einzelnen Dienst beschrieben. Mit Hilfe von BPEL kann XML-basiert die für die Koordination der Dienste notwendige Prozesslogik definiert werden. Das beinhaltet beispielsweise die Ausführungsreihenfolge und Kontrollstrukturen wie Verzweigungen und Schleifen. Eine BPEL-Engine kann den so beschriebenen Prozess anschließend ausführen. Die Engine dient dann als zentraler Knoten in der Orchestrierungslösung. Dem Einsatz

dieser Werkzeuge in der Produktion steht jedoch eine noch geringe Verbreitung von Webservices im Wege. Es ist Gegenstand aktueller Forschung, inwieweit die zugrundeliegenden Prinzipien von REST auf das in der Produktionstechnik verbreitete Protokoll OPC UA übertragbar sind [12].

Neben der Steuerung des Ablaufs fällt auch das Finden und Verwalten von geeigneten Diensten in das Aufgabenspektrum einer Orchestrierungslösung. Dazu können sogenannte Diensteverzeichnisse genutzt werden. So entwickelten Kretschmer und Lechler [13] beispielsweise eine Verwaltung von Teilnehmern (Diensten) in einer cloudbasierten Steuerungsplattform, heute auch bekannt unter dem Namen Gelbe Seiten für Industrie 4.0 (GeSI). Das System basiert auf einem zentralen OPC UA Server, an dem sich jeder teilnehmende Dienst anmelden kann. Jeder Teilnehmer definiert seine Schnittstellen und seinen Funktionsumfang über sogenannte Funktionstypen, die auf dem Server verwaltet werden. Dadurch ist es möglich im Verzeichnis nach verfügbaren Diensten mit gegebener Funktion und Schnittstelle zu suchen.

4.3 Szenario

Für diese Arbeit haben wir den in Abbildung 2 abgebildeten Demonstrator genutzt. Er wird gemeinsam von der TU Berlin und dem Fraunhofer IPK entwickelt, um Konzepte der dientebasierten Produktion implementieren und testen zu können. In diesem Abschnitt stellen wir zunächst den Ablauf des roboterbasierten Greifscenarios vor und im nächsten Abschnitt beschreiben wir die Komposition der einzelnen Dienste innerhalb des Szenarios.

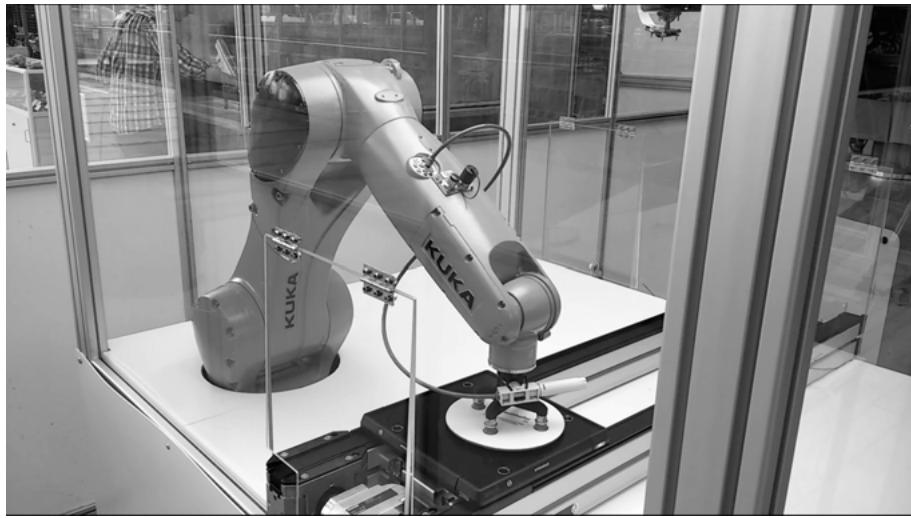


Abbildung 2: Demonstrator zur dientebasierten Umsetzung des roboterbasierten Greifscenarios

Der roboterbasierte Greifprozess steht beispielhaft für eine einfache Handhabungsaufgabe, so wie sie auch in der Produktion beispielsweise zur Bestückung einer Werkzeugmaschine vorkommen könnte. Ein Werkstück wird auf einem Transportband bereitgestellt und soll vom Roboter gegriffen werden. Da das Werkstück in beliebiger Lage und Orientierung zugeführt wird, ist eine kamerabasierte Objekterkennung notwendig. Diese bestimmt die Pose des Werkstücks, woraufhin der Roboter es greifen und an einer definierten Position ablegen kann. Als Werkstücke benutzen wir in dieser Arbeit runde Scheiben, die unterschiedliche Radien, Aufdrucke und Farben haben.

Dieser Prozess ist eine reine Abfolge von Teilschritten, die nacheinander ausgeführt werden, und stellt damit keine großen Anforderungen an eine Ablaufsteuerung. Um auch Verzweigungen und Schleifen in der Prozesslogik untersuchen zu können, ist derzeit eine Erweiterung zu diesem Ablauf in Arbeit. Dabei sollen abhängig von der Farbe der Scheibe unterschiedliche Ablageorte angefahren werden. Der Roboter könnte rote Scheiben an den zuvor definierten Ablageort legen, aber grüne Scheiben auf der Startposition des Transportbands fallen lassen, sodass der Prozess wieder von vorne beginnen kann. Der Ablauf dazu ist in Abbildung 3 skizziert. Durch die Verzweigung und die Schleife wird der Komplexitätsgrad in der Ablaufsteuerung erhöht.

Im weiteren Verlauf der Arbeit betrachten wir grundsätzlich das einfache Szenario, jedoch wird die Bildverarbeitung von vornherein so ausgelegt, dass auch eine Erkennung der Farbe unterstützt wird. Sofern wir uns auf das erweiterte Szenario beziehen, werden wir dies explizit erwähnen.

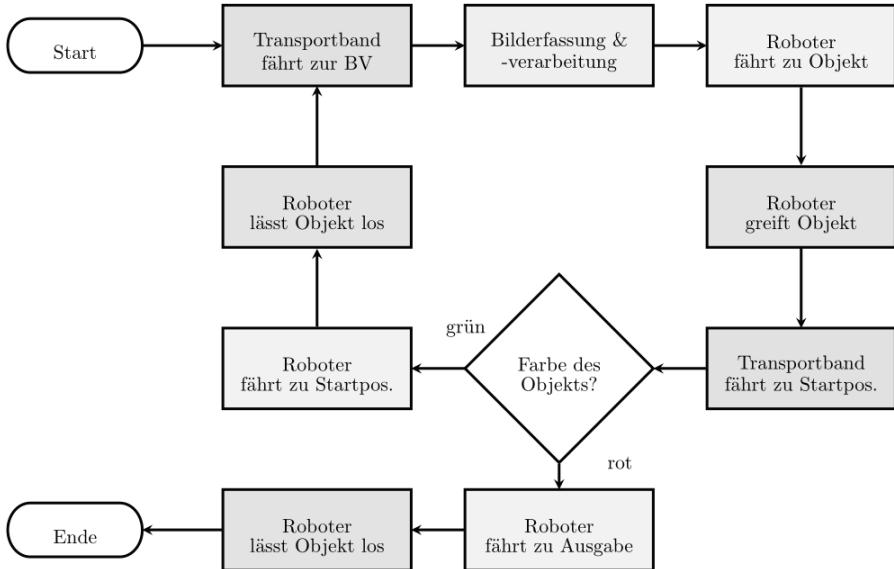


Abbildung 3: Ablaufplan des erweiterten Szenarios. Blöcke gleicher Farbe entsprechen ein und demselben Dienst

4.4 Komposition der Dienste

Unsere Kompositionslösung ist im Wesentlichen eine Orchestrierung enthält aber auch Elemente der Choreographie. So verwenden wir beispielsweise wie in der Orchestrierung eine XML-basierte Beschreibung, die einen ausführbaren Prozess darstellt. Auf der anderen Seite wird diese Beschreibung von Dienst zu Dienst weitergegeben, sodass es wie in der Choreographie keinen zentralen Knoten gibt, der den Ablauf steuert. Die Prozesslogik ist vielmehr in der XML-basierten Beschreibung (im Folgenden „Ablaufgraph“) definiert und wird von den Diensten eigenständig umgesetzt.

Im Gesamtkontext der Produktion kann ein Ablaufgraph so verstanden werden, dass er alle einem Produkt zugehörigen Fertigungs- und Montageoperationen enthält. Jedem Produkt ist dann eine solche Prozessbeschreibung zugeordnet, was eine enorme Flexibilität gewährleistet und damit ein großer Schritt in Richtung Losgröße „Eins“ ist. Die Erstellung der XML-Beschreibungen kann über eine intuitive Bedienoberfläche teilautomatisiert erfolgen. Der Anwender muss dann lediglich nach und nach die Ablaufgraphen starten, und die Prozesse laufen vollautomatisch ab. Geplant ist auch ein

Scheduler, der dafür sorgen soll, dass die Auslastung der einzelnen Dienste ausbalanciert wird und bestimmte Produkte oder Aufgaben priorisiert behandelt werden können.

Wir haben unsere Anwendung in fünf Teilaufgaben untergliedert, die jeweils einen eigenen Dienst darstellen:

- Steuerung des Transportbands
- Bilderfassung
- Bildverarbeitung
- Steuerung der Roboterbewegungen
- Steuerung des Greifers

Für die Verknüpfung der Dienste haben wir unter anderem Werkzeuge und Lösungen aus dem Projekt pICASSO [14] genutzt, im Speziellen das im Stand der Technik bereits kurz vorgestellte Diensteverzeichnis GeSI [13]. Es ist ein zentraler OPC UA Server, der die teilnehmenden Dienste verwaltet. Jeder unserer Dienste erstellt einen OPC UA Client, registriert sich einmalig auf dem Server und kommuniziert seine Schnittstellen (Funktionstyp). Entsprechend dem Funktionstyp wird von GeSI auf dem Server ein Speicherbereich für die Ein- und Ausgangsdaten des Dienstes reserviert. Diesen Speicherbereich nutzt unsere Ablaufsteuerung zum Austausch der Daten und des Ablaufgraphen selbst.

Das Schreiben eines Ablaufgraphen auf den Eingangsdatenbereich eines Dienstes triggert die Ausführung dieses Dienstes an. Er liest sämtliche weiteren Eingangsdaten, führt seine Funktion aus und kann anschließend dem Ablaufgraphen entnehmen, an welchen Nachfolgedienst die Ergebnisse weitergegeben werden sollen. Diese werden dann entsprechend in dessen Eingangsspeicherbereich geschrieben, woraufhin der nächste Dienst ausgeführt wird. Der Ablauf ist exemplarisch für drei aufeinanderfolgende Dienste in Abbildung 4 dargestellt. Ein beispielhafter Ablaufgraph ist in Abbildung 5 zu sehen.

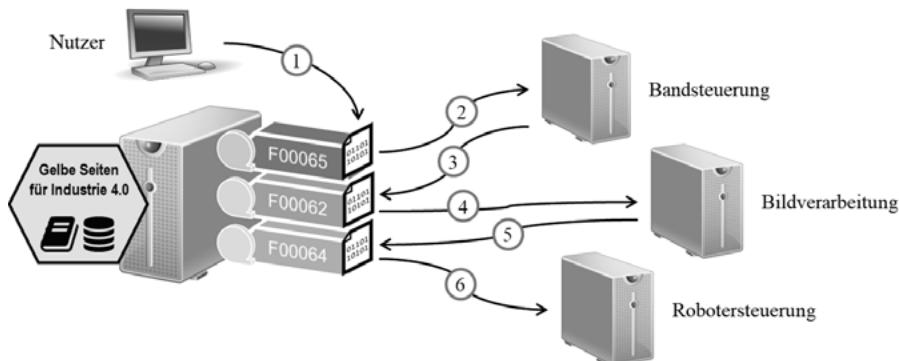


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Dienstekomposition. Der Ablaufgraph wird dabei vom Nutzer erstellt und in den Speicherbereich des ersten Dienstes geschrieben. Dieser wird daraufhin ausgeführt und schreibt den Ablaufgraph zusammen mit etwaigen Ausgaben in den Eingangsspeicherbereich des Nachfolgedienstes, woraufhin dieser wiederum ausgeführt wird. Die Schnittstellen sind durch die Funktionstypen definiert (hier z.B. F00065 für eine Bandsteuerung). Die Ausgangsdaten des Vorgärdienstes entsprechen den Eingangsdaten des Nachfolgedienstes. (Hinweis: Der Übersichtlichkeit halber haben wir den Bilderfassungsdienst und den Steuerungsdienst des Greifers in dieser Abbildung weggelassen.)

Im Ablaufgraph kann ein Knoten mehrere Kindknoten haben, sodass eine parallele Ausführung von Diensten möglich ist. Theoretisch sieht der Ablaufgraph auch vor, mehrere Vorgärdienstes zu haben. Damit könnte auch eine Zusammenführung der Ergebnisse verschiedener Dienste zu einem

einigen Nachfolgedienst ermöglicht werden. Problematisch ist hier jedoch, dass der Dienst aufgerufen wird sobald die Eingangsdaten beschrieben werden. Da die Eingangsdaten jedoch zunächst unvollständig sind, müsste der Dienst selbst einen Zwischenspeicher verwalten und so lange mit der Ausführung warten, bis sämtliche Eingangsdaten angekommen sind. Dies ist insbesondere bei gleichzeitiger Nutzung des Dienstes in mehreren, unterschiedlichen Prozessen anspruchsvoll.

Ähnliche Herausforderungen ergeben sich bei der Integration von Kontrollstrukturen wie beispielsweise Verzweigungen und Schleifen. Die entsprechenden Bedingungen müssten in den Ablaufgraph kodiert werden und von den jeweiligen Diensten überprüft werden können. Dies stellt hohe Ansprüche sowohl an die Prozessbeschreibung als auch an die Dienste selbst, die die komplette Programmlogik aus dem Ablaufgraphen eigenständig umsetzen müssen. Diese Features sind ein Ansatzpunkt für nachfolgende Arbeiten.

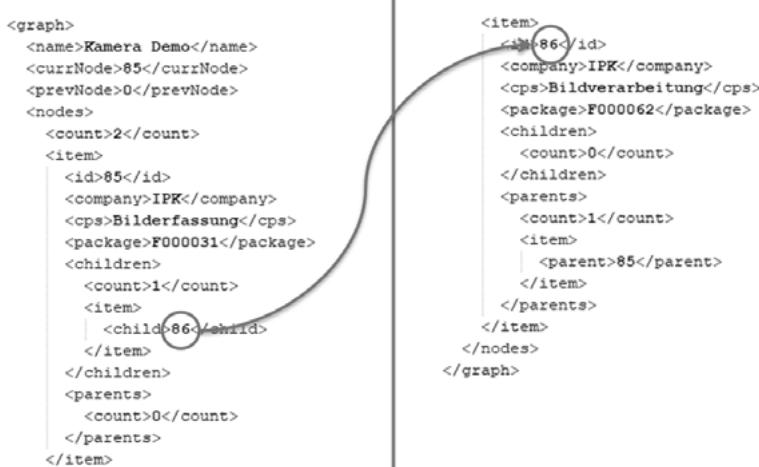


Abbildung 5: Zu sehen ist der Ablaufgraph eines einfachen Beispielprozesses. Er besteht aus zwei Diensten (Items) zur Bilderfassung und -verarbeitung. Die Bildverarbeitung ist als Child-Item des Bilderfassungsdienstes hinterlegt, sodass dieser nach Ende seiner Ausführung den Verarbeitungsdienst anstoßen kann.

4.5 Integration des Bildverarbeitungsdienstes

Im Rahmen des Szenarios wird vom Bilderfassungsdienst ein Farbbild mit einer perspektivischen Aufnahme der Scheibe auf ihrer Plattform geliefert. Der Bildverarbeitungsdienst bestimmt daraus die Position, die Orientierung und die Farbe der Scheibe (siehe Abbildung 6). Die Farbe der Scheibe wird im einfachen Szenario noch nicht benötigt, ist aber bereits implementiert um auch das erweiterte Szenario mit demselben Dienst bedienen zu können.

Der Ablauf des gesamten Dienstes ist in Abbildung 7 dargestellt, die einzelnen Operationen werden im Folgenden beschrieben. Zunächst wird eine Rektifizierung des perspektivisch verzerrten Eingangsbildes durchgeführt, basierend auf einer Kalibrierung der Kamerapose zur Plattform. Durch diese Rektifizierung sind das Pixelkoordinatensystem und das Plattformkoordinatensystem kongruent. Das rektifizierte Bild ist 230x230 Pixel groß, was genau der Größe der Plattform in Millimetern entspricht. Das hat den Vorteil, dass im Bild gefundene (x,y)-Koordinaten direkt dem Roboter übergeben werden können.

Mit Hilfe einer Hough-Transformation werden im Bild befindliche Kreise unterschiedlicher Radien erkannt. Da die Scheibe das rektifizierte Bild dominiert, liefert der Kreis mit der höchsten Bewertung den gesuchten Mittelpunkt sowie den Radius. Auf der Basis von Mittelpunkt und Radius wird nun

ein Bildausschnitt innerhalb der Scheibe bestimmt, für den die Farberkennung und die Bestimmung der Orientierung durchgeführt werden.

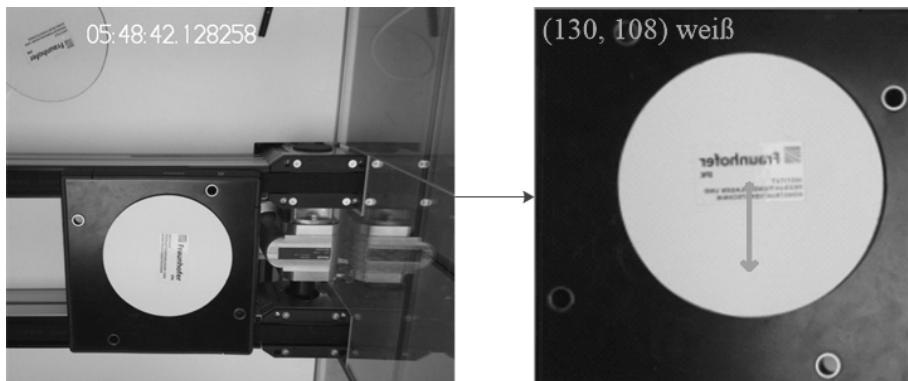


Abbildung 6: Links: Das perspektivisch verzerrte Originalbild, wie vom Bilderfassungsdienst aufgenommen. Rechts: Der rektifizierte Bildausschnitt; Position, Farbe und Orientierung der Scheibe sind grün markiert

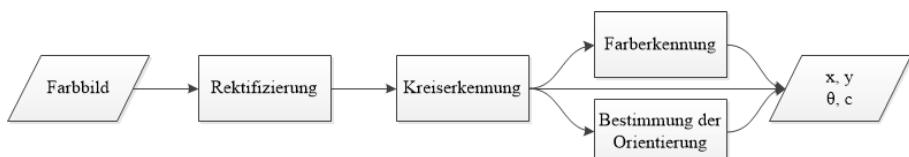


Abbildung 7: Der Ablauf der Bildverarbeitung. Farberkennung und Bestimmung der Orientierung können potentiell auch parallel ausgeführt werden

Zur Bestimmung der Farbe wird der Bildausschnitt zunächst in den CIE-L*a*b Farbraum umgewandelt. In diesem Farbraum entspricht der wahrgenommene Farbunterschied weitestgehend der euklidischen Distanz der Farbwerte. Für den Bildausschnitt werden die mittleren L*a*b-Werte berechnet und mit einer Reihe von vordefinierten Farben verglichen. Die vordefinierte Farbe mit der geringsten euklidischen Distanz wird als Ergebnis ausgewählt.

Neben der Position der Scheiben zur Greipunktbestimmung ist auch deren Orientierung gesucht. So können Scheiben mit strukturierten Oberflächen, z.B. Adressaufklebern, mit gleicher Orientierung abgelegt werden. Um unabhängig vom konkreten Aufdruck eine Orientierung bestimmen zu können, bestimmen wir eine Orientierung reproduzierbar aus den Bildmerkmalen. So können alle Scheiben gleichen Typs einheitlich abgelegt werden. Nach dem Vorbild von SIFT [15] erstellen wir dazu ein Histogramm aus den Richtungen der Gradienten. Die dominierende Gradientenrichtung wird als Orientierung der Scheibe ermittelt.

Die Bildverarbeitungskette wurde als ein einzelner Dienst in die zuvor beschriebene Komposition integriert. Eine Adapterklasse erweitert die Bildverarbeitungsoperationen um den OPC UA Client, der die Prozesslogik umsetzt. Nach Start des Dienstes registriert er sich beim GeSI Server und beschreibt den Funktionstyp des Dienstes. Daraufhin bekommt er einen Speicherbereich für die Eingangsvariablen auf dem Server reserviert. Über eine Subscription auf diesen Variablen wird die Ausführung des Dienstes gestartet. Der Adapter ist in der Lage den Ablaufgraph zu interpretieren und das Ergebnis an den entsprechenden Nachfolgedienst weiterzuleiten.

4.6 Diskussion

Die dienstbasierte Umsetzung der Bildverarbeitung bringt bereits einige der erhofften Vorteile mit sich. Eine weitestgehende Entkopplung der Komponenten wurde erreicht. Dadurch steht die Bildverarbeitung selbst auch für andere Systeme zur Verfügung und könnte beispielsweise von mehreren Roboterzellen genutzt werden. Eine bessere Skalierbarkeit der Produktion wird dadurch unterstützt. Darüber hinaus vereinfacht die dienstbasierte Umsetzung Entwicklung, Test und Bereitstellung der Software deutlich, wovon wir bei unserer Arbeit bereits stark profitieren konnten.

Um von weiteren Vorteilen profitieren zu können, muss das Dienstkonzept jedoch an einigen Stellen noch konsequenter umgesetzt werden. So ist beispielsweise die Kalibrierung der Kamera zur Plattform derzeit in den Bildverarbeitungsdienst integriert. Idealerweise wären Bilderfassung und Bildverarbeitung jedoch vollständig entkoppelt. Nur dann ist der Bildverarbeitungsdienst auch in anderen Prozessen verwendbar, in denen dieselbe Aufgabe mit einer anderen Kamera gelöst werden muss (und daher eine andere Kalibrierung benötigt).

Die Wiederverwendbarkeit des erstellten Dienstes ist außerdem dadurch eingeschränkt, dass die Bildverarbeitung sehr spezifisch auf das betrachtete, roboterbasierte Greifszenario zugeschnitten ist. Für abweichende Szenarien, in denen beispielsweise quadratische statt kreisförmige Objekte detektiert werden sollen, muss ein neuer Bildverarbeitungsdienst erstellt werden, der sich nur in sehr geringem Maße von dem hier Vorgestellten unterscheidet. Es liegt nahe, die in Abbildung 7 aufgeführten Operationen der Bildverarbeitungskette auszulagern. Die Bildverarbeitung wäre dann kein monolithischer Dienst mehr, sondern würde sich aus feingranularen, dafür aber universelleren Bildverarbeitungsdiensten zusammensetzen. Diese interne Orchestrierung könnte wahlweise über RESTful Webservices z.B. mittels BPEL geschehen und existierende Bildverarbeitungsdienste integrieren (siehe Stand der Technik), oder aber auch die hier vorgestellte Ablaufsteuerung dafür nutzen.

Unsere Kompositionslösung ist bereits in der Lage, einfache Abläufe zu orchestrieren und auszuführen. Die Orchestrierung ist extrem flexibel, je Auftrag kann ein eigener Ablaufgraph erstellt werden und der Produktionsprozess damit individuell an jedes Produkt angepasst werden. Der Ablaufgraph wird von Dienst zu Dienst weitergereicht, die kodierte Prozesslogik wird von diesen interpretiert und umgesetzt. Das hat außerdem den Vorteil, dass die Kommunikationswege kurz gehalten werden. Ein zentraler Steuerungsknoten, wie er sonst in Orchestrationslösungen üblich ist, wird vermieden. Durch die Nutzung des Verzeichniservers GeSI zum Datenaustausch entsteht jedoch erneut ein zentraler Flaschenhals. Um das zu verhindern könnte GeSI ausschließlich zum Finden und Verbinden der Dienste genutzt werden, und die Kommunikation der Dienste auf direktem Wege erfolgen. Das könnte umgesetzt werden, indem jeder Dienst nicht wie bisher nur einen OPC UA Client darstellt, sondern eine Kombination aus Client und Server. Der Server wartet darauf, dass ein fremder Client seine Eingangsvariablen überschreibt und führt anschließend den Dienst aus. Nach Ausführung könnte der eigene Client die Ergebnisse auf den OPC UA Server des nachfolgenden Dienstes schreiben.

Bereits jetzt wird die Umsetzung der Prozesslogik und der Kommunikation in einem Adapter gekapselt, den jeder Dienst implementieren muss, um an der Komposition teilzunehmen. Dieser Adapter müsste auch für extern zur Verfügung gestellte Dienste wie z.B. Webservices zusätzlich implementiert werden.

Ein Vorteil unserer Lösung ist, dass rekursive Dienstkompositionen problemlos realisiert werden können. Das heißt, dass ein Dienst, der innerhalb eines Ablaufgraphen A aufgerufen wird, selbst aus mehreren untergeordneten Diensten zusammengesetzt sein kann (siehe Abbildung 8). Bei seiner Ausführung startet er also einen Ablaufgraphen B, um diese untergeordneten Dienste zu benutzen. Nach Beendigung von B wird der in A beschriebene Prozess fortgeführt.

Aufgrund unserer Aufrufstruktur ist es uns derzeit jedoch noch nicht möglich, komplexere Abläufe zu modellieren, wie beispielsweise das Zusammenführen von Teilergebnissen oder auch die Verzweigung und die Schleife des vorgestellten, erweiterten Szenarios. Das ist bisher ein deutlicher Nachteil unserer Kompositionslösung. Um diesen zu überwinden, müssten Bedingungen in den Ablaufgraphen kodiert werden können, die anschließend von den einzelnen Diensten interpretiert und entsprechend ausgewertet werden. Die Intelligenz, die sonst in einem zentralen Steuerungsknoten sitzt, wird also auf den Ablaufgraphen sowie jeden einzelnen, teilnehmenden Dienst verlagert. Das birgt jedoch auch Risiken, da ein einzelner, korrupter Dienst durch Änderung des Ablaufgraphen den ganzen Prozess angreifbar machen könnte. Genauso könnte durch eine im Ablaufgraphen fehlerhaft kodierte Bedingung eine Endlosschleife entstehen, die nicht ohne weiteres aufgelöst werden kann.

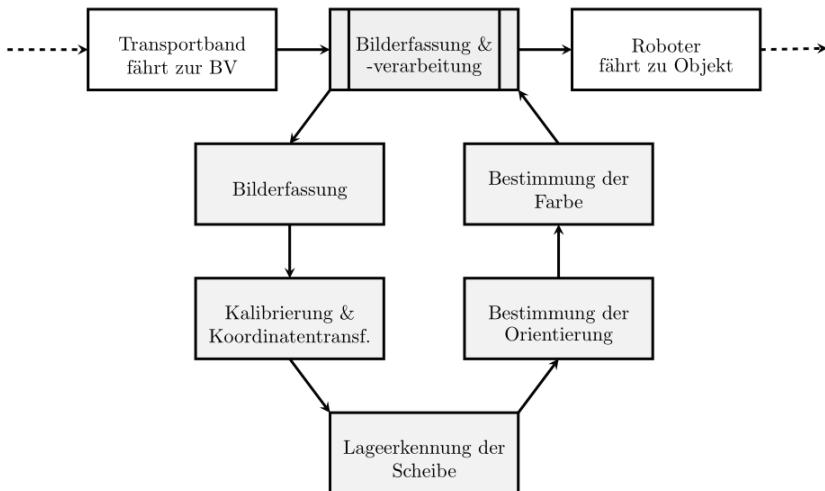


Abbildung 8: **Rekursive Dienstkomposition.** Für den übergeordneten Ablaufgraphen sind die Teildienste nicht sichtbar, sondern nur der aus ihnen zusammengesetzte Dienst zur Bilderfassung und -verarbeitung

4.7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit haben wir ein roboterbasiertes Greifszenario vorgestellt, welches mit einer dienstebasierten Architektur umgesetzt wird. Wir haben unsere Lösung zur Komposition der Dienste gezeigt und die Integration eines Bildverarbeitungsdienstes erläutert.

Die Kompositionslösung basiert auf dem Diensteverzeichnis GeSI [13] und einer dezentralen Ablaufsteuerung. Sie bietet eine enorme Flexibilität bei der Verkettung der Dienste. Ein Nachteil ist die zentrale Datenschnittstelle bei GeSI, die wir in zukünftigen Arbeiten durch eine direkte Kommunikation zwischen den Diensten auflösen werden. Ebenso werden wir die Ablaufsteuerung noch um weitere Steuerungselemente wie Verzweigungen und Schleifen ergänzen, um damit auch unser erweitertes Szenario umsetzen zu können.

Zur Integration von Bildverarbeitungsdiensten hat sich gezeigt, dass einzelne, feingranulare Dienste, die universell einsetzbar sind und oft wiederverwendet werden können, vorteilhaft sind. Diese könnten dann beispielsweise auch als Webservices über eine REST API zur Verfügung gestellt werden, vergleichbar mit bereits existierenden Diensten [3][4][5][6]. Die eigentliche Bildverarbeitungsaufgabe wird dann durch eine Orchestrierung dieser grundlegender Operationen

umgesetzt. Eine Fragestellung in diesem Zusammenhang ist, zu welchem Anteil stark anwendungsspezifische, industrielle Bildverarbeitungsaufgaben aus anwendungsunabhängigen, universellen Diensten zusammengesetzt werden können.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Ivan Shalnov, der uns bei der Umsetzung der Ablaufsteuerung maßgeblich unterstützt hat. Ebenfalls bedanken wir uns bei Axel Vick und Carsten Niebuhr für ihre Gedanken, Anregungen und Vorschläge sowie die zahlreichen Diskussionen.

Teile der hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Verbundprojektes pICASSO vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02PJ2615 sowie im Rahmen des Austauschprojekts SCAMO vom Deutschen Akademischen Austauschdienst unter der Projektkennziffer 57334517 gefördert.

4.8 Literatur

- [1] Richards, M.: „Microservices vs. Service-Oriented Architecture“. Sebastopol CA, O'Reilly Media, 2016
- [2] Bauernhansl, Th.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: „WGP-Standpunkt Industrie 4.0“. In: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e.V., 2016
- [3] Google, Inc.: „Cloud Vision API“. <https://cloud.google.com/vision/> (14.09.2017)
- [4] Amazon Web Services, Inc.: „Amazon Rekognition“. <https://aws.amazon.com/rekognition/> (14.09.2017)
- [5] IBM: „Watson Visual Recognition“. <https://www.ibm.com/watson/services/visual-recognition/> (14.09.2017)
- [6] Aparicio, T.; Danshin, K.: „imaginary“. <https://github.com/h2non/imaginary> (15.09.2017)
- [7] Fielding, R. T.; Taylor, R. N.: „Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures“. Doctoral Dissertation, University of California, Irvine, 2000
- [8] Peltz, C.: „Web services orchestration and choreography“. Computer, Vol. 36, No. 10, S. 46–52, 2003
- [9] Dijkman, R. and Dumas, M.: „Service-oriented design: A multi-viewpoint approach“. International journal of cooperative information systems, Vol. 13, No. 04, S. 337–368, 2004
- [10] Sheng, Q. Z. et al.: “Web services composition: A decade’s overview,” Information Sciences, Vol. 280, S. 218–238, 2014
- [11] OASIS: „Web Services Business Process Execution Language Version 2“. <http://docs.oasis-open.org/wsdl/2.0/OS/wsdl-v2.0-OS.html> (18.09.2017)
- [12] Grüner, S.; Pfrommer, J.; Palm, F.: „RESTful Industrial Communication with OPC UA“. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, No. 5, S. 1832–1841, 2016
- [13] Kretschmer, F.; Lechner, A.: „Teilnehmerverwaltung und -zuordnung innerhalb einer cloudbasierten Steuerungsplattform“. ISW Stuttgart, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr. 693, 2014
- [14] Projekt pICASSO: „Industrielle cloudbasierte Steuerungsplattform für eine Produktion mit cyber-physischen Systemen“. <http://www.projekt-picasso.de/> (13.09.2017)
- [15] Lowe, D. G.: „Object recognition from local scale-invariant features“, The proceedings of the seventh IEEE international conference on Computer vision, Vol. 2, 1999

5 „Energy-as-a-Service“ – Dienstbasiertes, modulares Leitsystem zur energieflexiblen Fertigung

Ch. Fimmers, Ch. Brecher, WZL, RWTH Aachen

5.1 Motivation

Eine steigende Anzahl von Umweltkatastrophen, zunehmende Klimaverschmutzung und nicht zuletzt die begrenzten Ressourcen fossiler Energien erfordern seit Jahren ein Umdenken im Hinblick auf den Energieeinsatz in den verschiedensten Formen. Elektrische Energie wird, auch durch den Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung [2] getrieben, zunehmend aus regenerativen Energieträgern gewonnen. Typische Vertreter dieser Kategorie sind Wind- und Solarenergie. Da die Generierung elektrischer Energie aus diesen Quellen stark witterbedingt ist, weist die Verfügbarkeit eine hohe Volatilität auf, die dem Energiemarkt in dieser Form bislang unbekannt ist. Einen Eindruck der Schwankungen der Energiebereitstellung vermittelt Abbildung 1. Zur Verwendung und um den weiteren Ausbau regenerativer Energien voranzutreiben, müssen daher Möglichkeiten gefunden werden, mit dem volatilen Energieangebot umgehen zu können. Neben dem Einsatz effizienter Energiespeicher, der in aktuellen Forschungsprojekten vorangetrieben wird, besteht ein vielversprechender Ansatz darin, zukünftig die Energienachfrage an das fluktuiierende Energieangebot anzupassen [3]. Dazu müssen die Energiemärkte umgestaltet werden und verbraucherseitig muss die Möglichkeit geschaffen werden, die benötigte Leistung an das Angebot anpassen zu können, so dass ein Gleichgewicht geschaffen werden kann.

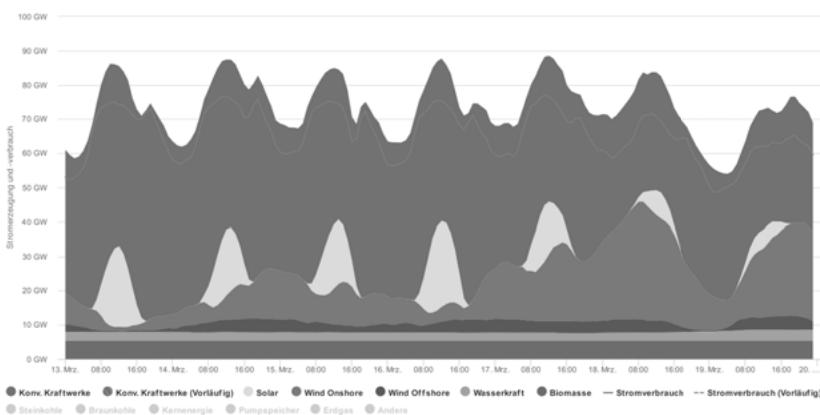


Abbildung 1: Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland Mitte März 2017 [4]

Einen großen Anteil am Energieverbrauch in Deutschland besitzt die produzierende Industrie, daher befasst sich das Forschungsprojekt „SynEnergie“ mit der Entwicklung adaptiver Produktionstechnik. Nach der chemischen Industrie benötigt die Metallindustrie die meiste Energie [5]. Eine Betrachtung der Möglichkeiten zur Energieflexibilisierung ist daher vor allem in diesen Bereichen mit einem hohen Potential verbunden.

5.2 Stand der Technik

Durch die fortschreitende Individualisierung der Produkte, auch als Mass-Customization bekannt, wird die Flexibilisierung industrieller Prozesse stark getrieben. Geringe Losgrößen können nur günstig produziert werden, wenn Produktionsanlagen flexibel eingesetzt und konfiguriert werden können. Eine umfangreiche Literaturrecherche [6] von SETHI und SETHI, die bis heute anerkannt ist, definiert 11 unterschiedliche Flexibilitätsarten, die sich u.a. auf Mengen-, Routen-, Produkt- und Maschinenflexibilität beziehen. Auch der Energieverbrauch eines Produktionsbetriebes lässt sich flexibilisieren und ermöglicht so die Teilnahme am Energiemarkt 2.0. Die Energieflexibilität gehört nicht zu den von SETHI und SETHI erwähnten 11 Arten, die schon länger betrachtet werden, da sie nicht durch die Mass-Costumization bedingt ist, und ist erst seit wenigen Jahren in wissenschaftlicher Literatur zu finden. Es werden unterschiedliche Ansätze präsentiert. Ein System, welches die Energieflexibilität auf Ebene einer gesamten Fertigung inkl. aller Randbedingungen betrachtet, existiert bislang aber nicht [7].

In den vergangenen Jahren sind viele Forschungsaktivitäten im Bereich der Energieumwandlung von Werkzeugmaschinen durchgeführt worden. Ziel der meisten Vorhaben war es dabei den Gesamtenergieumsatz der betrachteten Prozesse, Anlagen oder Produktionsstätten zu reduzieren und somit die Energieeffizienz zu erhöhen. Die zeitliche Umverteilung der Energie einer Fertigung ist bislang nahezu ausschließlich im Kontext des Lastspitzenmanagements betrachtet worden. Während bislang eine Glättung des gesamten Lastganges das Ziel war, beabsichtigen neue Ansätze der Energieflexibilität die Residuallast, d.h. die Last, die nicht durch erneuerbare Energien gedeckt werden kann, zu glätten [8].

Bereits erfolgte Arbeiten mit dem Fokus auf Energieeffizienz haben Grundlagen gelegt, die für die Energieflexibilisierung wieder aufgegriffen werden können: Detaillierte Analysen des Energieumsatzes von Werkzeugmaschinen und deren Komponenten sind unter anderem im Projekt EWOTeK [1] durchgeführt worden. Die Energieeffizienz wurde in diesem Projekt auf der Steuerungsebene der Maschine sowie durch Anpassung der Maschinenkomponenten gesteigert, indem einzelne Aggregate gezielt angesteuert und in energiesparende Zustände versetzt werden können. In anderen Projekten, wie z.B. Finesce [9], wird die Feinplanung zu einem energieeffizienten Betrieb befähigt. Auch die Forschergruppe ECOMATION beschäftigte sich mit der Reduzierung der Energie und betrachtete sowohl die Steuerung der Maschine als auch die Optimierung der Prozesse und eine energiebedarfsorientierte Produktionssteuerung [10]. In diesem Projekt findet die Betrachtung über alle Ebenen einer Fabrik hinweg statt und ermöglicht einen ganzheitlichen Ansatz, der alle Faktoren berücksichtigen kann.

Die bisherigen Arbeiten fokussieren sich auf die Steigerung der Energieeffizienz. Durch die aktuell steigende Volatilität des Energieangebotes gilt es jedoch nicht nur effizient, sondern auch flexibel zu sein. Für die Produktionstechnik ergeben sich dadurch ganz neue Herausforderungen: Während beispielsweise Haushaltsgeräte schon seit Jahren über Standby-Modi verfügen können diese für produktionstechnische Maschinen und Anlagen, z.B. Werkzeugmaschinen, nicht beliebig in andere Modi versetzt werden. Zum einen sind bei vielen Maschinen nicht ausreichend differenzierte Betriebszustände vorgesehen, zum anderen können komplexe Fertigungsprozesse nur eingeschränkt unterbrochen oder variiert werden. Die Befähigung zur Energieflexibilität kann daher nur durch Anpassungen über alle Ebenen hinweg, d.h. von der Maschinensteuerung bis hin zur Planungsebene, erreicht werden.

5.3 Flexibilisierungspotentiale an Werkzeugmaschinen

Die Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine und ihrer Nebenaggregate hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im nicht wertschöpfenden Modus entsteht der wesentliche Einfluss auf

die elektrische Energieaufnahme durch die Zustände, in denen sich die einzelnen Maschinenkomponenten und Aggregate befinden. Häufig werden diese nur in den Standby Betrieb versetzt oder verbleiben im Betriebsmodus und werden nicht ausgeschaltet. Für manche Aggregate ist diese Vorgehensweise notwendig, damit Einfahrprozeduren und Warmlaufphasen nicht erneut erfolgen müssen und ein schneller Einsatz der Maschine möglich ist. Dieses Potential wurde bereits in [1] erkannt und zur Absenkung des Energieverbrauchs eingesetzt. Durch die Planung der unterschiedlichen Betriebszustände im Voraus ergibt sich jedoch weiteres, noch ungenutztes Potential.

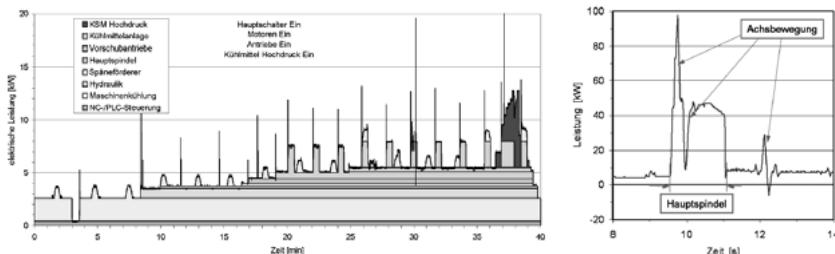


Abbildung 2: Leistungskurve einer Fräsmaschine während eines Zerspanprozesses (links); Ausschnitt einer Leistungskurve eines Zerspanprozesses in hoher Zeitauflösung (rechts) [1]

Wie in Abbildung 2 erkennbar ist, besitzen Werkzeugmaschinen im wertschöpfenden Betrieb ebenfalls eine dynamische Leistungskurve. Auch in diesem Fall hat der Betriebszustand der einzelnen Komponenten und Nebenaggregate einen wesentlichen Einfluss auf die benötigte Leistung. Das Anfahren bzw. der Druckaufbau einzelner Pumpen benötigen eine hohe Leistung, die zu hohen und gleichermaßen kurzen Leistungsspitzen in der Leistungskurve führen. Weitere Leistungsspitzen, in positive sowie negative Richtung, entstehen durch das Anfahren und Abbremsen der einzelnen Achsen. Sie können kurzzeitig zu noch höherem Leistungsbedarf führen, sind aber auch von geringerer Dauer. Um die Spitzen in der Leistungsaufnahme der einzelnen Achsen erkennen zu können, sind aufgrund ihrer sehr geringen Dauer Messungen in entsprechend hoher Zeitauflösung notwendig, zu denen die integrierten Sensoren vieler Werkzeugmaschinen nicht in der Lage sind. Sollen diese Spitzen erkannt werden, muss externe Sensorik verwendet und in die Werkzeugmaschinen integriert werden. Durch eine Kopplung an die Steuerung können Messwerte mit Operationen der Maschine verknüpft und im Anschluss verwertet werden.

5.4 Modulares MES als Basis

Um die genannten Energieflexibilisierungspotentiale an Werkzeugmaschinen für eine energieflexible Produktion verwenden zu können, bedarf es einer übergeordneten Steuerung. Sie muss alle zur Verfügung stehenden Fertigungsanlagen berücksichtigen und das Ziel verfolgen, deren gesamten Leistungsverbrauch zentral an das gegenwärtige Energieangebot anzupassen.

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich zusätzlich zu den bereits bestehenden ERP-Systemen, die der Planung und Überwachung der Unternehmensaktivitäten dienen, zusätzlich Fertigungsleitsysteme etabliert. Diese planen kurzfristiger und können dadurch direkter auf verschiedene Störeinflüsse in der Fertigung reagieren. Um dies zu erreichen, sind MES-Systeme (Manufacturing Execution System, dt. Fertigungsleitsysteme) eng mit der Fertigung verbunden. Durch eine BDE (Betriebsdatenerfassung) auf indirekte Art und zunehmend durch die MDE (Maschinendatenerfassung) auch direkt. Werden die Daten in Echtzeit erfasst, kann das System auch in Echtzeit eine Kontrolle und Steuerung der Fertigung vornehmen. Für eine koordinierte Planung

der unterschiedlichen Betriebszustände und damit verbundenen energetischen Niveaus eignen sich MES-Systeme daher besonders. Neben den Ist-Werten aus der Fertigung sind für eine langfristige, vorausschauende Auftragsplanung Energieverbrauchsprognosen für die einzulastenden Aufträge notwendig.

Die ersten MES wurden aus einem Guss heraus für ihren speziellen Einsatzzweck entwickelt. Feste Schnittstellen zur umgebenden IT-Landschaft wurden implementiert. Dies führte dazu, dass Änderungen mit einem hohen Programmieraufwand verbunden waren und die Einführung der gleichen Software in einem weiteren Betrieb nahezu unmöglich war.

Modulare Fertigungsleitsysteme können diese Probleme weitestgehend eliminieren. Durch unterschiedliche Schnittstellenmodule können beliebig Fertigungssysteme und übergeordnete Managementsysteme integriert werden. Außerdem kann jedes Unternehmen das System so konfigurieren, dass die benötigten Funktionen abgedeckt und schon vorhandene nicht redundant geschaffen werden [11, 12]. Ein weiterer Vorteil der Modularität liegt in der Austauschbarkeit einzelner Module. Es muss für Anpassungen nicht die gesamte Software, sondern lediglich das betroffene Modul verändert werden. Durch die Spezifikation der Schnittstellen zwischen den Modulen, die typischerweise herstellerspezifisch sind, wird die Austauschbarkeit und Funktionalität bei neuer Konfiguration gewährleistet. Die verschiedenen Aufgabenbereiche eines MES werden durch die VDI-Richtlinie 5600 [13] definiert und in Module gegliedert, wie in Abbildung 3 dargestellt ist.

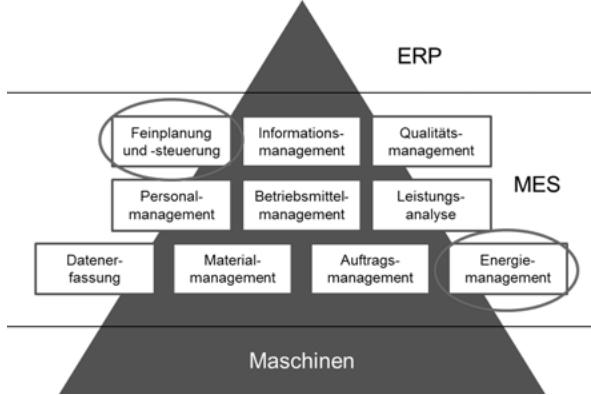


Abbildung 3: Aufgaben eines Fertigungsleitsystems nach VDI 5600 [13], Feinplanung und Energiemanagement sind einzelne Module ohne starke Verbindung zueinander

Nach der VDI-Richtlinie existieren ein Modul zur Feinplanung- und Steuerung und ein weiteres für das Energiemanagement. Diese Module werden bislang häufig unabhängig voneinander betrachtet, so dass die Feinplanung den Energieverbrauch der zu planenden Arbeitsschritte nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Häufig beschränkt sich das Energiemanagement-Modul auf erweiterte Monitoringfunktionen und kann die Fertigung selbst nicht beeinflussen. Um die benötigte Flexibilität im Hinblick auf den Energieverbrauch zu schaffen und so die Nutzung des volatilen Energieangebots zu fördern, muss diese Grenze durchbrochen werden, und das Energiemanagement muss eng mit der Feinplanung vernetzt werden.

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz soll diese Lücke schließen. Ein neues Modul kann die Feinplanung von dem bisherigen übernehmen oder dieses erweitern und den Planungsfaktor Energieverbrauch integrieren. Das Modul Energiemanagement kann weiterhin parallel zum Monitoring genutzt werden, kann optional aber auch durch das neue Energie-Feinplanungsmodul abgelöst werden. Die Idee eines solchen Moduls ist bereits in anderen Projekten, wie ECOMATION

[3], mit dem Ziel eines energieeffizienten MES entstanden. Ein energieflexibles MES, welches diese Lücke ausfüllt, ist derzeit nicht verfügbar.

5.5 Energieverbrauchsprognosen als Enabler für die energieflexible Planung

Eine energieabhängige Feinplanung der Fertigung kann nur erfolgen, wenn der Energieverbrauch aller zu planenden Fertigungsschritte für jedes Werkstück und die individuell zugeordnete Maschine bekannt ist. Während bei einer Serienproduktion auf Messwerte vorheriger Produktionsreihen zurückgegriffen werden kann, ist dies in der Einzel- und Kleinserienfertigung nicht möglich. Bislang wird hier meist auf Berechnungen zurückgegriffen, die sehr umfangreich sind und viele Einflüsse auf den Fertigungsprozess berücksichtigen müssen. Diese Berechnungen sind zeitintensiv und erfordern die Angabe vieler Parameter, die häufig nur durch die Simulation der Fertigung ermittelt werden können. Andere Ansätze verzichten auf exakte Werte für die individuellen Fertigungsprozesse und reduzieren die Komplexität durch die Klassifikation in verschiedene Leitungsstufen, die durch eine Kombination von Betriebszuständen erreicht werden [14].

Eine Alternative zu diesem Ansatz versprechen Methoden des Maschinellen Lernens. Diese Methoden ermöglichen es Computern Muster und Zusammenhänge in vorhandenen Datensätzen zu erkennen und diese auf weitere Datensätze anwenden zu können. Der Anwendung eines solchen Algorithmus geht, nach dessen eigentlicher Entwicklung, eine ausreichend lange Lernphase voraus, in der er Datensätze analysiert, Muster in ihnen erkennt und diese generalisiert.

Die Prognose des Leistungsbedarfs für die Fertigung soll wie in Abbildung 4 dargestellt erfolgen. Eingangsparameter für die Prognose sind:

- Die ausgewählte Maschine
- Die zu verwendenden Werkzeuge
- Das Material
- Die Fertigungsparameter
- Die zu fertigenden Features

Maschine, Werkzeug und Material sind hier als Eingangsgrößen naheliegend und bedürfen keiner weiteren Erläuterung. Als Fertigungsparameter sollen hier Maschinenparameter aufgefasst werden, die in einem definierten Rahmen variabel gewählt werden können, wie beispielsweise die Schnittgeschwindigkeit oder die Kühlleistung. Die durchzuführenden Fertigungsoperationen werden hier nicht als Prozessbeschreibung (z. B. in Form des NC-Programms), sondern als Features, die gefertigt werden sollen, beschrieben. Sie sind parametrierbar, so dass ein Großteil üblicher Werkstücke mittels einer Sammlung von angepassten Features beschrieben werden kann. Als Ergebnis prognostiziert der Algorithmus Leistung und Fertigungsdauer des notwendigen Prozesses, da so die Gesamtleistung der Fertigung berechnet werden und als Optimierungsgröße in die Feinplanung eingehen kann. Kann die Leistungsaufnahme nicht nur für die gesamte Maschine, sondern für einzelne Komponenten vorhergesagt werden, so ist es möglich, auch deren Einsatz weiter zu optimieren. Voraussetzung ist, dass die Maschinensteuerung befähigt ist, unterschiedliche Betriebsweisen anzubieten und die Auswahl verschiedener energetischer Zustände ermöglicht. Da diese Funktionen zunächst implementiert werden müssen, wird sich ein erstes System auf die Betrachtung der gesamten Maschine beschränken müssen und die Prognose des Leitungsverlaufs der einzelnen Komponenten nicht benötigen.

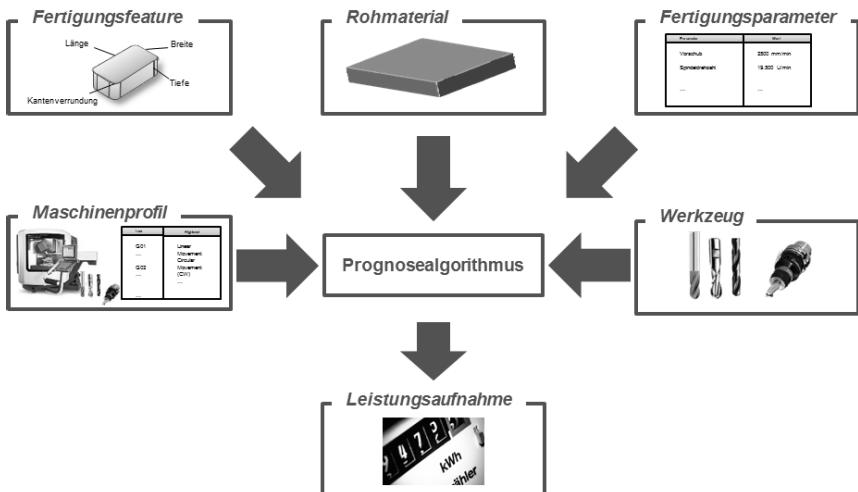


Abbildung 4: Der lernende Algorithmus ermittelt aus allen Eingangsgrößen die voraussichtliche Leistungsaufnahme

Neben der Einschränkung auf die geringere Zahl der Eingangsparameter ist ein Vorteil der Anwendung eines Machine Learning-Algorithmus (kurz ML-Algorithmus), dass er auch Zusammenhänge berücksichtigt, die nicht explizit bekannt und formalisiert sind. Dies ist möglich, da auch versteckte Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen erkannt werden können und Verbindungen nicht explizit formuliert werden müssen. Durch das kontinuierliche Weiterlernen werden außerdem auch Verschleißerscheinungen in der Maschine und an ihren Komponenten implizit berücksichtigt. Ein Algorithmus, der diese Aufgaben wahnimmt, ist als überwachter Lernalgorithmus zu konzipieren und zu implementieren, um eine kontinuierliche Verbesserung auf Basis der Datenerfassung in der Fertigung zu erreichen.

Sind die Leistungsverläufe für alle Fertigungsfeatures prognostiziert, so lässt sich aus der Kombination dieser, ergänzt um die Verbräuche für Eilgangfahrten und Werkzeugwechsel sowie für notwendige Stillstandzeiten während des Rüstens, eine Leistungskurve für den gesamten Fertigungsprozess eines Bauteils zusammensetzen, wie in Abbildung 5 gezeigt ist. Diese Leistungskurven können innerhalb kurzer Zeit erstellt werden und dienen als Eingangsgrößen für die Feinplanung.

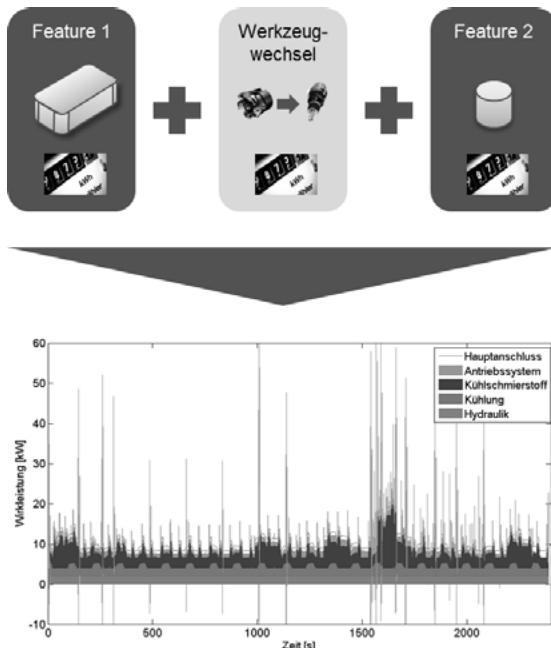


Abbildung 5: Die Summe der Leistungsaufnahmen der einzelnen Bearbeitungsfeatures ergibt eine Leistungskurve für das gesamte Werkstück

5.6 Modul Energieflexibilität

Auf Grundlage der in Abschnitt 5.5 vorgestellten Prognose des Leitungsbedarfs für die spanende Fertigung kann die aufgenommene elektrische Energie einer Maschine als Planungsgröße in die Feinplanung für eine Fertigung eingehen. Ein Modul, welches diese berücksichtigt, soll im Rahmen des Forschungsprojektes SynErgie entstehen.

Um die weitere Planungsgröße berücksichtigen zu können, müssen zunächst die dazu vorhandenen Freiheitsgrade identifiziert werden. Aufgrund der aktuell noch gering ausfallenden Mehrkosten durch eine nicht-optimale Feinplanung in Bezug auf die Zielgröße Energieverbrauch wird zum aktuellen Zeitpunkt kein industriell fertigendes Unternehmen schlechtere Ergebnisse im Hinblick auf die etablierten Planungsgrößen Termintreue, Durchlaufzeit und Auslastung hinnehmen. Diese Planungsgrößen müssen daher in dem aus der Feinplanung resultierenden Belegungsplan weiterhin ein Optimum darstellen und die neue Zielgröße Energie darf nur Anpassungen im Rahmen des vorhandenen Optimums vornehmen. Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten, die zusätzliche Planungsgröße zu integrieren:

Zum einen kann ein neues Optimierungsmodell geschaffen werden, in welchem von Anfang an die Energie berücksichtigt wird. Um die traditionellen Planungsgrößen zu bevorteilen, kann eine Gewichtung für verschiedene Zielgrößen implementiert werden und so eine benutzerspezifische Priorisierung erfolgen. Durch eine solche Priorisierung kann außerdem die aktuelle Zusammensetzung der Produktionskosten gespiegelt werden, indem die Gewichtung der Zielgrößen ihrem aktuellen Anteil an den Produktionskosten entspricht. Dieser Ansatz betrachtet den gesamten Lösungsraum, so dass ein globales Maximum gefunden wird. Dazu muss in diesem Szenario für jeden

Bearbeitungsschritt im Auftragsvorrat die Leistungskurve jeder zur Durchführung befähigten Anlage mit unterschiedlichen Kombinationen der Fertigungsparameter bestimmt werden und in die Feinplanung einfließen. Die Anzahl der Berechnungen und der in die Optimierung einfließenden Größen ist entsprechend hoch und das Optimierungsmodell wird komplex.

Ein anderer Ansatz setzt auf dem Ergebnis der konventionellen Feinplanung auf. Dieses kann als Basis verwendet werden, um im Anschluss Anpassungen im Hinblick auf die Leistungskurve der gesamten Fertigung durchzuführen. Zunächst wird dazu die Leistungskurve des vorläufigen Belegungsplanes berechnet und Extrema des Residualverbrauchs identifiziert. Im Anschluss wird untersucht, ob Bearbeitungsschritte im vorläufigen Belegungsplan variiert werden können, ohne dass dadurch die Produktionsziele beeinträchtigt werden. Dieser Ansatz wird in der Regel nur ein lokales Optimum in der Umgebung des energieunabhängigen Optimums der konventionellen Feinplanung finden, bietet aber den Vorteil, dass die initiale Feinplanung deutlich einfacher durchgeführt werden kann und dass die Leistungskurven nur für ausgewählte Szenarien prognostiziert werden müssen.

Um die Akzeptanz in der Industrie zu erhöhen scheint es sinnvoll, kurzfristig den zweiten vorgestellten Ansatz zu verfolgen und den ersten Ansatz als langfristige Lösung zu betrachten. Diese Vorgehensweise zeigt zeitnah, dass mögliche Optimierungen vorgenommen werden können, ohne dass etablierte Planungsmethoden unberücksichtigt bleiben oder ressourcenintensive Rechnungen durchgeführt werden müssen. Nachdem die Industrie für diese Herangehensweise sensibilisiert ist, kann im Anschluss, gestützt durch die voraussichtlich weiter zunehmende Volatilität des Energiemarktes, der erste Ansatz umgesetzt werden.

Grundsätzlich lassen sich drei Ansätze zur Umverteilung der elektrischen Last einer Fertigung unterscheiden[9]:

- Verlagern von Prozessen auf andere Maschinen
- Optimierung der Fertigungsparameter
- Zeitliches Verschieben von Fertigungsschritten und Pausen

In dem erarbeiteten Konzept werden diese drei Methoden kombiniert, um das im Rahmen des vorläufigen Belegungsplanes bestmögliche erreichbare Ergebnis zu erhalten. Ausgehend vom vorläufigen Belegungsplan werden die drei Optionen, wie in Abbildung 6 dargestellt, in der genannten Reihenfolge auf ihr Potential zur Glättung der Residuallast untersucht. Die beiden letzten Schritte werden dabei auf Maschinenebene umgesetzt, allerdings muss das MES-System der Maschinensteuerung die aktuellen Randbedingungen mitteilen und die Optimierungen innerhalb der einzelnen Maschinensteuerungen koordinieren.



Abbildung 6: Vorgehensweise zur Erstellung einer energieflexiblen Feinplanung und Maschinensteuerung nach dem zweiten vorgestellten Ansatz

Während der Erstellung des Belegungsplanes findet die Auswahl der Maschine für einen Bearbeitungsschritt auf verschiedenen Grundlagen statt. Wichtigstes Kriterium ist die Maschinenfähigkeit, d.h. die Maschine muss in der Lage sein, den geforderten Prozess unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen, wie z.B. der Qualitätsanforderungen durchzuführen. Weitere Kriterien können die Durchlaufzeit und der Maschinenstundensatz sein. Die elektrische Leistung, die eine Maschine für einen Prozess aufnimmt, wird dabei gar nicht oder nur implizit im Maschinenstundensatz berücksichtigt. Da dieser als statischer Wert existiert ist die Abschätzung ungenau und sollte im Rahmen der Energieflexibilität durch eine genaue Prognose, wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, ersetzt werden. Durch den Vergleich mit anderen Maschinen, die die Fähigkeit besitzen den Bearbeitungsschritt durchzuführen, wird festgestellt, ob die Gesamtenergieaufnahme

reduzierbar und die Residuallast zu glätten ist. Sollte einer der Punkte zutreffen, muss das Planungssystem die Möglichkeiten prüfen, den Prozess auf eine geeigneteren Maschine zu verlagern. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, kann durch dieses Vorgehen die Leistungsaufnahme und damit auch die Residuallast gesenkt werden.

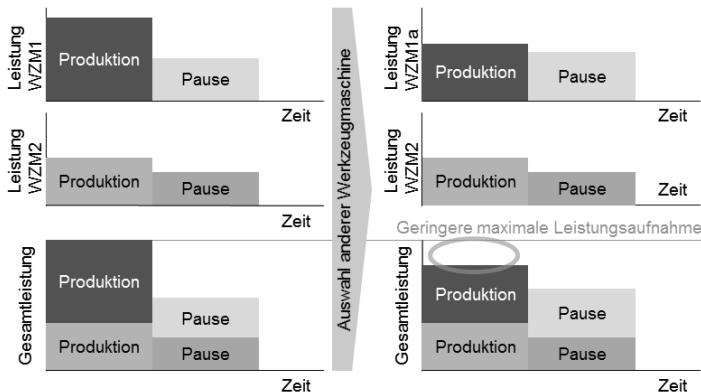


Abbildung 7: Flexibilisierung der Leistungsaufnahme durch Auswahl einer alternativen Werkzeugmaschine

Sind die Bearbeitungsschritte den Maschinen zugewiesen, wird im nächsten Schritt das Potential zur Optimierung auf Ebene der Maschinensteuerung analysiert. Dazu werden im Rahmen der CAM-Planung die relevanten Parameter unter Beibehaltung der äußeren Randbedingungen (z.B. Durchlaufzeit, Qualität) variiert und es wird jeweils eine Prognose für die Leistungskurve erstellt. Aus den vorhergesagten Lastverläufen werden die vielversprechendsten in Bezug auf die Residuallast ermittelt und dem Fertigungssteuerer bzw. dem Maschinenbediener vorgeschlagen. Eine automatisierte Anpassung der Parameter sollte zunächst nicht erfolgen, da ggf. Einflüsse existieren, die das Planungssystem nicht kennt, wie z.B. erhöhter Werkzeugverschleiß unter bestimmten Randbedingungen. Dem Anwender soll an dieser Stelle das Potential der Anpassung in Form eines Energiekostenbetrages, der gespart werden kann, genannt werden und er muss selbstständig entscheiden, ob die Anpassung gesamtwirtschaftlich sinnvoll erscheint. Sollte er sich gegen eine Anpassung entscheiden, ist die Angabe der Gründe für diese Entscheidung zu hinterlegen, so dass eine Datenbasis erstellt werden kann, die in Weiterentwicklungen bzw. für die Umsetzung des globalen Ansatzes als Werkzeug dienen kann, um die Auswahl ungünstiger Fertigungsparameter zu vermeiden. Durch die Optimierung der Fertigungsparameter ändert sich der Belegungsplan ähnlich wie durch die Auswahl einer anderen Werkzeugmaschine, daher sei zur Veranschaulichung auf Abbildung 7 verwiesen; statt einer anderen Maschine repräsentiert WZM1a in diesem Fall die gleiche Maschine mit angepassten Parametern.

Weiteres Potential bietet die Verschiebung von Fertigungsschritten und Pausen in dem Belegungsplan, wie in Abbildung 8 zu erkennen ist. Für die Verschiebung der Pausenzeiten ist die Bereitschaft der Produktionsmitarbeiter der einschränkende Faktor. Durch entsprechende Anreize, z.B. Beteiligung an Einsparungen, können diese motiviert werden und durch das Verschieben der Pausenzeiten einzelner Mitarbeiter gegeneinander kann der Energieverbrauch zeitlich gleichmäßiger verteilt werden. Machen nicht alle Mitarbeiter zeitgleich Pause, so stehen nicht alle Maschinen gleichzeitig und die Prozesslast fällt nicht für die gesamte Fertigung weg. Ist eine Produktion zu 100% ausgelastet, bietet das zeitliche Verschieben keine weiteren Anpassungsmöglichkeiten. Da eine solche Auslastung für die Individualfertigung eher selten ist, bietet auch dieser Ansatz Flexibilisierungspotential. Durch das zeitliche Verschieben von Prozessen, die für Zeiten einer hohen

Residuallast geplant sind, kann selbige reduziert werden und das volatile Energieangebot kann effizient genutzt werden. Diese Verschiebungen kann das Planungssystem vollautomatisch durchführen, da alle relevanten Restriktionen schon für die initiale Feinplanung im System hinterlegt sind.

