



Alle Rechte vorbehalten. Dieses Dokument ist ausschließlich  
für die interne Verwendung bestimmt.  
Weitergabe und kommerzielle Verwendung sind nicht gestattet.

4 | 2021

VDI fachmedien

[www.werkstattstechnik.de](http://www.werkstattstechnik.de)

# WT Werkstattstechnik



Titelbild: Fraunhofer IWU

FABRIKPLANUNG

Investitionsentscheidungen  
unter Unsicherheit

PPS (PRODUKTIONSPLANUNG/-STEUERUNG)

Eilaufträge  
logistisch bearbeiten

FERTIGUNGSTECHNIK

Entwicklung von  
eilschleifwerkzeugen

## TITELTHEMEN: FABRIKPLANUNG – PPS (PRODUKTIONSPLANUNG/-STEUERUNG)

# Inhalte der Online-Ausgabe 4-2021

S. 190

## Resiliente Produktionssysteme gestalten und planen

*P. Nyhuis – Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Produktionstechnisches Zentrum Hannover (PZH), Leibniz Universität Hannover (Editorial)*

Zunehmende Dynamik und Volatilität im Geschäftsumfeld führen bei produktionstechnischen Unternehmen zu steigender Unsicherheit. Das hat zur Folge, dass zukünftige Marktentwicklungen und daraus resultierende Lieferkettenstörungen schlechter antizipiert und nicht mit ausreichend genauer Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden können. Die zentrale Herausforderung für Unternehmen besteht darin, trotz dieser Entwicklungen, eine nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen. Die aktuelle Covid-19-Pandemie verdeutlicht, wie unberechenbar das Geschäftsumfeld werden kann und wie anfällig die breit vernetzten Produktionssysteme auf eine derartige Störung reagieren. Vor diesem Hintergrund gewinnt der Aufbau resilienter Produktionssysteme, die auch bei unvorhersehbaren Marktveränderungen effiziente Abläufe gewährleisten, bei Unternehmen zunehmend an Bedeutung.

S. 184

## Eilaufträge logistisch beherrschen\*

*T. Heuer, P. Nyhuis; J. T. Maier, M. Schmidt, – IFA, Leibniz Uni Hannover, Institut für Produkt- und Prozessinnovation (PPI), Leuphana Universität Lüneburg*

Das Erfüllen heterogener Wunschlieferzeiten stellt hohe Anforderungen an die Funktionalität der Produktionsplanung und -steuerung. Die Nutzung von Eilaufträgen lässt zwar kürzere Lieferzeiten zu, induziert aber längere Durchlaufzeiten für Normalaufträge, eine geringere Termintreue und höhere Sicherheitsbestände. Der in diesem Beitrag beschriebene Ansatz von Schnellläuferaufträgen soll kürzere Lieferzeiten bei einer höheren Logistikeffizienz erlauben.

S. 185

## Produktionskennlinien mit Kapazitätsflexibilität\*

*M. Winter, A. Luttkau, H. Lödging – Institut für Produktionsmanagement und -technik, Technische Universität Hamburg*

Die Kapazitätsflexibilität ist von zentraler Bedeutung für das Produktionsmanagement. Sie ermöglicht es Unternehmen, auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Weniger bekannt ist ihre Bedeutung für die erreichbaren Bestände und Durchlaufzeiten der Produktion. Unternehmen können den erforderlichen Pufferbestand mit flexiblen Kapazitäten reduzieren. Dieser Effekt wird mithilfe von Produktionskennlinien modelliert und dargestellt.

## Prozessanalyse in der Wertstromlogistik\*

*C. Leipoldt, R. Ungern-Sternberg, K. Erlach – Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart*

Die Wertstromanalyse betrachtet die Logistikprozesse zur Materialversorgung kaum. Dies erschwert eine ganzheitliche Optimierung der Produktion. Im Beitrag werden zunächst die Ziele der Produktionslogistik definiert und die bestehende Forschungslücke aufgezeigt. Anschließend wird ein an die Wertstromanalyse angelehntes Vorgehen zur Beschreibung vorgestellt, das Potenziale bei Beständen und Transporten auf Prozessebene transparent macht. Die Praxistauglichkeit wird zuletzt an einem Industriebeispiel aufgezeigt.

S. 195

## Integriertes Produkt-Produktions-Code-sign\*

*L. Schäfer, L. Burkhardt, A. Kuhnle, G. Lanza – wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Eine steigende Variantenvielfalt, hohe Marktvolatilität und heterogene Prozesslandschaften betonen die Bedeutung einer simultanen Betrachtung von Produkt- und Produktionssystem für produzierende Unternehmen. Vor dem Hintergrund einer wandlungsfähigen Produktionsplanung und -steuerung stellt dieser Beitrag eine Methodik zur Implementierung eines integrierten Produkt-Produktions-Codesigns vor.

S. 201

## Stufenmodell zur Steigerung der Termintreue\*

*U. Dombrowski, M. Kaufmann, Y. Dix – TU Braunschweig / IAP GmbH*

Die Termintreue nimmt als produktionslogistische Zielgröße eine exponierte Stellung ein, da sie die Kundenzufriedenheit unmittelbar beeinflusst und Lieferterminabweichungen oftmals an Vertragsstrafen gebunden sind. Dieser Beitrag stellt ein Stufenmodell bereit, um die Terminierungssicherheit durch Integration von Ansätzen der Industrie 4.0 in die Durchlaufterminierung systematisch zu unterstützen.

S. 206

## Selbstoptimierende Reihenfolgebildung in der Fertigung\*

*B. Denkena, M.-A. Dittrich, S. Fohlmeister – Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), Leibniz Universität Hannover, Garbsen*

Konventionelle Ansätze der Reihenfolgebildung basieren zumeist auf regelbasierten Heuristiken und erfordern bei Systemänderungen manuelle Anpassungen. Dieser Beitrag stellt einen Ansatz zur dezentralen Reihenfolgebildung mittels „Deep Q-Learning“ vor. Durch die Berücksichtigung verschiedener Fertigungskennzahlen für die Bewertung wird die automatisierte Anpassung der Reihenfolgebildung an das Fertigungssystem und eine Verringerung der Durchlaufzeit erreicht.

S. 212



## Echtzeitfähigkeit in der schiffbaulichen Fertigung\*

P. Burggräf, T. Adlon, K. Müller, S. Vierschilling, R. Minderjahn,  
 N. Schäfer – Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Die Produktion maritimer Systeme stellt Werften aufgrund ihrer Dimensionen und der damit einhergehenden Produktkomplexität vor große Herausforderungen. Um den häufig auftretenden Störungen entgegenzutreten, wird im Projekt „ProProS“ eine Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung und -planung anhand tagesaktueller Echtzeitdaten entwickelt. In diesem Beitrag wird der Begriff der Echtzeitfähigkeit vorgestellt und dessen Bedeutung in der schiffbaulichen Fertigung untersucht. **S. 217**

## Datenhandhabung für die PPS in KMU\*

P. Grzona, D. Fischer, R. Riedel – Technische Universität Chemnitz,  
 Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb