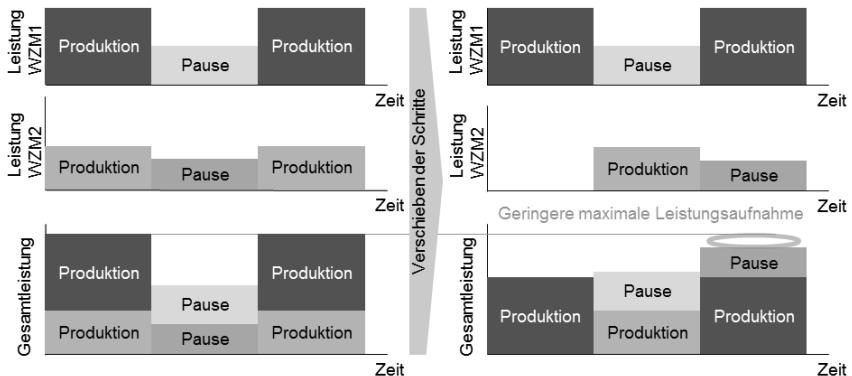


Abbildung 8: Flexibilisierung der Leistungsaufnahme durch zeitliches Verschieben von Fertigungsschritten und Pausen

5.7 Serviceorientierte Maschinenanbindung

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen hervorgeht, muss sich ein geschlossener Ansatz zur Energieflexibilisierung sowohl auf die Fertigungsplanung und -steuerung als auch auf die untergeordneten Maschinensteuerungen beziehen. Zwei voneinander unabhängige Regelkreise sind dabei nicht empfehlenswert, da sie nicht kooperativ arbeiten würden. Es muss eine Lösung gefunden werden, die sowohl Maschinensteuerungen als auch die Fertigungssteuerung einschließt. Die Eigenschaften und Funktionen einzelner Maschinen unterscheiden sich ebenso wie ihre Steuerungen, so dass eine Integration der Maschinensteuerung in das Fertigungsleitsystem nicht praktikabel ist. Die Fertigungssteuerung sowie das Energiemanagement müssen weiterhin zentral organisiert sein, damit eine Übersicht über den Zustand der gesamten Produktion ermöglicht werden kann. Beide Systeme müssen also weiterhin gleichermaßen parallel existieren als auch miteinander kooperieren.

In den vergangenen Jahren wird die Anbindung des MES an ein ERP durch eine steigende Zahl von Anbietern als serviceorientierte Architektur implementiert. Es bietet sich an, diesen Ansatz auch auf die darunterliegende Ebene zu übertragen und die Verbindung zwischen Maschinen und MES als SOA auszulegen. Dieses Architekturkonzept bietet den Vorteil, dass die Fertigungssteuerung Funktionen der Maschinensteuerung nutzen und diese parametrieren kann, soweit die Maschinensteuerung entsprechende Funktionen in standardisierter Form zur Verfügung stellt. Die Funktionen selbst müssen hingegen erst auf Maschinenebene realisiert werden und können die Charakteristiken der speziellen Maschine ausreichend berücksichtigen.

Ein Konzept für die energieflexible Fertigung konzentriert dazu alle regelnden Funktionen der Energieflexibilität in der Fertigungssteuerung. Die Maschinensteuerung bietet dazu eine Sammlung zusätzlicher Dienste an, die durch das Fertigungsleitsystem verwendet werden können. Diese Dienste geben Auskunft über den energetischen Zustand einer Maschine sowie geeignete Stillstandsdauern und ermöglichen das Schalten der Maschine in andere Zustände. Neben der Parametrierung einzelner Betriebszustände ist dabei auch eine ausreichend umfangreiche Auswahl an Standby-Zuständen vorzusehen, so dass je nach Dauer der Stillstandszeit nur die notwendigen Aggregate betriebsbereit

gehalten werden. Ein weiterer Dienst der Maschine ermöglicht eine vorzeitige Aufwärmphase, so dass diese bereits während Zeiten günstiger Energiekosten erfolgen kann.

Durch das Auslagern dieser maschinenspezifischen Funktionen auf die Maschinensteuerung oder auf ein an der Maschine vorzusehendes Steuerungssystem können einheitliche Dienste zur Verfügung gestellt werden. Sie ermöglichen es dem Leitsystem über eine definierte Schnittstelle beliebige weitere Maschinen anzubinden, die über entsprechende Steuerungsfunktionen in Form von Diensten verfügen. Die Komplexität der einzelnen Fertigungseinrichtungen wird damit nicht in das Leitsystem verlagert, die Flexibilität der Anlagen kann durch die einheitlichen Dienste aber dennoch in der Leitebene verwendet werden und zur Energieflexibilität der gesamten Fertigung beitragen.

Ein wesentlicher Nachteil serviceorientierter Architekturen liegt in der Notwendigkeit Dienste zu definieren und sicherzustellen, dass diese durch alle teilnehmenden Akteure angeboten und verwendet werden können. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich ein Großteil der Steuerungshersteller für Werkzeugmaschinen zeitnah auf eine einheitliche serviceorientierte Kommunikation festlegen wird. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen ergibt sich durch maschinenseitig vorgesehen Rechner, die den Endpunkt der serviceorientierten Kommunikation darstellen und an die Steuerung der Maschine selbst angebunden sind. Diese Rechner müssen individuell für jede Maschine programmiert werden und die Komplexität der Maschine beinhalten.

5.8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Notwendigkeit, sich mit dem volatilen Energieangebot der Zukunft auseinanderzusetzen, steht außer Frage. Die Energieeffizienz, die im Fokus vieler Bemühungen in Industrie und Forschung steht, ist zwar weiterhin wünschenswert, wird die entstehende Problematik aber nicht lösen können. Ohne diese außer Acht zu lassen, müssen daher bestehende Ansätze um Funktionen der Energieflexibilität erweitert werden, um auch im Energiemarkt der Zukunft umweltschonend und preisgünstig fertigen zu können. Nur durch diesen Ansatz kann die Residualleistung reduziert und ein Gleichgewicht zwischen dem Energieangebot der Zukunft und der Energienachfrage annähernd erreicht werden.

In diesem Artikel werden Ansätze vorgestellt, die diese Flexibilität durch neue Steuerungsmethoden ermöglichen. Durch den Einsatz leitungsfähiger lernender Algorithmen können diese Ansätze ohne historisch vergleichbare Daten auch in der Einzel- und Kleinserienfertigung, wie sie im Maschinen- und Anlagenbau üblich ist, eingesetzt werden.

Nach Abschluss der Implementierung der genannten Ansätze und der ausstehenden Validierung ihrer Funktionsfähigkeit muss eine Schnittstelle geschaffen werden, um das aktuelle Energieangebot sowie den Preis in die Planung einbeziehen zu können. Ebenso müssen die Maschinen und Aggregate in der Fertigung befähigt werden, die notwendigen Dienste bereitzustellen, so dass eine flexible Steuerung einzelner Komponenten möglich ist und Informationen über den energetischen Zustand abgefragt werden können.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsvorhabens „Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“ (SynErgie), das mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SFK3L1 gefördert und vom Projektträger Jülich (PtJ) betreut wird. Die Verantwortung für den Inhalt der vorliegenden Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

5.9 Literatur

- [1] Brecher, Ch. (Hrsg.): Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenantrieb - EWOTeK. Aachen: Apprimus Verlag 2012
- [2] Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin 2016
- [3] Elsner, P.; Erlach, B.; Fischedick, M.; Lunz, B. u. Sauer, D. U.: Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge. Energiesysteme der Zukunft. München: acatech 2015
- [4] Agora Energiewende: Stromerzeugung und Stromverbrauch, 2017. <https://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/76/Agorameter/>
- [5] Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2016. Deutschland und Internationales. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2016
- [6] Sethi, A. K. u. Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: A survey. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289–328
- [7] Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion, TU München Dissertation. München 2015
- [8] Schellong, W.: Lastprofile und Lastmanagement. In: Schellong, W. (Hrsg.): Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016, S. 375–417
- [9] Brecher, Ch.; Malik, A.; Herfs, W.; Lohse, W. u. Gsell, S.: Optimierung des Energieumsatzes mithilfe eines MES. Prozessintegrierte Minimierung von Leistungslastspitzen und Abschaltung von Produktionsanlagen. wt Werkstatttechnik online 105 (2015) 5, S. 319–323
- [10] Verl, A. (Hrsg.): Abschlussbericht FOR 1088 Ecomation. VDI Reihe 2, Bd. 695. Düsseldorf: VDI Verlag 2017
- [11] Gerberich, T.: Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie. Wiesbaden: Gabler Verlag 2011
- [12] Knothe, T.; Orth, R.; Gering, P. u. Winrich, N.: Modularer Fertigungsmanagementsysteme für kundenauftragsindividuelle Prozesse. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 6, S. 346–350
- [13] VDI-Richtlinie 5600; 10.2016. *Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems)*
- [14] Herfs, W.; Malik, A.; Gsell, S. u. Lohse, W.: Saving Energy on Shop Floor Control Level. Prerequisites for Energy-Related Scheduling within Manufacturing Execution Systems. Industry Applications (INDUSCON). Red Hook, NY/USA: Institute of Electrical and Electronic Engineers IEEE 2014, S. 1–8

6 Reduzierung von Ausschuss und Nacharbeiten durch intelligente Datenauswertung und Kompensationsalgorithmen in mehrstufigen Produktionssystemen

F. Eger, A. Verl, ISW, Uni Stuttgart

6.1 Einleitung

Der Wandel der globalen und lokalen Wirtschaft, die Verkürzung von Produktlebenszyklen und der zunehmende Grad der Produktanpassung erfordern Produktionssysteme, die diesen dynamischen Anforderungen in allen Grundfunktionen, einschließlich der Qualitäts- und Produktionskontrolle, gerecht werden. Um den Ausschuss in mehrstufigen Produktionssystemen reduzieren und aufwendige Qualitätskontrollen minimieren zu können, werden ständig neue Anforderungen an die Anpassungsfähigkeit unterschiedlicher Produktionssysteme gestellt. Fehlerhafte Bauteile, die im Produktionssystem identifiziert werden, müssen häufig entsorgt oder recycelt werden. ForZDM beschäftigt sich mit dieser Problemstellung und versucht den Anpassungsgrad innerhalb des Produktionssystems zu steigern, um Ausschuss am Ende der Fertigung zu vermeiden. Dabei liegt der Fokus einerseits auf der Fehlervermeidung und andererseits auf der Kompensation von Fehlern entlang des gesamten Produktionssystems.

Heutige Produktionssysteme bestehen aus komplexen Verkettungen von einzelnen Prozessschritten und Prozesslinien. Folgen dessen entstehen automatisch Fehlerquellen, welche zur Abweichung von Sollwerten bis hin zum Ausschuss führen. Um diesen Effekt zu reduzieren und zeit- und kostenintensive Qualitätskontrollen zu minimieren werden aktuell überwiegend einstufige Lösungsansätze verfolgt. Das bedeutet, dass der derzeitige Zero Defect Manufacturing (ZDM)-Ansatz sich mit lokalen Lösungen, einzelnen Prozessschritten bzw. Anlagen beschäftigt.

ForZDM hingegen setzt den Fokus auf eine globale Lösung, die das ganze mehrstufige Produktionssystem betrachtet und die Eigenschaften jedes einzelnen Produktionsschrittes nutzt um Fehler zu vermeiden oder gegebenenfalls Fehler zu kompensieren. Dabei sollen die Produktions- als auch Qualitätsziele dynamisch erreicht werden, basierend auf einer integrierten Produktionssteuerung über den gesamten Produktionsprozess hinweg. Sowohl in der Großserien- als auch in der Kleinserienfertigung ermöglicht diese Lösung den schnellen Einsatz eines kosteneffektiven Liniüberwachungs- und Steuerungssystems, welches teure Offline-Mess- und Prüfungsschleifen reduziert und die Entstehung fehlerhafter Bauteile am Ende der Linie vermeidet. Das langfristige Ziel ist es, die Betriebskosten des Systems und den Ausschuss zu reduzieren und damit die Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit der europäischen Unternehmen auf dem Weltmarkt zu erhöhen. Im Zeitalter von Industrie 4.0 wird auch in ForZDM die Integration zusätzlicher Sensorsysteme forciert. Mit Hilfe von Methoden aus der Statistik und Analytik werden die erfassten Signale ausgewertet und anschließend unter anderem mit Strategien aus den Bereichen Downstream-Kompensation, Inline-Reparatur sowie Prozessregelung ohne den Einsatz von zusätzlichen Prozess- oder Prüfstufen zur Optimierung genutzt. Die Entwicklungen werden innerhalb drei wesentlicher europäischer Industriesektoren (Luft- und Raumfahrt, Schienentransport und Medizintechnik) validiert.

Zu den von der Europäischen Union geförderten und bereits erfolgreich abgeschlossenen Projekte gehören unter anderen MUPROD, IFACOM [1], MEGAFIT und MIDEMMA. Alle zeigen Ansätze wie in Produktionssystemen eine nahezu Null-Fehler-Fertigung erreicht werden kann. Im Cluster 4ZDM liegt der Schwerpunkt auf der Reduzierung der Fehlerquote bei der Herstellung komplexer,

hochpräziser und hochwertiger Teile durch Inline-Messung, Prozesskontrolle oder verbesserte Qualitätskontrolle. In MUPROD wurde auf Shop-Floor Ebene ein innovatives Qualitätskontrollsystem zur prozessbegleitenden Fehlerreduzierung entwickelt [2,3]. MEGAFIT und MIDEMMA konzentrierten sich auf Mikroherstellungsprozesse, einschließlich der mehrstufigen Mikroumformung [4,5].

Das Forschungsprojekt ForZDM welches ebenfalls im 4ZDM-Cluster einzugliedern ist, zielt darauf ab, eine ZDM-Strategie der nächsten Generation zu entwickeln. Im Folgenden wird detailliert auf das Projekt eingegangen.

6.2 ZDM-Lösungen für mehrstufige Produktionssysteme

Wie bereits erwähnt wird die ZDM-Lösung von ForZDM auf Basis von drei Produktionssystemen entwickelt. Das erste Produktionssystem stellt Turbinenwellen her. Hierbei handelt es sich um hochpräzise, rotationssymmetrische Bauteile, die in ihrer späteren Verwendung hohen Sicherheitsanforderungen genügen müssen. Aus dem zweiten Produktionssystem entstehen Mikrokatheter für die Medizintechnik. Die Anforderungen an diese Bauteile sind ebenfalls sehr hoch, was den hohen Aufwand durch Qualitätskontrollen rechtfertigt. Dennoch muss dieser minimiert werden um die Produktion nachhaltig wachsen zu lassen. Das dritte Produktionssystem stellt Eisenbahnnäxsen her, hier handelt sich ebenfalls um rotationssymmetrische Bauteile, welche einen komplexen Produktionsprozess durchlaufen. Diese drei Produktionslinien bilden die Grundlage für die Umsetzung des Projektvorhabens.

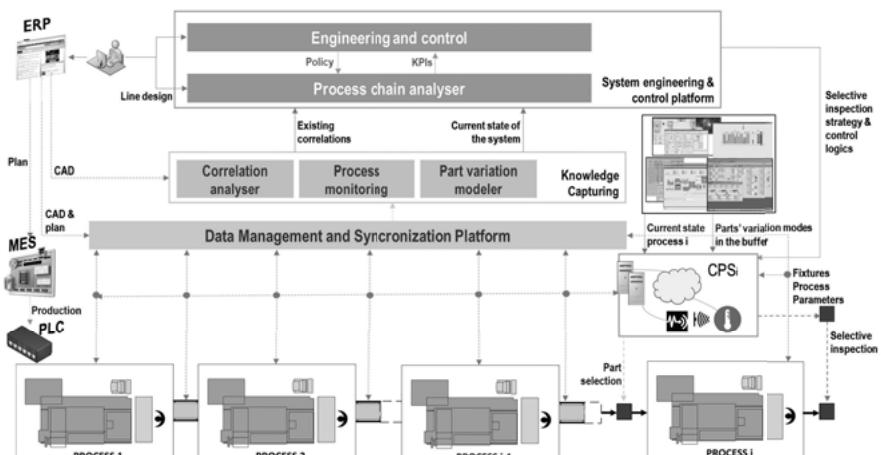


Abbildung 1: Systemarchitektur von ForZDM

Um dieses Ziel realisieren zu können wird zunächst eine Systemarchitektur entwickelt, die in Abbildung 1 zu erkennen ist. Die Architektur lässt sich in vier Ebenen strukturieren, die im Folgenden beschrieben werden. Der Shop-Floor bildet mit unterschiedlichen Maschinen und Anlageteilen die erste Ebene (*I. Shop-Floor*). Neben den schon vorhandenen Sensoren, Maschinendaten und manuellen Messverfahren soll diese Ebene durch die Integration zusätzlicher Sensorik später einen höheren Informationsgehalt liefern.

Dieser Informationsgehalt soll in der zweiten Ebene, welche aus einem umfassenden Datenerfassungssystem sowie einer Datenmanagement-Plattform (*II. Data Acquisition System and Data Management Platform*) besteht, gesammelt und synchronisiert werden. Unterschiedliche Daten

aus heterogenen Quellen verschiedener Zeitauflösung und Skalen, die in der Produktionslinie auftreten, werden strukturiert und formalisiert. Zu diesen Daten gehören:

- (i) Daten zur Werkstückqualität, die mit Hilfe von Prüftechnologien erfasst werden,
- (ii) Prozessdaten, die von Sensoren im Prozess (in-process sensors) erfasst werden,
- (iii) Maschinenzustandsdaten, die vom Produktionsüberwachungssystem erfasst werden,
- (iv) Daten zum Produktfluss, die mit Hilfe von Tracking-Lösungen erfasst werden, und
- (v) kodifizierte Rückmeldungen, die von den Betreibern der Produktionslinie gesammelt werden.

In der dritten Ebene (*III. Knowledge Capturing Platform*) werden anschließend die Daten analysiert um relevante Informationen für die Produktionsoptimierung einerseits daten- und andererseits auch wissensbasiert herauszufiltern. Die wissensbasierte Analyse der relevanten Korrelationen unter den mehrstufigen Produktionssystemen wird mit fortschrittlicher Datenanalyse und Techniken der künstlichen Intelligenz unterstützt. Damit soll eine durchgehende Transparenz der Produkt-, Prozess- und Ressourcenzustände über das gesamte System hinweg ermöglicht werden. Der Anwender soll daraufhin mit Hilfe einer HMI in der Lage sein, bestehende Zusammenhänge mittels wissens-, daten- und lern-basierter Methoden zu modellieren.

Auf der ZDM-Ebene (*IV.*) sorgen Cyber-Physische Systeme (CPS) für die proaktive Anpassung der Prozessparameter für jede als kritisch identifizierte Prozessstufe. Die Information über die Historie der Bauteile von den vorangegangenen Prozessen ist hierbei von Relevanz. Basierend darauf sollen sich Prozesse bzw. die Prozessreihenfolge mit Hilfe von spezifisch generierten Variationsmodi anpassen um einerseits Fehlerentstehung vorzubeugen und andererseits Fehler nach ihrer Entstehung korrigieren zu können. Dies geschieht unter anderem in Abhängigkeit von zuvor definierten KPI's (Key Performance Index Parameters). Sobald also ein Fehler detektiert wird, sorgen erstellte Templates und CPSs für die Strategiefindung um den Fehler so früh wie möglich zu beheben.

Zu den Lösungen gehören sowohl (i) die Inline-Reparatur von Werkstücken, (ii) die Inline-Reparatur von Werkstücken durch Feed-Forward-Anpassungen (Downstream-Kompensation) als auch die (iii) selektive Montage in abhängigen nachgelagerten Stufen. Die Auswahl der am besten geeigneten selektiven Qualitätskontrolle, Teileflussteuerung und Fehlerkorrekturmaßnahmen basiert auf der Analyse der Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit, die Produktionslogistik und die Qualitätsleistung der gesamten Prozesskette, wodurch der Kompromiss zwischen Qualität und Produktivität auf Systemebene angemessen gehandhabt wird. Ein HMI unterstützt Produktionsleiter dabei, Produktionsziele und Liniенmanagementstrategien schnell an die sich ändernden Anforderungen und Merkmale anzupassen. Darüber hinaus ist auf Shop-Floor Ebene ein verteiltes Überwachungs-, Alarmierungs- sowie CPS-basiertes Steuerungssystem auf Basis der Norm IEC61499 integriert, das die Umsetzung der auf Systemebene optimierten Qualitäts- und Logistikstrategien ermöglicht. Alles in allem stellt die Qualitäts- und Logistikkontrollstrategie eine neuartige Lösung für die Implementierung des ZDM-Paradigmas in komplexe, mehrstufige Fertigungssysteme dar, die auf Multi-Scale-Modellierung, CPSs, Big Data und Data Analytics als Schlüsseltechnologien basiert. Die Schlüsselkomponenten der vorgeschlagenen Architektur werden im Folgenden zusammen mit den Hauptmerkmalen der ForZDM-Industriedemonstratoren vorgestellt.

6.3 Online-Datenerfassungssystem

Die Komplexität der mehrstufigen Produktionsszenarien und die ZDM-Strategien machen es notwendig, fortgeschrittene Funktionen auf der Datenerfassungsschicht zu implementieren:

automatische Geräteerkennung, Konfiguration der Sensoren, Datenfusion, Filterstrategien und Management der Bedienerausgaben.

6.3.1 Sensorintegration und Analyse

Um eine manuelle Konfiguration zu vermeiden, wird ein Internet of Things (IoT) basiertes automatisches Sensorerkennungs- und -konfigurationssystem eingesetzt [6], um ein schnelles Bereitstellen und Konfigurieren des Sensorsnetzwerks gewährleisten zu können. Dieser auf dem IoT-Standard basierende Ansatz ist flexibel genug, um Neukonfigurationen von Produktionsanlagen oder die Platzierung neuer Sensoren einfach zu bewältigen und die Überwachung und Fehlercharakterisierung des Produktionsprozesses zu verbessern. Die gesammelten Informationen setzen sich aus Sensorinformationen und Bedienerfeedback in verschiedenen Prozessschritten zusammen. Die Vielfalt der Sensoren, Heterogenität und riesige Datenströme machen den Informationszugriff, sowie die Erfassung und Verarbeitung zu einem breiten Forschungsfeld [7–9]. Die Handhabung von Benutzerfeedback und die Extraktion von Wissen sind entscheidend für die Charakterisierung und Analyse von Fehlern: Viele Prozesse sind halbautomatisch ausgeführt und erfordern einen entscheidenden Eingriff des Bedieners. Die grundlegenden Herausforderungen der Datenerhebung und -verarbeitung werden in drei Bereichen behandelt:

1. *Heterogene Datenerfassung*: ZDM umfasst nicht nur Sensordaten, sondern auch Daten aus Produktionsplanungssystemen (ERP), relationalen Datenbanken oder Defektmanagementsystemen. Die Datenerfassungsschicht empfängt Daten aus mehreren Quellen und sendet dieses in einem einheitlichen Format an die Datenintegrations- und –verwaltungsplattform [7].
2. *Sensordatenfusion*: Ein Multisensor-Datenfusionsmodell wird eingesetzt, um jegliche Informationen von den in der Produktion platzierten Sensoren zu verwalten. Da Daten von Natur aus fehlerbehafteten sind unterstützen KF/EKF-Techniken [10], um bereits verarbeitete Sensordaten zu erhalten.
3. *Verarbeitung von menschlicher Rückmeldung*: Die Rückmeldungen können in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: (i) Strukturierte Daten (kategorisierte und kontextbezogene Informationen) und (ii) unstrukturierte Daten (Freitext oder Kommentare). Verschiedenen Verfahren der Datenextraktion werden angewendet [11], um das zugrundeliegende Wissen richtig zu extrahieren.

6.3.2 Datenintegrations- und Verwaltungsplattform

Innerhalb von ForZDM wird die Softwarelösung OneBase als Ausgangspunkt für eine Datenintegrations- und Verwaltungsplattform eingesetzt. Im Rahmen des ANSI ISA 95 Schichtenmodells [12] bietet das OneBase-Framework die Kommunikation zwischen den verschiedenen Schichten. Dazu gehören Geräte, die typischerweise in Produktionsumgebungen wie SPSEN, Maschinen, Werkzeugen und verschiedene Mess-, Sensor-, Prüf- und Laborgeräte, MES- und ERP-Systeme eingesetzt werden. Das Framework basiert auf einer modularen und verteilten Architektur und setzt auf schnelle Kommunikation. Sein Datenmodell basiert auf Datenobjekten, die als Tags bezeichnet werden. Dabei kann es sich um einfache (Integer, Float, String) oder komplexe Datentypen verschachtelter Strukturen handeln. Komponenten aus dem Shop-Floor wie Maschinen oder andere Anlagenteile werden auf Tags abgebildet und logisch miteinander verknüpft. Die Tag-Kommunikation basiert auf einem Publish/Subscribe-Mechanismus, es können Tags abonnieren. Wenn eine Änderung an einem Tag veröffentlicht wird, erhalten alle anderen Abonnenten eine Push-Benachrichtigung. APIs in objektorientierten Programmiersprachen stehen für den Zugriff auf Tags zur Verfügung, so dass komplexe Logiken für die Fertigungssteuerung erstellt werden können.

6.4 Online

Die über das Multisensornetzwerk und die Datenplattform gesammelten Daten stellen eine neue und erweiterte Wissensquelle über die Ursachen der Defektentstehung und deren Ausbreitungsmechanismen entlang der Produktionslinien dar. Dieses Wissen muss extrahiert und strukturiert werden, um es für alle anstehenden Entwicklungen nutzbar zu machen.

6.4.1 Datenkorrelation und Root Cause Analysis

Basierend auf den gewonnenen Daten können konventionelle Qualitätskontroll- und Ursachenanalyse-Tools dabei helfen, auf Abhängigkeiten hinzuweisen die anschließend bestätigt werden müssen. Weitere Informationen können auch durch statistische Analyseverfahren gewonnen werden. Der nützlichste Informationsgewinn der heterogenen und synchronisierten Datenerfassung ist die Möglichkeit, Korrelationen zwischen Defekten und Prozessvariablen aus verschiedenen Stadien des Produkts zu identifizieren. Dies wird bereits in MUPROD und anderen früheren Projekten gezeigt [13,14], welche die Grundlage für die Modellierung der Fehlerausbreitungsmuster durch statistisches und maschinelles Lernen liefert [15,16].

6.4.2 Prozessregelung

Prozessregelung ist auf den kritischen Prozessen der Linie anzuwenden, um die Entstehung oder Ausbreitung von Fehlern zu vermeiden. In der Anlaufphase des Produktionssystems werden numerische Prozessmodelle den Prozess simulieren, um die Betriebsbedingungen schon im Voraus in einem Modell darstellen zu können. Somit können die Prozesse anschließend im realen Betrieb konstant kontrolliert und geregelt werden. Die Herausforderungen die es zu bewältigen gilt, sind auf die Implementierung und Anpassung von Prozessmodellen angewiesen, die derzeit entweder nicht vorhanden sind (z.B. das Zusammenspiel von Schneidewerkzeug, Prozesstemperatur und Spaneigenschaften) oder die stark verbessert werden müssen. Die Auswahl kommerzieller Systeme gewährleistet den Einsatz ausgereifter Sensortechnologien (z.B. Kraft, Vibration, Schallemission) und robuster und zuverlässiger Elektronik für die Signalverarbeitung und -analyse sowie die Maschinenanbindung. Dennoch müssen Sensorsignale noch analysiert werden, um aussagekräftige Informationen zu erhalten. Darüber hinaus müssen Algorithmen zur Entscheidungsfindung auf Basis der Signalinformationen implementiert werden. Für jeden kritischen Prozess muss eine spezifische Lösung entwickelt werden. Dies soll durch eine Vielzahl von Signalanalyse- und maschinellen Lerntechniken erreicht werden, die für diesen Zweck dienen [17,18].

6.4.3 Qualitätsorientierte Montage

Die qualitätsorientierte Montage konzentriert sich auf eine Teilmenge von Defektkompensationsstrategien, die selektive und adaptive Montagestrategien beinhalten, welche sich auf Produktvariationsausbreitungsmodelle stützen. Dieser Ansatz integriert analytische und auf künstlicher Intelligenz basierende Algorithmen zur Kompensation von Bauteilfehlern durch Optimierung der Montagestrategien. Es muss in einem dedizierten Modul implementiert werden, das als entscheidungsunterstützender Kern mit dem physischen System interagiert, indem es die spezifische Montagestrategie basierend auf der Messung des eingehenden Teils modifiziert.

In früheren Arbeiten lassen sich bereits selektive Montagestrategien finden, die für das mehrstufige Produktionssystem von Elektromotoren in der Automobilindustrie entwickelt wurden [18,19]. Hierbei wird ein spezielles künstliches neuronales Netzwerk (self-organizing maps) verwendet, welches zur Klassifizierung der Geometrieabweichungen der Bauteile in der Produktionslinie eingesetzt wird. Anschließend übernimmt ein Fuzzy-System die Auswahl der optimalen Kombination

konformer Teile aus den klassifizierten Bauteilen. Dieser selektive Montageansatz reduziert die Menge an Ausschusssteilen in frühen Prozessschritten und beseitigt den Ausschuss bei der End-of-Line-Qualitätskontrolle. Der beschriebene Ansatz ist jedoch an einen konkreten Anwendungsfall angepasst. In ForZDM wird eine generische Regelstrategie entwickelt, die in der Lage ist, sich an unbekannte Aufstellungen der mehrstufigen Produktionssysteme anzupassen.

6.4.4 In-line Reparatur und Downstream Kompensation

Die Inline-Reparatur konzentriert sich auf eine Reihe von technisch realisierbaren Maßnahmen zur Kompensation von Fehlern, die nach deren Auftreten innerhalb desselben Prozesses angewendet werden können [20]. Im Gegensatz zur Offline-Reparatur ist kein zusätzlicher Bediener oder Arbeitsplatz erforderlich. Stattdessen bleibt das Werkstück eingespannt und wird in der gleichen Station nachbearbeitet. Die endgültige Auswahl der verfügbaren, technisch realisierbaren Nacharbeits-Strategien muss durch die Überprüfung der Qualitätsanforderungen sowie Logistikbedingungen auf Systemebene erfolgen.

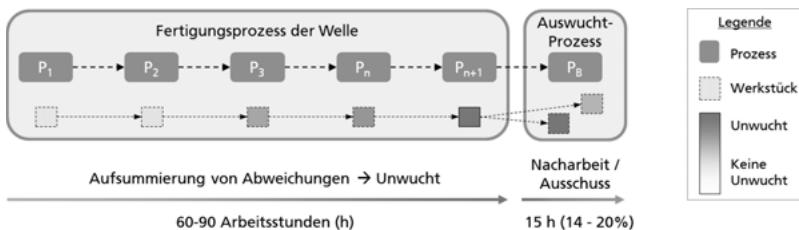


Abbildung 2: Vereinfachtes mehrstufiges Produktionssystem für rotationssymmetrische Bauteile inklusive Auswuchtprozess (EOL)

In MUPROD wurden bereits erfolgreiche Methoden zur nachgeschalteten Kompensation entwickelt. Ziel war es, Abweichungen im Magnetfeld einzelner Rotorstäbe durch Anpassung der nachgeschalteten Montageparameter zu kompensieren [18,21]. Dieser Ansatz wird auch auf ForZDM übertragen, um beispielsweise eine auftretende Unwucht in mehrstufigen Produktionssystemen für hochleistungsfähige rotierende Teile zu vermeiden (Abb. 2). Der Stand der Technik in diesem Fertigungsbereich ist, das Bauteil in einer End-of-Line (EOL) Qualitätskontrolle nach dem eigentlichen Fertigungsprozess auszubalancieren. Jeder Prozessschritt kann zu einer kleinen Unwucht des Werkstücks führen - das Ergebnis ist eine Anhäufung von Unwucht.

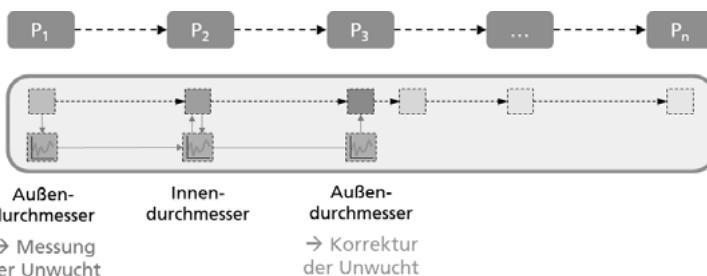


Abbildung 3: Downstream-Kompensation am Beispiel einer detektierten Unwucht

In diesem Fall wird die nachgeschaltete Kompensation als Vorsteuerung eingesetzt (Abb. 3). Das bedeutet: Tritt ein Fehler in einem frühen Prozessschritt auf, kann der Fehler in einem nachfolgenden (nachgelagerten) Prozessschritt behoben werden. So gibt es keine Fehleranhäufung.

durch frühzeitiges Erkennen von Fehlern bei der Nutzung vorhandener und zusätzlicher Messsysteme, wie z.B. die Auswertung von Motorsignalen zur Detektion der Unwucht.

6.5 Die Systemebene als Lösung für ZDM

Qualitäts- und Produktionskontrollen sind grundlegende Funktionalitäten moderner Fertigungssysteme, die traditionell von Wissenschaftlern fast ausschließlich isoliert betrachtet werden. Neuste Forschungen und fortgeschrittene Industriepraktiken haben jedoch gezeigt, dass Qualitätskontrollen einen erheblichen Einfluss auf die Logistik haben, und dadurch eine isolierte Betrachtung überdacht werden muss. In einem CIRP-Keynote Paper [3] aus 2014 wurden diese Ursache-Wirkungs-Beziehungen gut charakterisiert, wobei auch der Maschinenvorschub und die daraus resultierenden Wartungsarbeiten im Gesamtbild berücksichtigt wurden. Ferner wurde die Notwendigkeit eines integrierten Ansatzes hervorgehoben, um gemeinsam auf Systemebene Instandhaltungs-, Qualitäts- und Produktionskontrollstrategien zu optimieren, um lokale Verbesserungen zu vermeiden, die geringfügige oder sogar schädliche Auswirkungen auf Systemebene haben können. Im Einklang mit dieser Strategie ist das Ziel der ForZDM-System- und Steuerungsplattform, die gemeinsame Qualitäts- und Logistikkontrollpolitik auf Shop-Floor-Ebene zu optimieren, indem Qualität, Produktionseffizienz und wirtschaftliche Aspekte in einem abgeschlossenen Rahmen integriert werden. Dieser High-Level-Controller analysiert die globale Kohärenz und die wirtschaftliche Machbarkeit der auf lokaler Ebene getroffenen Entscheidungen und kann als wirksames Instrument für strategische Entscheidungen dienen. Diese Plattform wird es ermöglichen, (i) die Richtlinien zur Reduzierung der Fehlerausbreitung, (ii) die Richtlinien für die Teileinspektion und (iii) die Richtlinien für den Teilefluss und die Bestandskontrolle auf Systemebene zu optimieren, bevor die Implementierung in das reale System auf Shop-Floor-Ebene erfolgt. Auf diese Weise werden lokale Optimierungen, die sich nachteilig auf Systemebene auswirken, vermieden. Die Plattform basiert auf einem Prozesskettenmodellierungs- und Analysetool [22]. Dabei wird die Dynamik des Materialflusses innerhalb des Systems, sowie die Ausbreitung von Produktvariationen über die Prozessschritte hinweg betrachtet und die relevanten Korrelationen zwischen Prozessvariablen, Maschinenzuständen und Produktqualitätsmerkmalen integriert, die mit Hilfe des Datenkorrelations-Tools und der Ursachenanalyse identifiziert wurden. Basierend auf den Daten, die aus dem Shop-Floor gesammelt und in der Datenmanagement-Plattform verfügbar sind, wird eine Anpassung der Strategien für die selektive Inspektion, das Fehlermanagement und die Teileflussteuerung und das spezifische Los in der Produktion wodurch die Betriebsbedingungen des Systems optimiert und gesteuert werden können ermöglicht, um das gewünschte Serviceniveau auf qualitativ hochwertige Produkte auch in der Kleinserienproduktion zu erreichen.

6.6 Implementierung

Das Kontrollsysteem muss verteilt und mehrstufig sein und eine Human-in-the-Loop-Integration ermöglichen, um die in den Abschnitten 4 und 5 beschriebenen Strategien zu realisieren. Die mehrstufige Architektur gliedert sich in drei hierarchische Ebenen: Low-Level-, Medium-Level- und High-Level-Steuerung. Die Low-Level-Steuerung nutzt die verfügbaren Sensordaten aus dem integrierten Prozessüberwachungssystem (Abschnitt 3), um eine einzelne Maschine oder einen Prozess in Echtzeit zu steuern. Die Regler beziehen ihre Sollwerte und Befehle von der Medium-Level-Steuerung oder dem zugehörigen HMI für die Eingabe des Maschinenbedieners. Das System ist auch dafür verantwortlich, relevante Informationen wie Maschinen- und Werkstückstatus, Warnmeldungen und Benutzerrückmeldungen an übergeordnete Steuerungen zu übermitteln, die für die Entscheidungsfindung zuständig sind.

Die Medium-Level-Steuerung ist verantwortlich für die Umsetzung der Strategien auf Systemebene (Abschnitt 4), um die Entstehung und Ausbreitung von Fehlern zu verhindern. Das System umfasst die verteilte Steuerung mehrerer Maschinen und Prozesse und die autonome Entscheidungsfindung, um in Echtzeit die Sollwerte und Befehle für die Low-Level-Steuerung einer einzelnen Maschine zu generieren, sowie ein umfassendes HMI für die Prozessingenieure zur Visualisierung der Ausführung von Steuerungsaktionen (SCADA). Darüber hinaus verfügt es über eine Offline-Komponente, die Simulationsfähigkeiten bietet und es den Ingenieuren ermöglicht, die Auswirkungen einer Strategie zur Fehlerbehebung im Voraus zu bestätigen.

Das High-Level-Steuerungssystem arbeitet offline, um langfristige Kontrollrichtlinien zu generieren. Es nutzt die Ergebnisse der Systemanalyse und Simulation (Abschnitt 5) sowie das maschinelle Lernen, um dem Produktionsleiter eine Reihe quantifizierter Vorschläge zur Prozessverbesserung zu unterbreiten. Entscheidungen, die auf dieser Ebene getroffen werden, werden dann in Sollwerte und Befehle übersetzt und an die Medium-Level- als auch Low-Level-Steuerung weitergeleitet. Die Echtzeitfähigkeit ist nicht erforderlich, kann aber genutzt werden, wenn ein Auftrag vom Produktions-MES/ERP-System oder über eine HMI/SCADA-Schnittstelle eingeht.

Innerhalb des verteilten mehrstufigen Steuerungssystems können Störungen bzw. fehlerhafte Daten durch Komponenten verschiedener Hersteller auftreten. Um diese Herausforderung zu meistern, muss eine detaillierte Fehlermöglichkeitsanalyse durchgeführt werden, die Unklarheiten beseitigt und eine geeignete Vermeidungsstrategie definiert. Dazu gehört die Anwendung von Sicherheitsfunktionen wie Selbsttest, Überwachung und hardwarebasierter Redundanz.

6.7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie bereits zu Beginn beschrieben, werden alle innerhalb des Projekts entwickelten Strategien, Tools sowie Methoden zur Defektcompensation als auch Defektvermeidung in den drei vorgestellten Demonstratoren eingesetzt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Kerngedanken von ForZDM sowie das allgemeine Vorhaben vorzustellen. Dabei wird Einblick in die Projekt-Architektur gegeben und die innovativen Ansätze von ForZDM für die moderne Fertigungsindustrie geliefert. Auf Basis geeigneter industrieller 4.0-Technologien wird das Projekt in verschiedenen industriellen Szenarien eine neuartige Lösung demonstrieren, die aktuelle Einzelprozessgrenzen in Richtung einer Produktionslinienperspektive erweitert.

Danksagung

Dieses Projekt wird im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Finanzhilfevereinbarung Nr. 723698 gefördert. Dieses Dokument gibt nur die Meinung des Autors wieder und die Kommission ist nicht verantwortlich für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen.

6.8 Literatur

- [1] Myklebust, O.: Zero Defect Manufacturing: A Product and Plant Oriented Lifecycle Approach. *Procedia CIRP*; 2013. pp. 246-251
- [2] Coupek, D.; Verl, A.; Aichele, J.; Colledani M.: Proactive quality control system for defect reduction in the production of electric drives. *2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*; 2013. pp. 1-6
- [3] Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A.; Iung, B.; Lanza, G.; Schmitt, R.; Váncza, J.: Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2); 2014. pp. 773-796
- [4] Spieser, A.; Ivanov, A.: Recent developments and research challenges in electrochemical micromachining (μ ECM). *Int J Adv Manuf Technol* (1-4); 2013. pp. 563-581
- [5] Di Angelantonio, E.; Fiorelli, M.; Toni, D.; Sacchetti, M.L.; Lorenzano, S.; Falcou, A.; Ciarla, M.V.; Suppa, M.; Bonanni, L.; Bertazzoni, G.; Aguglia, F.; Argentino, C.: Prognostic significance of admission levels of troponin I in patients with acute ischaemic stroke. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry* (1); 2005. pp. 76-81
- [6] Perera, C.; Jayaraman, P.P.; Zaslavsky, A.; Georgakopoulos, D.; Christen, P.: Sensor discovery and configuration framework for the Internet of Things paradigm. pp. 94-99
- [7] Ji, C.; Shao, Q.; Sun, J.; Liu, S.; Pan, L.; Wu, L.; Yang, C.: Device Data Ingestion for Industrial Big Data Platforms with a Case Study. *Sensors (Basel, Switzerland)* (3); 2016. p. 279
- [8] Cecilio, J.; Martins, P.; Costa, J.; Furtado, P.: A configurable middleware for processing in heterogeneous industrial intelligent sensors. pp. 145-150
- [9] Gurgen, L.; Roncancio, C.; Labbé, C.; Bottaro, A.; Olive, V.: SSStreaMWare. p. 121
- [10] Khaleghi, B.; Khamis, A.; Karray, F.O.; Razavi, S.N.: Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art. *Information Fusion* (1); 2013. pp. 28-44
- [11] Soderland, S.: Learning information extraction rules for semi-structured and free text. *Machine Learning* (1/3); 1999. pp. 233-272
- [12] ISA - International Society of Automation *ISA-95.00.03-2013 Enterprise-Control System Integration, Part 3: Models of Manufacturing Operations Management*
- [13] Chien, C.-F.; Wang, W.-C.; Cheng, J.-C.: Data mining for yield enhancement in semiconductor manufacturing and an empirical study. *Expert Systems with Applications* (1); 2007. pp. 192-198
- [14] Zhou, Y.; Fenton, N.; Neil, M.: Bayesian network approach to multinomial parameter learning using data and expert judgments. *International Journal of Approximate Reasoning* (5); 2014. pp. 1252-1268
- [15] Zuo, X.; Li, B.; Yang, J.: Error sensitivity analysis and precision distribution for multi-operation machining processes based on error propagation model. *Int J Adv Manuf Technol* (1-4); 2016. pp. 269-280
- [16] Bae, S.J.; Yuan, T.; Ning, S.; Kuo, W.: A Bayesian approach to modeling two-phase degradation using change-point regression. *Reliability Engineering & System Safety*; 2015. pp. 66-74
- [17] Teti, R.; Jemielniak, K.; O'Donnell, G.; Dornfeld, D.: Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2); 2010. pp. 717-739

- [18] Coupek, D.; Gülec, A.; Lechler, A.; Verl, A.: Selective rotor Assembly Using Fuzzy Logic in the Production of Electric Drives. *Procedia CIRP*; 2015. pp. 550-555
- [19] Colledani, M.; Yemane, A.; Coupek, D.; Lechler, A.: Quality-oriented Design of Rotor Assembly Strategies for Electric Drive Production Systems. *Procedia CIRP*; 2015. pp. 141-146
- [20] Colledani, M.; Coupek, D.; Verl, A.; Aichele, J.; Yemane, A.: Design and Evaluation of In-line Product Repair Strategies for Defect Reduction in the Production of Electric Drives. *Procedia CIRP*; 2014. pp. 159-164
- [21] Coupek, D.; Verl, A.; Lechler, A.; Aichele, J.; Junker, S.: Defect reduction in the production of electric drives by downstream compensation and space-resolved inspection. *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. pp. 1-8
- [22] Colledani, M.; Tolio, T.: Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines. *CIRP Annals* (1); 2012. pp. 455-458

7 Präzise gestenbasierte Roboterprogrammierung

O. Heimann, J. Hügle und J. Krüger, IPK, TU Berlin

7.1 Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt die aktuellen Arbeiten und Ergebnisse bei der Entwicklung eines Systems zur intuitiven gestenbasierten Programmierung von Industrierobotern. Durch allgemeines Wissen über den zu programmierenden Prozess kann die Roboterbahn präzise, durch einfaches Zeigen mit der Fingerspitze, erstellt werden. Das System wird anhand des robotergestützten Laserschweißens als Beispielprozess erläutert und evaluiert.

7.2 Einführung

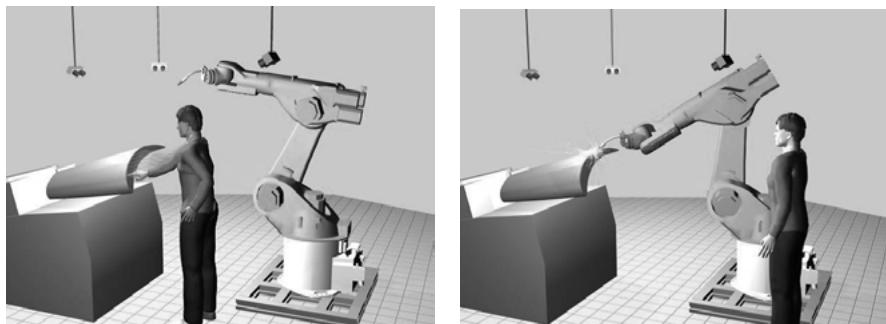


Abbildung 1: Veranschaulichung des Programmierprozesses

Die zunehmende Anzahl an Veröffentlichungen und Tagungen zum Thema Mensch-Roboter-Kollaboration zeigt, dass der Mensch immer noch eine zentrale Rolle in der Produktion einnimmt [1]. Ein Grund hierfür sind die sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten des Menschen, welche die notwendige Flexibilität für kleine Losgrößen garantieren [2]. Während die Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz und der Robotik einige vielversprechende Ansätze aufzeigen, ist davon auszugehen, dass der Mensch auch in den kommenden Jahren seine zentrale Rolle in der Fertigung beibehält [3]. Dennoch stellen Robotersysteme heute eine Möglichkeit dar, Aufgaben welche vormals ausschließlich dem Menschen überlassen wurden, zu automatisieren. Die erwünschte Flexibilität und die dafür notwendige Programmierleistung werden dabei durch Experten sichergestellt. Die mit dem Einsatz dieser Experten verbundenen Kosten sowie der Zeitaufwand für die Programmierung stellen jedoch insbesondere für kleinere Unternehmen eine Hürde dar. Für sie muss ein System schnell und ohne Programmierexpertise von den vorhandenen Facharbeitern bedienbar sein, um einen Mehrwert zu liefern.

Die Roboterprogrammierung erfolgt heute noch zu großen Teilen durch zeitaufwändiges Teach-In oder Offline Programmierung. Durch die steigende Verfügbarkeit von billigen und verlässlichen Sensoren erfreut sich das sogenannte „Programming by Demonstration“ steigender Beliebtheit. Hierbei wird der Roboter durch das Vorführen der erwünschten Bewegung programmiert. Dies geschieht beispielsweise durch taktiles, kraftgesteuertes Führen des Roboterarms entlang der gewünschten Trajektorie. Die derart erlernte Bahn wird anschließend abgespielt. Andere Modalitäten zur Roboterprogrammierung sind derzeit hauptsächlich ein Gegenstand der Forschung. Hierzu zählt unter anderem die Kommunikation mittels Sprache. Sprachgestützte Programmierung liefert in

Laborumgebungen bei einfachen Operationen mit bekannten Objekten bereits vielversprechende Ergebnisse. Bei der Beschreibung von aufwändigeren Trajektorien stößt das komplexe Sprachverständnis jedoch noch an seine Grenzen [4]. Dank der Möglichkeit sowohl Posen als auch Trajektorien über Gesten darzustellen, steht daher die gestenbasierte Interaktion seit längerem im Interesse der Forschung. Lambrecht et al. kombinieren die Gesteneingabe mit Augmented Reality über ein Tablet. Dabei kommt die 2D Information der Kamera im Tablet sowie die Microsoft Kinect als zusätzlicher Tiefensensor zum Einsatz. Die so erreichte Präzision der Gestenerkennung reicht für einfache Pick and Place Operationen, jedoch nicht für komplexe und hochpräzise Fertigungsaufgaben. Dass Gestenerkennung auch ohne Tiefeinformation funktionieren kann, zeigen unter anderem Manigandan et al. [5] in einer Implementation für mobile Roboter. Neverova et al. [6] nähert sich dem Problem der Mensch-Maschine Interaktion über neuronale Netze. Dazu trainieren sie mittels Deep-Learning ein Netz zur Gestenerkennung und Lokalisation. Weitere Ansätze zur Gestenerkennung basieren auf GPS und Beschleunigungssensoren, aktiven und passiven Handschuhen, Ganzkörperanzügen sowie Marker basierten Ansätzen [7], [8].

Die nachfolgenden Kapitel stellen einen Ansatz zur gestenbasierten Programmierung in der Fertigungstechnik vor. Hierzu wird vorhandenes Prozesswissen mit der erfassten Geste und einer Objekterkennung kombiniert, um die Präzision der Eingabe zu verbessern. Als Beispielszenario dient dabei ein einfacher Schweißprozess, welcher hohe Anforderungen an die Präzision der Eingabe stellt.

7.3 Problemstellung

Die Eigenheiten des Schweißprozesses stellen eine Reihe von Herausforderungen an eine sensorbasierte und interaktive Programmierumgebung. An erster Stelle steht dabei die erforderliche Präzision mit der die Schweißbahn programmiert werden muss. Neben Fehlern durch mangelnde Auflösung lassen sich zwei weitere hauptsächliche Fehlerquellen, ausgehend vor der Idee der gestenbasierten Programmierung, identifizieren. Zum einen kommt zu Fehlern bedingt durch Parallaxe, zum anderen ist die Definition der Fingerspitze nicht ausreichend präzise und eindeutig. Weiterhin ergibt sich die Anforderung robust mit schwanken Lichtverhältnissen und Verdeckungen umgehen zu können. Aus der Idee, eine Objekterkennung in den Programmierprozess einzubeziehen, ergibt sich zudem der Bedarf, die reflektierenden metallischen Bauteile erkennen und mit hinreichender Genauigkeit auflösen zu können. Schlussendlich stellt sich die Frage, wie das Prozesswissen einheitlich dargestellt und für die Verwendung im Programmierprozess aufbereitet werden kann.

7.4 Methodik

Der zentrale Lösungsansatz ist der Einbezug von allgemeinem Wissen über den zu programmierenden Prozess in die Gestensteuerung. Im spezifischen Fall des Schweißens ist bekannt, dass die Schweißnaht zwischen zwei aneinander liegenden Bauteilen liegen muss. Ausgestattet mit diesem Hintergrundwissen kann die Benutzereingabe anschließend gezielt interpretiert werden. Dazu werden die Gesteninformationen mit den statischen und deutlich genaueren Kanteninformationen verrechnet. Als Resultat werden die Gesten immer den naheliegenden Kanten zugeordnet, so dass eine präzise Eingabe erfolgt. Dieses Kapitel beschreibt den Prozess der Datenfusion.

Die Grundlage für die Datenfusion sind die Konturen des Werkstücks. Hierzu wird in einem ersten Schritt der leere Arbeitsplatz von den Kameras aufgenommen. Anschließend werden die Werkstücke auf dem Tisch platziert, und erneut Bilder der statischen Szene erfasst. Die Kameras bieten dabei eine Auflösung von 0.35mm je Pixel. In diesen hochauflösten Bildern wird nun mittels Hintergrundsubtraktion das eigentliche Werkstück freigestellt. In einem nächsten Schritt erfolgt nun eine Kantenfilterung mittels des Canny Algorithmus. Das derart ermittelte Abbild der Objektkonturen wird nun über den Hough-Algorithmus in Linienobjekte überführt, welche anschließend für die Programmierlogik zur Verfügung stehen.

Die große Herausforderung besteht in der Abstraktion der Prozessbeschreibung, so dass die Methodik auf komplexere Geometrien und später auf andere Prozesse angewandt werden kann. Die grundlegende Idee besteht darin, dass Prozesswissen als ein Satz von Regeln zu erfassen, welcher die im Modell hinterlegten Daten interpretiert. Das Modell speist sich dabei aus den Informationen der Kameras genauso wie aus unterschiedlichen Prozessdatenbanken. Beispiele für dieses Modell sind Lage und Form des Bauteils oder anderer Objekte im Arbeitsraum aber auch Geschwindigkeiten und Laserleistung für verschiedene Materialkombinationen.

Die Prozessbeschreibung gibt nun zuerst eine Regel vor, auf deren Grundlage aus den vorhandenen geometrischen Informationen relevante Schweißnähte ausgewählt werden können.

$$\text{Schweißnaht}(a, b) = (\text{sindParallel}(a, b) \vee \text{sindKoaxial}(a, b)) \wedge \text{geringerAbstand}(a, b)$$

Die Auswertung dieser Regel reduziert die erkannten Konturen auf ein verbleibendes Set von Bahnen welches zwischen den Bauteilen liegt. Im Idealfall ist das verbleibende Set bereits die zu schweißende Bahn. In diesem Fall kann die Überführung in ein Roboterprogramm durch den Benutzer direkt angeordnet werden.

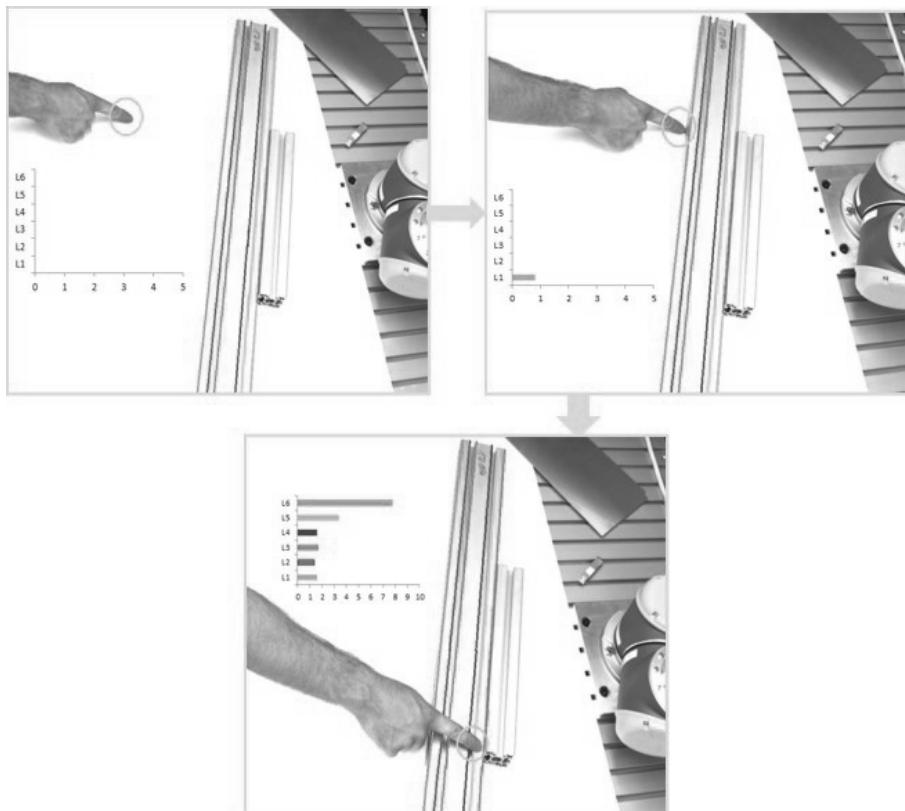


Abbildung 2: Identifizierung der Schweißkante anhand der gefundenen Positionen der Fingerspitze

In allen anderen Fällen werden die vorverarbeiteten Bahnen mittels der Gesteinsteuerung weiter eingeschränkt. Hierzu werden mittels Projektoren die verbleibenden Linien auf das Bauteil projiziert.

Anschließend zeigt der Nutzer entlang der vorgesehenen Schweißnaht. In jedem aufgenommenen Frame wird dabei die Fingerspitze detektiert. Dazu wird zunächst über den Farnton der Haut die Handkontur aus dem Bild extrahiert. Anschließend erfolgt eine Detektion aller Defekte in dem resultierenden Objekt. Die Fingerspitze wird anschließend identifiziert, indem nach einem Defekt mit einem spezifischen Winkel gesucht wird. Die Position der Fingerspitze wird anschließend mit den erkannten Kanten verrechnet. Hierzu wird zunächst der Abstand zu jeder Linie berechnet. Anschließend wird der nächstliegende Bahnpunkt markiert, sofern er einen Maximalabstand zur Linie unterschreitet. Um Ausreißer und Fehldetektionen zu vermeiden, wird ein Linienelement zudem erst ausgewählt, wenn mindestens 3 nahe beieinanderliegende Punkte der Linie zugeordnet wurden. So wird verhindert, dass beim kurzzeitigen Kreuzen einer Linie sofort ein Stützpunkt für die Roboterbahn erzeugt wird. Die ausgewählten Linienelemente werden direkt auf dem Bauteil umgefärbt und geben dem Benutzer eine direkte Rückmeldung.

Nach Abschluss der Bahnprogrammierung übersetzt ein Postprozessor die geometrische Definition der Bahn in ein Roboterprogramm. Dazu werden zusätzliche Informationen über die notwendige Geschwindigkeit und Orientierung des Werkzeugs aus externen Prozessdatenbanken gelesen. Die Grundlage für die Parameterwahl ist das vorhandene Modellwissen, welches Materialtyp und Stärke bereitstellt. Das derart generierte Programm wird dann direkt auf den Roboter übertragen und dort abgespielt.

7.5 Versuchsaufbau

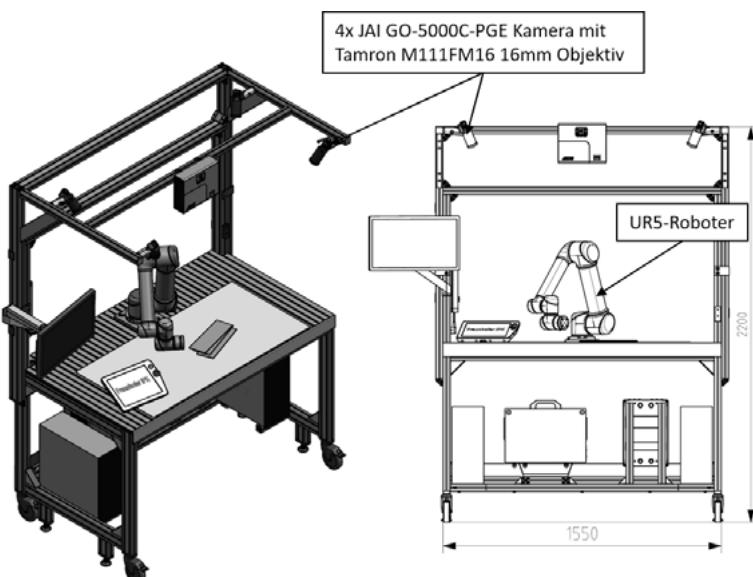


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Erprobung des Systems

Durch Vorschriften bezüglich der Lasersicherheit würde ein großer Entwicklungs- und Verwaltungs overhead zur Erprobung der Methodik des Laserschweißens entstehen. Um diesen Aufwand möglichst gering zu halten wurde, auf Kosten des realen Schweißprozesses, beim Versuchsaufbau auf einen Hochleistungslaser verzichtet. Ein handelsüblicher Kreuz-Laserpointer visualisiert die Robotertrajektorie.

Der Versuchsaufbau wurde aus Aluminiumprofilen konstruiert. Um die Methodik einfach bei unterschiedlichen Beleuchtungsumgebungen zu testen, wurde der Aufbau mobil gestaltet. In den vier oberen Ecken befindet sich jeweils eine 5 Megapixel Ethernet Kameras mit 16 mm C-Mount Objektiven. Zwei Projektoren sind zwischen den Kameras auf der linken und der rechten Seite angebracht. Auf dem Arbeitstisch wurde ein Universal Robot UR5 befestigt. Dieser Leichtbauroboter ist mit zusätzlichen Sicherheitsfeatures ausgerüstet, so dass eine sichere Mensch-Roboter-Interaktion möglich ist. Die vier Kameras, die zwei Projektoren und der Roboter sind zueinander kalibriert. Zukünftig wird der Roboter noch mit einem Lichtschnittsensor und einer Ausgleichsaktorik ausgestattet die einer Kante auf wenige Mikrometer genau verfolgen kann.

7.6 Resultate

Die einzelnen Module der präzisen gestenbasierten Roboterprogrammierung wurden implementiert und am Versuchsaufbau getestet. In diesem Kapitel werden kurz die Einzelmodule erläutert und auf die aktuellen Ergebnisse dieser eingegangen. Alle Programmmodulen wurden bisher nur qualitativ ausgewertet.

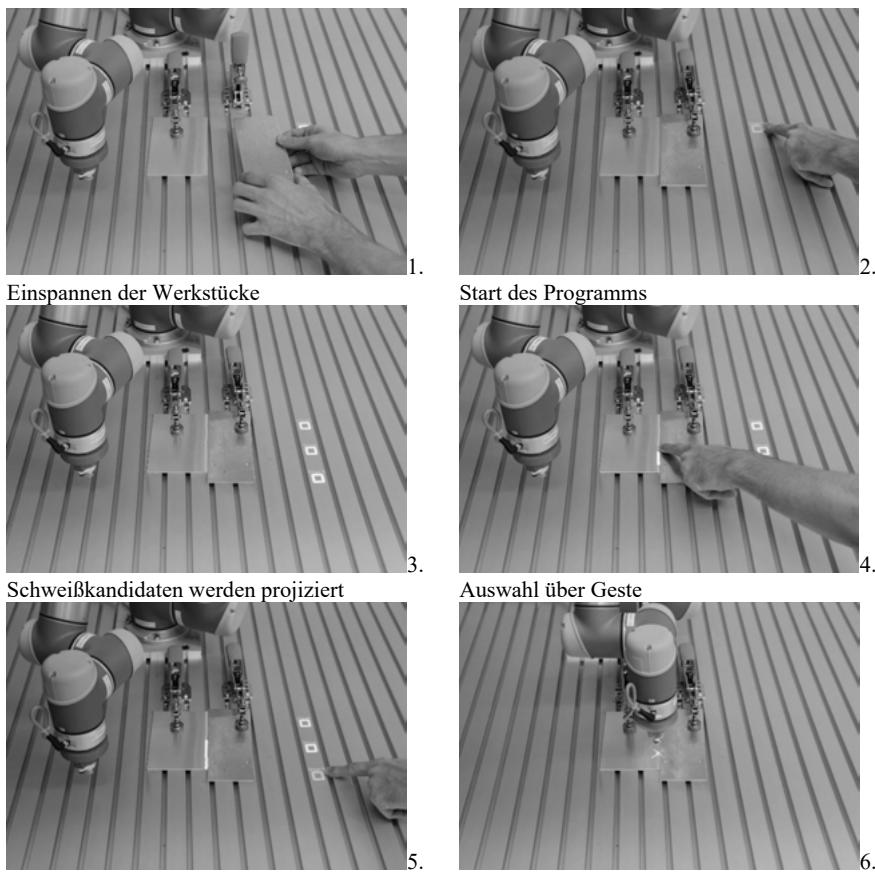


Abbildung 4: Programmierablauf beim Zusammenschweißen von zwei Blechen

Die Gestenerkennung ist vollständig implementiert und funktioniert bei guten Beleuchtungsverhältnissen robust. Bei ersten Versuchen am Versuchsaufbau wird die Fingerspitze bei nicht reflektierenden Teilen korrekt lokalisiert. Bei schlechten Beleuchtungsverhältnissen wie einzelnen starken Lichtquellen, zeigt die Realisierung des Ansatzes mit der Hintergrundextraktion aufgrund von stark ausgeprägten Schatten noch Schwächen. Selbiges gilt auch für hochreflektierende Bauteile, in denen die Hand, bzw. Teile der Hand, auf dem Objekt erkennbar sind.

Die Detektion aller potentiellen Schweißkanten mit Hilfe des Hough-Lines-Algorithmus befindet sich aktuell noch in der Erprobungsphase. Für Objekte mit wenigen weit auseinanderliegenden Kanten ist die Implementierung abgeschlossen. Bei Objekten mit vielen nahe aneinander liegenden parallelen Kanten werden diese teilweise noch zusammengefügt und als Einzelkante erkannt. Die Implementierung wurde so gestaltet, dass mit geringem Aufwand in Zukunft auch weitere Geometrien wie (Teil-)Kreise und Ellipsen detektiert werden können.

Der Auswahlprozess der Schweißkante mit Hilfe der Position der Fingerspitze wurde, wenn eine durchgehende Kante markiert werden soll, vollständig implementiert und getestet. Im oben genannten Fall, dass viele parallele Kanten auf einem Objekt erkennbar sind, wird häufig eine falsche Kante ausgewählt. Dieser Widerspruch kann mithilfe der Gesteneingabe korrigiert werden. Soll nur ein Teil einer Kante ausgewählt werden, erfolgt dies auch über die Geste. Hierzu gab es bisher jedoch noch keine Erprobung in realen Umgebungsbedingungen.

Über einen Projektor werden alle Kanten der Objekte am Bauteil hervorgehoben. Nach Auswahl der Schweißkante wird diese farblich hervorgehoben. Über projizierte Buttons kann die Programmierung gestartet, bei falscher Eingabe die Auswahl zurückgesetzt und die Programmierung abgeschlossen werden, was automatisch das Roboterprogramm generiert und startet. Zusätzlich kann das Programm mit Hilfe der Microsoft HoloLens simuliert werden. Dies befindet sich jedoch noch in der Implementierung und Erprobung und wurde noch nicht in das Gesamtszenario integriert.

Bei erfolgreicher Auswahl der korrekten Kante wird das Roboterprogramm automatisch erzeugt. Dies wurde am Versuchsaufbau mit dem UR5 Roboter getestet. Die Bahnen werden korrekt in ein Roboterprogramm überführt und können inklusive dem automatischen Schalten von Ausgängen für den Laserpointer abgefahren werden. Die einzige Einschränkung bei diesem Modul ist noch, dass die Orientierung des Laserpointers noch fest eingespielt ist und somit noch keine schräg liegenden Objekte korrekt entlang einer Kante abgefahren werden können.

7.7 Diskussion und Ausblick

Mit den aktuell vorliegenden Ergebnissen kann bereits ausgesagt werden, dass der gewählte Ansatz schnell, intuitiv und präzise bei einfachen Objekten wie Blechen ist. Die Implementierung der Gestendetektion mit Hilfe einer Hintergrundextraktion stellt eine der großen Herausforderungen dar. Wird diese noch robuster gegenüber Beleuchtung und Reflexionen gestaltet, kann der Finger als Werkzeug auch für weitaus komplexere Programmieraufgaben verwendet werden. Gerade bei mehreren nah aneinander liegenden Kanten wird der Auswahlprozess dadurch deutlich verbessert. Auch an Objekten mit vielen kurzen Kanten die die in beliebiger Orientierung räumlich nah zueinander liegen kann eine korrekte Auswahl getroffen werden.

Nach der Erweiterung der Erkennung von Objekt Geometrien auf Ellipsen und Kreise können die meisten gängigen Objektkanten erkannt und für die Generierung eines Roboterprogramms verwendet werden. Da dies nur einmalig vor Start der Programmierung geschieht, stellt auch der zusätzliche Rechenaufwand kein Problem dar. Die Genauigkeit des Gesamtkonzeptes beruht größtenteils auf den Ergebnissen dieser Detektion. Daher ist es essentiell sowohl die Kalibrierung der Kameras und des Roboters zueinander, als auch die Bildverarbeitung zur Erkennung aller potentiellen Kanten so präzise und robust wie möglich zu gestalten.

Die Visualisierung der Kanten und der Buttons auf der Arbeitstisch ist ein sehr hilfreiches Mittel, um die Programmierung intuitiv zu gestalten. Da direkt veranschaulicht wird welche Auswahl getroffen wurde und welche weiteren Kanten noch als Kandidaten in Frage kommen, weiß ein Nutzer jederzeit ob die Programmierung korrekt ist und ob das Programm so gestartet werden kann oder noch Änderungen von Nöten sind. In einigen Fällen verdeckt der Roboter oder der Nutzer selbst die Projektionen. Müsste ein Nutzer nun erst den Roboter in eine andere Position versprechen oder sich selbst anders positionieren, nimmt dies dem Gesamtkonzept einen Großteil der angestrebten Intuition. Um dies zu verhindern wird aktuell ein weiterer Projektor am Versuchsstand angebaut. Durch eine Mehrfachprojektion aller Objektkanten und Buttons kann verdeckungsfrei visualisiert werden.

Das Gesamtkonzept ist auch auf weitere Anwendungsszenarien übertragbar, die ebenso wie das Schweißen einer Kontur folgen. Denkbar ist hier eine Erweiterung auf das Entgraten von Bauteilen bei denen einzelne Grate ausgewählt und bearbeitet werden können. Zusätzlich ist es möglich den Ansatz der Gestenprogrammierung auf Montageprozesse anzupassen. Durch die Erkennung der Konturen kann präzise bestimmt werden, wo ein Bauteil liegt und dieses in eine entsprechende Form eingepasst werden.

Danksagung

Ein Teil der hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des BMBF Verbundprojektes „iLaP – Intelligente Laser- und Lichtbogensystem mit integriertem Prozesswissen und intuitiver Bedienung“ (Förderkennzeichen 03WKP51A4) durchgeführt.

7.8 Literaturverzeichnis

- [1] Tsarouchi, P.; Makris, S. und Chryssolouris G.: „Humanrobot interaction review and challenges on task planning and programming,“ *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 916-931, 2016
- [2] Jäger A.; Ranz, F.: „Industry 4.0: challenges for the human factor in future production scenarios,“ in *4th Conference on Learning Factories*, Stockholm, 2014
- [3] Kagermann, H.; Helbig, J.; Hellinger, A. und Wahlster W.: „Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry,“ *Forschungsunion*, 2013
- [4] Forbes, M.; Rao, R. P. N.; Zettlemoyer, L. und Cakmak M.: „Robot programming by demonstration with situated spatial language understanding,“ in *International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, 2015
- [5] Manigandan, M.; Jackin, I.: „Wireless vision based mobile robot control using hand gesture recognition through perceptual color space,“ in *International Conference on Advances in Computer Engineering*, 2010
- [6] Neverova, N.; Wolf, C.; Taylor, G.; Nebout, F.: „Moddrop: Adaptive multi-modal gesture recognition,“ in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 38, 2016
- [7] Mitra, S.; Acharya, T.: „Gesture recognition: A survey,“ *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 311-324, 2007
- [8] Escalera, S.; Athitsos, V.; Guyon, I.: „Challenges in multimodal gesture recognition,“ *Journal of Machine Learning Research*, vol. 17, pp. 1-54, 2016

8 Dienstbasierte Planung kollaborativer Montageprozesse

S. Storms, W. Herfs, WZL, RWTH Aachen

8.1 Einleitung

Die industrielle Montage steht maßgeblich vor zwei Herausforderungen. Zum einen die zunehmenden Variantenvielfalt als Resultat einer immer stärkeren Kundenorientierung und zum andern daraus resultierende, immer kürzer werdende Produktlebenszyklen [1]. Dem widerspricht in weiten Teilen der Produktion, dass der Trend hin zur Vollautomatisierung fortschreitet. Dies führt dazu, dass die kundenindividuell konfigurierten Baugruppen mangels Standardisierungsmaßnahmen meist manuell montiert werden müssen. Die manuelle Montage ist aufgrund der hohen Lohnkosten in Deutschland mit wirtschaftlichen Nachteilen für betroffene Unternehmen verbunden. Die lohnkostenneutrale Automatisierung von Montageprozessen ist allerdings nicht nur mit technischen Herausforderungen aufgrund der zu bewältigenden Produktvarianten behaftet, sondern birgt auch Investitionsrisiken. Die Anschaffungskosten verbunden mit der Unsicherheit über die Prozessfähigkeit des Montagesystems bergen die Gefahr einer Fehlinvestition. Dieses Risiko hindert insbesondere kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) an der Automatisierung von Montageprozessen.

Eine Lösung zur Vereinbarkeit von Automatisierung und Produktvariantenvielfalt könnte der Einsatz kollaborativer Montagesysteme sein. Bei der kollaborativen Montage arbeiten Mensch und Maschine gemeinsam an der zu montierenden Baugruppe und unterstützen sich gegenseitig. Hierbei sollen die Fähigkeiten des Menschen und die Fähigkeiten der Maschine optimal kombiniert und Nachteile kompensiert werden. Der Monteur bringt seine kognitive und fein-motorische Überlegenheit ein, wohingegen ein Montageroboter ermüdende, beschwerliche und repetitive Tätigkeiten mit hoher Präzision ausführt. Als Ergebnis können standardisierte Teilschritte der Montage automatisiert werden, wohingegen technisch herausfordernde Teilschritte weiterhin vom Monteur bewältigt werden. So können trotz der Produktvariantenvielfalt automatische Systeme implementiert werden. Diese Kombination erlaubt optimaler Weise auch die Skalierung des Automatisierungsgrades bei der kollaborativen Montage und entschärft damit das Risiko einer Fehlinvestition.

Vor diesem Hintergrund wurde am WZL der RWTH Aachen das Projekt „Konsolidierung von Lebenszyklusinformationen für die kollaborative Montage variantenreicher Produkte“ (KoKoMo) initiiert. Im Rahmen von KoKoMo sollen Ansätze zur kollaborativen Montage erforscht werden, explizit auch in Hinblick auf KMU. Während bei der unabhängigen Montage heutzutage rechnergestützte Systeme zur Produkt- und Produktionsplanung regelmäßig genutzt werden, mangelt es für die Durchführung einer kollaborativen Montage bereits an einer passenden Planungssoftware (Arbeits- und Terminplanung). Für die Entwicklung einer solchen Planungssoftware muss im Hinblick auf die Arbeitsplanung feststehen, wie eine sinnvolle Prozessaufteilung zwischen Mensch und Maschine gestaltet werden kann. Ein Teil des Projektes beinhaltet daher die fähigkeitsorientierte Analyse der Montagesysteme und -prozesse. Diese Analyse soll eine Klassifizierung der Montageressourcen hinsichtlich ihres Potenzials für die Montagevorgänge ermöglichen.

Im folgenden Beitrag wird nach dem Stand der Technik in Bezug auf Modelle und Modellierungssprachen in der Montage, der Automatisierbarkeit der Montage und dem potentiellen Lösungsansatz der kollaborativen Montage beispielhaft das Vorgehen für eine Dienstbasierte Planung kollaborativer Prozesse beschrieben. Dabei wird in Kapitel 8.2.3 ein Konzept entwickelt, auf dessen Grundlage sowohl das Produkt, als auch das für die Produktion notwendige Betriebsmittel (Produktionsanlage) modelliert werden kann. In Kapitel 8.4 wird die für eine automatisierte Planung entwickelte Software vorgestellt.

8.2 Stand der Technik

Als Grundlage der Forschung wird nachfolgend der Stand der Technik in den für die Entwicklung der Planungssoftware relevanten Bereichen vorgestellt. Da für die Entwicklung der Planungssoftware auf bestehende Modelle zurückgegriffen wird, werden Modelle in der Montage beleuchtet.

Zum besseren Verständnis der industriellen Montage, sowohl der allgemeinen als auch der kollaborativen, wird sich ein Kapitel mit eben jener beschäftigen. Hier werden auch bisherige Ansätze zur fähigkeitsorientierten Analyse bzw. zu ähnlichen Verfahren aufgezeigt. Abschließend wird der Stand der Technik in Bezug auf die Automatisierbarkeit von Montageaufgaben aufbereitet.

8.2.1 Modelle in der Montage

In der allgemeinen Modelltheorie nach [2] besitzt ein Modell drei Hauptmerkmale:

- Das *Abbildungsmerkmal*: Modelle sind stets Abbildungen eines Originals.
- Das *Verkürzungsmerkmal*: Modelle bilden ausschließlich Attribute ab, die dem Erschaffer oder Benutzer relevant erscheinen.
- Das *pragmatische Merkmal*: Modelle gelten immer für einen bestimmten Personenkreis zu einem bestimmten Zweck innerhalb eines gewissen Zeitrahmens.

Aus den Merkmalen eines Modells folgt dementsprechend, dass es zu jedem Original viele Modelle geben kann [3].

Zur Modellierung einer Montage kommt eine Reihe von Modellen in Frage. Zunächst soll zwischen der Modellierung der Montageaufbaustruktur und der Modellierung der Montageablaufstruktur differenziert werden. Die Aufbaustruktur beschäftigt sich mit der allgemeinen Zusammensetzung eines Erzeugnisses. Die Montageablaufstruktur hingegen konkretisiert die Modellierung hinsichtlich der zeitlichen Abfolge der Teilaufgaben und ihrer logischen Struktur innerhalb der Montage [4]. Nachfolgend soll der Fokus auf der Modellierung des Montageablaufs liegen.

In der Praxis hat sich seit langem der Vorranggraph zur Modellierung des Montageablaufs bewährt. Der Vorranggraph zerlegt die Montage in Teilvorgänge gemäß folgenden Regeln:

- Teilvorgänge werden als Knoten, Abhängigkeiten als gerichtete Kanten dargestellt.
- Es kann mehrere Start- und Endknoten geben. Sind Knoten nicht verbunden, sind sie unabhängig.
- Ein Teilvorgang, der in Abhängigkeit zu einem oder mehreren Teilvorgängen steht, kann erst nach Abschluss der Vorgänger ausgeführt werden. [5]

8.2.2 Automatisierbarkeit und fähigkeitsorientierte Analyse

Ein Aspekt bei der Wahl eines Montagesystems ist die Automatisierbarkeit der Aufgabe. Wie bereits beschrieben sind automatisierte Lösungen mit hohen Investitionskosten verbunden. Daher gibt es Bemühungen, u. a. die Automatisierbarkeit einer Aufgabe im Vorfeld zu determinieren [6]. Einen wesentlichen Einfluss auf die Automatisierbarkeit bei der Montage hat die Konstruktion. [7]

Eine Möglichkeit dieses Dilemma zu lösen basiert auf der Simulation der Prozesse, jedoch stößt diese bei komplexen Fügeoperationen schnell an ihre Grenzen [7]. In der Literatur gibt es unterschiedliche Ansätze, welche sich aus einer Klassifizierung der Montagevorgänge ergeben [8]. In [9] wird eine Reihe von Fragen vorgestellt, auf dessen Grundlage entschieden werden soll, ob eine automatisierte Montage möglich ist. Wie diese Fragen genau zu beantworten sind, wird nicht beschrieben. Die nachfolgenden Lösungsansätze sind teilweise nur qualitativer Natur. [10] bleibt in diesem Punkt

ebenfalls qualitativ, bindet aber die Möglichkeit der konstruktiven Änderung in den Entscheidungsprozess ein. [11] versucht die Automatisierung durch die Einführung einer Komplexitätszahl und einer Flexibilitätszahl zu quantifizieren. Auch dieses Verfahren benötigt ein gewisses Hintergrundwissen zur Durchführung. [12] legt einen Schwerpunkt explizit auf die Entwicklung einer quantitativen Methode zur Bestimmung der Automatisierbarkeit. Die Methode basiert auf einem vorher angelegten Kriterienkatalog, der abschließend eine Einschätzung ermöglichen soll. Nichtsdestotrotz kommt der Autor zu dem Schluss, dass auch bei diesem Verfahren Erfahrungswerte und Lernaufwand benötigt werden.

[13] entwickelt auf Grundlage eines Kriterienkatalogs zur Ermittlung der Automatisierbarkeit eine rechnergestützte Lösung, die jeweils einen Fähigkeitsindex für den Menschen und einen für die Maschine berechnet. Diese Indizes geben Auskunft, wer die Tätigkeit besser erfüllen kann. Es wird bei der Auswahl nicht nur der Kriterienkatalog für die Montageoperation berücksichtigt, sondern auch der wirtschaftliche Sinn einer Nutzung.

In [14] steht nicht die Automatisierbarkeit im Vordergrund. Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines allgemeinen Fähigkeitenmodells, um eine fähigkeitsbasierte Zuordnung zwischen Ressourcen und Aufgaben herzustellen. Als Grundlage für die Fähigkeiten der Ressourcen dienen die einschlägigen VDI- und DIN-Normen. Zu den Fähigkeiten der Ressourcen gibt es auf der Produktseite jeweilige Pendants, durch die eine spätere Verbindung von Ressourcen zu Aufgaben erfolgt.

8.2.3 Kollaborative Montage

In [15] werden die möglichen Arbeitsformen von Mensch und Maschine ganz allgemein in vier Klassen eingeteilt:

- Stopp bei Zutritt zum Kollaborationsraum
- Bewegung des Roboters durch Handführung mit reduzierter Geschwindigkeit
- Überwachte Trennung zwischen Mensch und Roboter bei reduzierter Geschwindigkeit
- Beschränkung der im Roboter gespeicherten Energie und vom Roboter ausgeübte Kraft

Im Gegensatz zu Kollaboration wird das Ziel der kooperativen Arbeit erst erreicht, sobald es keine zeitliche sowie keine örtliche Trennung zwischen Mensch und Maschine gibt [16].

In [17] wird bereits von einer hybriden Montage gesprochen, sofern innerhalb einer Montagestation sowohl Automaten als auch Menschen arbeiten. Diese interagieren jedoch nicht zwangsläufig. Da ein Merkmal der hybriden Montage die höhere Flexibilität im Vergleich zur klassischen vollautomatischen Montage ist, bietet sich der Einsatz von Robotern an. In [16] wird die Mensch-Roboter-Kooperation als „Austausch von Informationen und Handlungen zwischen Mensch und Roboter zur Ausführung einer Aufgabe“ definiert. Bei der kooperativen Montage als höchste Form muss eine Koordination zwischen Mensch und autonomer Maschine stattfinden, um die Montage erfolgreich durchführen zu können.

Ziel der hybriden Montage ist allgemein die Nutzung der Stärken von Robotern und Menschen bzw. der manuellen und automatischen Montage, um so Synergieeffekte zu erzielen. Das Investitionsrisiko einer hybriden Montage liegt dabei unterhalb des Risikos einer vollautomatischen Lösung [18, 19].

Die beschriebenen Grundlagen in Bezug auf die Modellierung in der Montage und der Automatisierbarkeit und fähigkeitsbasierte Analyse von Montageprozessen haben gezeigt, dass es kein dediziertes Vorgehen bei der Planung von kollaborativen Montageprozessen gibt. Daraus leitet sich für das weitere Vorgehen das Ziel ab, für potentielle Anwender eine Planungsunterstützung zu entwickeln, die auch eingesetzt werden kann, wenn kein vollumfängliches digitales Abbild der Produktion vorliegt.

8.3 Modellierung und semantische Beschreibung

Das nachfolgende Kapitel beschreibt exemplarisch die zugrundeliegende Modellierung der notwendigen Grundlagen für den Montageprozess. Als Abbild des zu fertigenden Produktes wird eine Produktbeschreibung vorgestellt. Den zweiten Teil bildet die Betriebsmittelbeschreibung. In Ergänzung zu den in [20] veröffentlichten Ansätzen, eine umfängliche Beschreibung respektive Modellierung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel anzufertigen, haben weitere Überlegungen dazu geführt, dass sich der Prozess ableiten lassen müsste. Wenn das Produkt also in seinem Zielzustand vollumfänglich beschrieben ist, lassen sich in Bezug auf das ausführende Betriebsmittel die notwendigen Prozessschritte ableiten.

8.3.1 Produktbeschreibung

Die Produktbeschreibung beginnt mit einer abstrakten Klasse namens Produkt, in der alle Variablen angegeben werden können, die für alle Produkte definiert werden müssen (vgl. Abbildung 1). Dazu gehören beispielsweise eine eCl@ss-Klassifizierung, die Kundennummer und die Auftragsnummer. Diese Attribute werden an die Klassen Produktgruppe und Produkt vererbt, wo sie spezifiziert werden. In der Klasse Produktgruppe können Attribute und Methoden implementiert werden, die speziell die Produktgruppe betreffen.

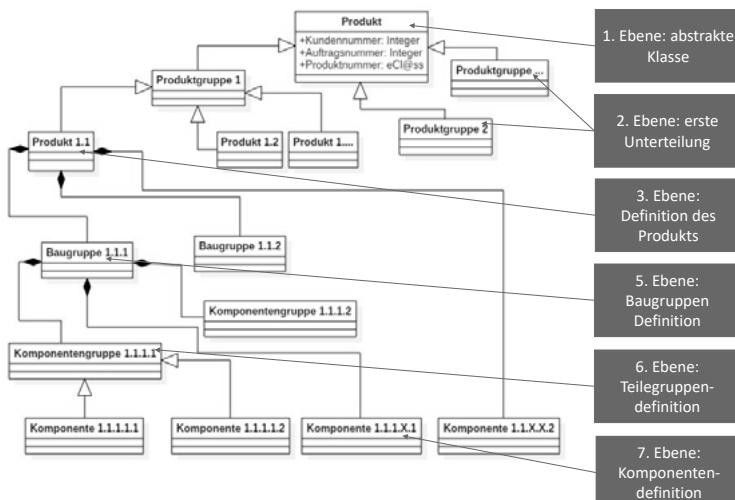


Abbildung 1: Exemplarische Produktbeschreibung

In dieser dritten Ebene wird das eigentliche Produkt definiert. Dies setzt voraus, dass neben den in den oberen Klassen definierten Merkmalen auch produktspezifische Werte zugeordnet werden müssen. In dieser Ebene wird über eine Komposition modelliert, dass weitere Bauteile zum Produkt gehören, aber das Produkt auch ohne diese Baugruppen oder Komponenten existieren kann. Diese Komponenten und Baugruppen werden in Klassen definiert. Bei Baugruppen, die die fünfte Ebene bilden, werden, wie beim Produkt, über eine Komposition oder Aggregation die einzelnen Bestandteile dargestellt. Dabei ist es nicht notwendig, dass sich Baugruppen nur aus Komponenten zusammensetzen können, sondern auch aus anderen Baugruppen entstehen können.

Für die Beschreibung der Komponenten können weitere Unterteilungen in Form von Ober- und Unterklassen gewählt werden, sodass Attribute nicht mehrfach definiert werden müssen. Diese hierarchische Gliederung kann bis auf die Normteilebene vorgenommen werden.

8.3.2 Betriebsmittelbeschreibung

Die Betriebsmittelbeschreibung weist in oberster Ebene ebenfalls eine abstrakte Klasse auf, in der zentrale Variablen und Eigenschaften eines Betriebsmittels definiert werden. Danach folgt eine Einordnung des Betriebsmittels in Gruppen mit definierten Merkmalen. Hier kann bei Bedarf eine weitere Gruppierungsebene für Betriebsmittel eingebaut werden. Aus Gründen der übersichtlichen Darstellung wird in Abbildung 2 nur eine Ebene zwischen der obersten Klasse Betriebsmittel und der konkreten Anlagendefinition genutzt.

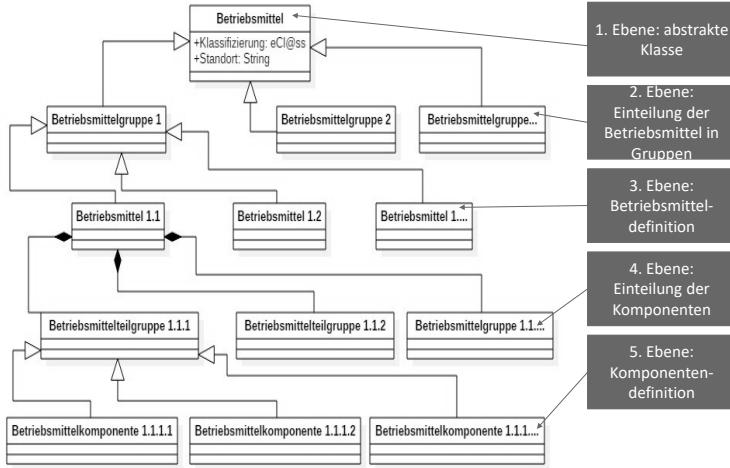


Abbildung 2: Exemplarische Betriebsmittelbeschreibung

In der 3. Ebene wird das Betriebsmittel mit allen seinen Variablen definiert. Hier besteht, wie bei der Produktbeschreibung, die Möglichkeit über Aggregation und/oder Komposition der einzelnen Komponenten den Betriebsmittelauflauf zu beschreiben. Über Aggregationen ist es möglich, optionale Bauelemente des Betriebsmittels zu beschreiben.

Die Komponenten können zusätzlich in weiteren Ebenen gruppiert werden. Da jedes Betriebsmittel anders aufgebaut ist und je nach Anwendungsfall die Anforderungen an die Beschreibungsstruktur unterschiedlich sind, können hier ebenfalls weitere Gliederungen vorgenommen werden.

8.4 Dienstbasierte Planung kollaborativer Montageprozesse

8.4.1 Problemstellung und Überführung in ein Optimierungsproblem

Aufbauend auf der Modellierung aus Kapitel 8.2.3 und auf der Methodik für die automatisierte Montageplanung (vgl. [21]) wird nachfolgend der gewählte Lösungsansatz für das Zuordnungsproblem beschrieben.

Bisherige Lösungen der Montageplanung sind durch sehr hohen manuellen Aufwand gekennzeichnet und basieren oft auf der Abarbeitung statischer Fragekataloge und Kennzahlberechnungen. Seltener sind die Systeme rechnergestützt. Die dadurch entstehenden Probleme sind neben einer mangelnden Flexibilität, der hohe Lernaufwand für den Bediener und die Subjektivität bei der Lösung der Planungsaufgaben. Der hier vorgestellte, neue Ansatz auf Grundlage von generischen Modellen (vgl.

Kapitel 8.2.3) greift auf Methoden des maschinellen Lernens zurück. Das Programm bestimmt neben der Aufteilung der Aufgaben eine optimale Durchlaufzeit für die zu fertigenden Produkte.

8.4.2 Mathematische Formulierung des Optimierungsproblems

Im ersten Schritt vor der Implementierung muss das Optimierungsproblem mathematisch formuliert werden. Bevor die einzelnen Gleichungen ausgeführt werden, müssen die zugehörigen Variablen, Konstanten und Indizes eingeführt werden.

An dieser Stelle soll lediglich ein Beispiel der Modellierung des Sachverhaltes gegeben werden, um einen Eindruck zu ermöglichen, wie jener aussieht. Zunächst werden die dafür notwendigen Variablen und Konstanten eingeführt:

$q_{j,k} = j \text{ wird vor } k \text{ bezogen auf die Baugruppe durchgeführt}$

$q^*_{j,k} = j \text{ wird direkt vor } k \text{ bezogen auf die Baugruppe durchgeführt}$

$Q_{j,k} = \text{Extern vorgegebene Reihenfolge; Aufgabe } j \text{ kommt vor Aufgabe } k$

$j, k, o, p = \text{Aufgabenindex}$

Im Folgenden sollen die Aufgabenreihenfolgevariablen $q_{j,k}$ und $q^*_{j,k}$ behandelt werden. $q_{j,k}$ gibt an, ob eine Aufgabe innerhalb einer Baugruppe lokal vor einer anderen Aufgabe derselben Baugruppe durchgeführt wird. Bei Aufgaben unterschiedlicher Baugruppen nimmt die Variable null an. Die Aufgabenvariable $q^*_{j,k}$ ist mit $q_{j,k}$ untrennbar verbunden, da sie angibt, ob eine Aufgabe einer Baugruppe direkt und unmittelbar vor einer anderen Aufgabe derselben Baugruppe ausgeführt wird.

Diese beiden Variablen müssen nun über nachfolgende Nebenbedingungen weiter eingegrenzt werden. Zum einen dürfen Aufgaben nicht auf sich selbst folgen, zum anderen muss die Anzahl der direkten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen gleich der Summe der Baugruppenaufgaben minus eins sein. Abbildung 3 zeigt diesen Zusammenhang.

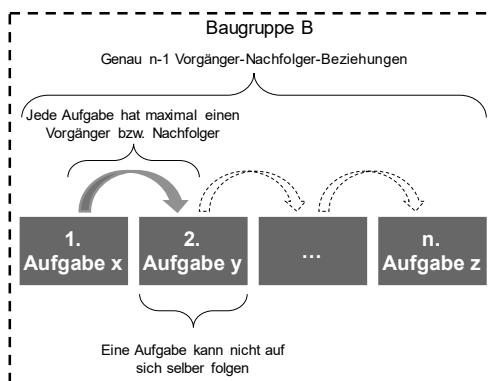


Abbildung 3: Zusammenhang direkte Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen

Für die „globale“ Reihenfolgevariable $q_{j,k}$ gilt, dass die Summe der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen gleich der Summe der auf jede mögliche Aufgabenposition folgenden Aufgabenanzahl sein muss (vgl. Abbildung 3).

Darüber hinaus gilt für die direkten Nachfolgebeziehungen, dass jede Aufgabe maximal einen Nachfolger und maximal einen Vorgänger haben darf. Über eine weitere Nebenbedingung zu $q_{j,k}$

werden externe Reihenfolgebedingungen $Q_{j,k}$ berücksichtigt. Zudem wird $q_{j,k}$ mit $q^*_{j,k}$ mit einer Ungleichung verknüpft, die besagt, dass wenn eine Aufgabe global nicht vorher ausgeführt wird, sie daher auch kein direkter Vorgänger sein kann.

$$q_{j,k} \geq Q_{j,k} \quad \forall j, k \neq j \quad (1)$$

$$q_{j,j} = 0 \quad \forall j \quad (2)$$

$$q^*_{j,j} = 0 \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_k q^*_{j,k} \leq 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_j q^*_{j,k} \leq 1 \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_{j,k} XK_{B,j} \cdot XK_{B,k} \cdot q^*_{j,k} = \sum_j (XK_{B,j}) - 1 \quad \forall B \quad (6)$$

$$q^*_{j,k} \leq q_{j,k} \quad \forall j, k \quad (7)$$

$$\sum_{b=0}^{\sum_j XK_{B,j}} b = \sum_{j,k} XK_{B,j} \cdot XK_{B,k} \cdot q_{j,k} \quad \forall B \quad (8)$$

Diese Beschreibung der Vorgänger-Nachfolgebeziehung stellt nur einen kleinen Teil der mathematischen Beschreibung der zugrundeliegenden Montageaufgabe dar. Im Gesamten besteht die mathematische Formulierung des Montageprozesses aus 43 Gleichungen, die die Grundlage für eine Optimierung bilden.

8.4.3 Datenvorverarbeitung und Implementierung

Die Daten und Modellinformationen sind in ihrer Form nicht direkt für die Optimierungskomponente geeignet. Daher werden sie zuvor in ein passendes Objekt überführt und dann übergeben. Das hat zudem den Vorteil, dass die Daten unabhängig vom Original sind. Andernfalls könnten spätere Änderungen bei der Modellierung den laufenden Optimierungsprozess nachträglich beeinflussen, sofern die Optimierung parallel abläuft. Bevor die Daten dann als Konstanten im Optimierungsmodell verwendet werden können, müssen sie weiter aufbereitet werden. In der Aufbereitung selbst stecken kleinere Optimierungsprobleme. Zum Beispiel müssen für die Transportzeiten die kürzesten Wege zwischen jedem Arbeitsplatz ermittelt werden. Diese werden in der Modellierung nur jeweils zwischen zwei Plätzen angeben. Die Implementierung des Optimierungsproblems erfolgt nahe an dem mathematischen Modell. Es können jedoch Summen und Aufzählungen nicht wie im Modell angegeben werden. Stattdessen werden die Variablen und Restriktionen einzeln über iterative Schleifen zum Modell hinzugefügt.

8.4.4 Benutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle stellt die Schnittstelle zwischen Mensch und Software dar. Ihre wichtigsten Aufgaben sind das Erfassen von Daten und das Aufbereiten sowie Darstellen von Daten.

Ein wichtiger Vorteil der rechnergestützten Lösung ist die Möglichkeit graphischer, animierter und dynamischer Darstellungen. Durch die graphische Darstellung können Sachverhalte übersichtlicher, interaktiver und intuitiver vermittelt werden. Diese Vorteile sollen sowohl für das Erfassen als auch für das Aufbereiten und Darstellen der Daten genutzt werden. Deshalb wird als Benutzerschnittstelle eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt.

Einen wichtigen Einfluss auf den Aufbau der Benutzerschnittstelle hat der typische Arbeitsablauf. Die Optimierung und Ausgabe des Prozessplans muss in dem Arbeitsablauf als letztes eingereiht werden. Dies ist damit begründet, dass die Optimierung auf den zuvor erfassten Daten beruht. Der Prozessplan kann erst nach der erfolgreichen Optimierung erstellt werden. Die anderen Ablaufpunkte haben zunächst keine feste Reihenfolge (vgl. Abbildung 4).

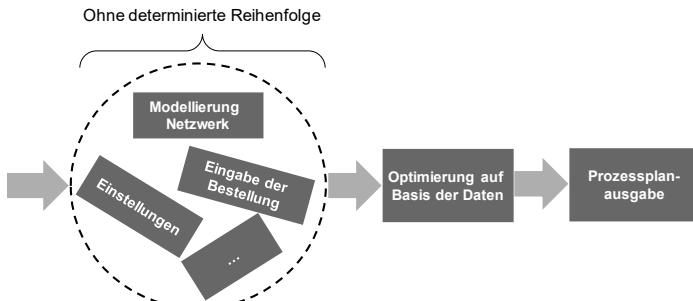


Abbildung 4: Positionierung der Optimierung und Prozessplanausgabe in den Arbeitsablauf

Zu klären bleibt nun, wie die einzelnen Menüs in der Benutzerschnittstelle verknüpft werden können, da sie nicht über einen vorgegebenen Arbeitsablauf geordnet sind. Um unnötige Menütiefen zu vermeiden, sollte als Ausgangspunkt eine Komponente gewählt werden, von der aus die anderen Komponenten mit möglichst wenigen, aber sinnvollen, Schritten erreicht werden können. Hier wird die Modellierung des Netzwerks als vorteilhafteste Komponente identifiziert. Von ihr aus können über die modellierten Netzwerkelemente intuitive Verbindungen zu den anderen Komponenten direkt hergestellt werden. Die Netzwerkelemente sind durch die Konzeption des Planungsmoduls vorgegeben. Die Architektur ist in Abbildung 5 dargestellt.

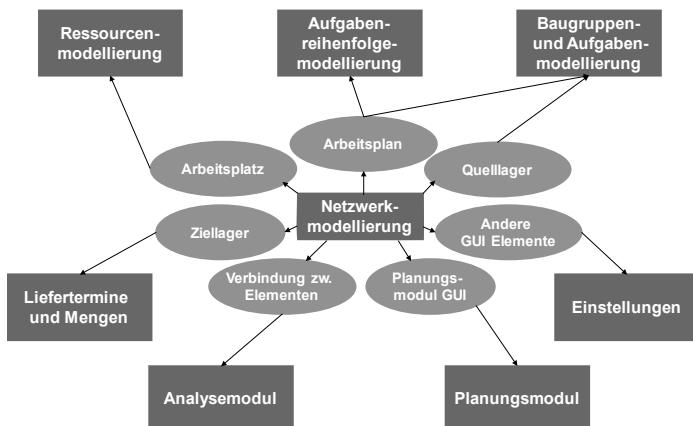


Abbildung 5: Architektur der Planungs- und Optimierungssoftware

Abschließend muss die Erfassung und Darstellung der Daten geklärt werden. Für die Komponente der Netzwerkmodellierung bietet sich eine Darstellung als gerichteter Graph an. Die Grundlage ist also ein Graph mit Knoten und gerichteten Kanten. Diese sollte in der Software mit intuitiven Symbolen ergänzt werden. Die Modellierung der Aufgaben und Ressourcen beschränkt sich auf den Namen, zur besseren Reidentifizierbarkeit durch den Benutzer, und die Auswahl der zugehörigen Eigenschaften bzw. Anforderungen. Dies kann z. B. durch ein einfaches Formular mit einer Eingabemaske und einem Auswahlbaumdiagramm gelöst werden. Die Bestellmengen und Liefertermine bedürfen ebenso keiner komplexeren Darstellung und können deshalb ebenso durch ein Formular abgefragt werden. Die Zuordnung bzw. die Überprüfung der Zuordnung von Ressourcen und Aufgaben kann durch eine einfache Matrix dargestellt werden.

Das Ergebnis dieser grundlegenden Überlegungen in Bezug auf die hinterlagerte Softwarearchitektur und den Aufbau der Benutzerschnittstelle ist in Abbildung 6 dargestellt.

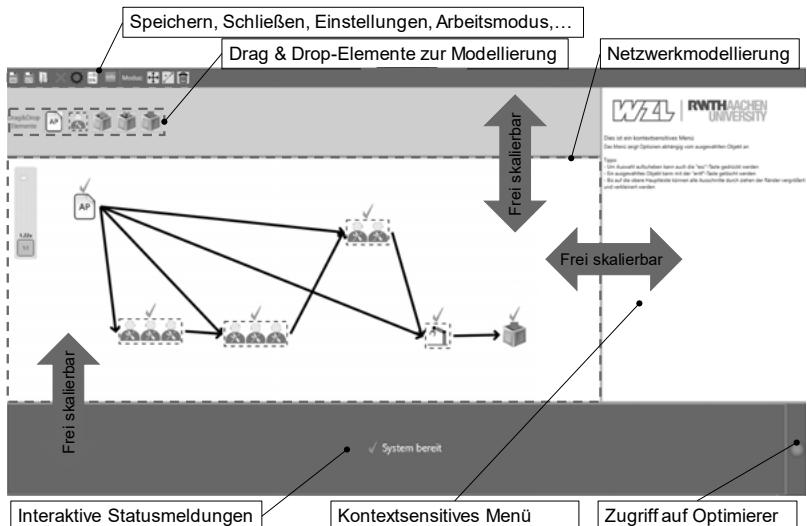


Abbildung 6: Implementierte Benutzerschnittstelle

8.4.5 Ausgabe eines optimierten Prozessplans

Über die Benutzerschnittstelle hat der Anwender die Möglichkeit, die hinterlegten Modelle von Produkt und Betriebsmittel mit Informationen zu füllen. Dabei werden für die Betriebsmittel (inklusive Montagemitarbeiter) auch einzelne oder mehrere Fähigkeiten definiert. Diese Informationen bilden die Grundlage für die nachgelagerte Auf- und Verteilung der jeweilig resultierenden Prozesse. Vor dem Durchlauf der Optimierung hat der Nutzer die Möglichkeit, allgemeine Einstellungen vorzunehmen. So ist es z. B. möglich, das Materialflussprinzip (MFP) oder den Mitarbeiterfreiheitsgrad (DOF) anzugeben, der die Bewegungen der Aufgaben und Ressourcen innerhalb des Netzwerkes limitiert. Das Ergebnis der Aufteilung im ersten Schritt und der nachgelagerten, zeitlichen Optimierung in Bezug auf die Gesamtdurchlaufzeit in einem zweiten Schritt ist exemplarisch Abbildung 7 zu entnehmen.

Zeit	Werk 1 (Platz M4)	Werk 2 (Platz M9)	Automatisierung 1 (Pl. A1)	Automatisierung 2 (Pl. A2)
13:00:00				
13:00:01				
13:00:02				
13:00:03				
13:00:04				
13:00:05	Bauteil 1 Arbeitsschritt 1	Bauteil 2 Arbeitsschritt 1		
13:00:06				
13:00:07				
13:00:08				
13:00:09				
13:00:10				
13:00:11	Bauteil 1 zu A1	Bauteil 2 zu A2		
13:00:12				
13:00:13				
13:00:14			Bauteil 1 Arbeitsschritt 2	Bauteil 2 Arbeitsschritt 2
13:00:15				
13:00:16				
13:00:17	Bauteil 3 Arbeitsschritt 1		Bauteil 1 zu M9	Bauteil 2 zu M9
13:00:18				
13:00:19				
13:00:20				
13:00:21				
13:00:22				
13:00:23	Bauteil 3 zu A1			
13:00:24				
13:00:25				
13:00:26			Bauteil 3 Arbeitsschritt 2	
13:00:27				
13:00:28				
13:00:29			Bauteil 3 zu M9	
13:00:30				

Abbildung 7: Ausgabe Prozessplan

8.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die fähigkeitsorientierte Analyse und darauf aufbauende Zuordnung von Montageressourcen und -aufgaben wird durch das entwickelte Analysemodul vollständig erfüllt. Das zugrundeliegende Modell verfolgt einen generischen Ansatz. Dies ist ein Fortschritt gegenüber bisherigen Modellen, bei denen statische Lösungen dominieren. Der generische Ansatz erlaubt im Gegensatz zu statischen Lösungen die automatische, adaptive Anpassung an den Anwendungsfall und die Benutzergruppe. Für die Durchführung der Zuordnung von Montageressourcen und -aufgaben auf Basis des Modells wurden Methoden des maschinellen Lernens ausgewählt und in das Analysemodul implementiert. Zur Anlernung des Analysemoduls müssen zunächst einige Zuordnungen zwischen Ressourcen und Aufgaben manuell durch den Bediener durchgeführt werden. Die Zuordnungen dienen als Grundlage, auf der das Analysemodul spätere Zuordnungen vorhersagt. Die für die Vorhersage ausgewählten Methoden erfüllen die Anforderungen und führen die Zuordnungen in der Validierung korrekt durch. Die korrekte Zuordnung durch das Analysemodul in der Validierungsphase hat die praktische Anwendbarkeit des Konzepts bestätigt.

Die Ermittlung und Optimierung des Prozessplans konnte durch das Planungsmodul umgesetzt werden. Bei der Konzeption war es eine Herausforderung, Realitätsnähe und Berechnungszeit bei unterschiedlichen Anwendungsfällen zu berücksichtigen. Das Optimierungsproblem wurde skalierbar entwickelt, sodass der Benutzer die Realitätsnähe und damit den Detailgrad senken kann, sofern die benötigte Berechnungszeit ein sinnvolles Maß überschreitet. Im ersten Validierungsschritt zeigte sich, dass der erwartete exponentielle Zusammenhang zwischen Auftragsmenge und Berechnungszeit für Auftragsmengen größer 4 die Lösungsfindung verhinderte. Als Reaktion wurde der Fokus auf das Finden zulässiger Lösungen verlagert. Durch Zerlegung des Gesamtproblems in Subprobleme und durch zyklische Optimierung wächst die Berechnungszeit nun linear, sodass das

Planungsmodul das Potenzial hat, für beliebige Auftragsmengen einen Prozessplan zu ermitteln. Insgesamt erfüllt damit das Planungsmodul die gestellten Anforderungen zufriedenstellend.

Im nächsten Schritt muss die geplante Montagesequenz auf das Zielsystem (Automatisierung) übertragen werden. Dazu soll auf Basis der Informationen aus Planung und semantischer Beschreibung geplant, übertragen und ausgeführt werden. Prozessinformationen, die während der Ausführung anfallen, sollen ebenfalls in das Planungssystem rückgeführt werden und für nachfolgende Planungs- und Montageaufgaben als Grundlage dienen.

Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (FKZ 02P15A040) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

8.6 Literatur

- [1] Reinhart, G.; Hrsg.: Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 2017
- [2] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer Wien; 2013
- [3] Hesse, W.; Mayr, H C.: Modellierung in der Softwaretechnik. Eine Bestandsaufnahme. Informatik Spektrum 2008; 31
- [4] Zeile, U.: Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1995
- [5] Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag; 2003
- [6] Zülch, G.; Vollstedt, T.; Müller, R.: Balancing of hybrid assembly systems using a simulation approach. In: Jagdev HS, Wortmann J. C.; Pels, H. J.; Hrsg.: Collaborative Systems for Production Management. Boston, MA: Springer US; 2003: 391 – 398
- [7] Brecher, Ch.; Müller, R.; Hrsg.: Studie: Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation. Aachen: Apprimus; 2009
- [8] Delchambre, A.: Computer-aided assembly planning. [Place of publication not identified]: Springer; 2013
- [9] Konold, P.: Angewandte Montagetechnik. Braunschweig: Vieweg; 1997
- [10] Bullinger, H.-J.; Ammer, D.; Hrsg.: Systematische Montageplanung. München: Hanser; 1986
- [11] Prelaz, J.-C.: Automatisierung der Montage in der Feinwerktechnik und Elektrotechnik. VDI-Berichte 1985: 85ff
- [12] Ross, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. München: Utz; 2002
- [13] Beumelburg, K.: Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Heimsheim: Jost-Jetter; 2005
- [14] Kluge, S.; Westkämper, E.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart; 2011

- [15] Hesse, S.; Malisa, V.; Hrsg.: Taschenbuch Robotik - Handling - Montage. Mit 7 Tafeln und 34 Tabellen. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag; 2010
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung. Roboter und Robotikgeräte – Wörterbuch (2010); 2010
- [17] Lotter, B.: Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012
- [18] Krueger, J.; Lien, T.K.; Verl, A.: Cooperation of human and machines in assembly lines. CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY 2009; 58: 628 – 646
- [19] Brecher, Ch.; Krüger, J.; Hrsg.: Hybride Technologien für die Produktion. Düsseldorf: VDI-Verl.; 2010
- [20] Brecher, Ch.; Storms, S.; Ecker, C. et al.: An Approach to Reduce Commissioning and Ramp-up time for Multi-variant Production in Automated Production Facilities. Procedia CIRP 2016; 51: 128 – 133
- [21] Storms, S.; Roggendorf, S.; Stamer, F.; Obdenbusch, M.; Brecher, Ch.: PLM-supported automated process planning and partitioning for collaborative assembly processes based on a capability analysis. 7. WGP-Jahreskongress 2017: 241 – 249

Online-Buchshop für Ingenieure

■■■ VDI nachrichten

Online-Shops



Fachliteratur und mehr -
jetzt bequem online recher-
chieren & bestellen unter:
www.vdi-nachrichten.com/
Der-Shop-im-Ueberblick



Täglich aktualisiert:
Neuerscheinungen
VDI-Schriftenreihen



BUCHSHOP

Im Buchshop von 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

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 978-3-18-369802-8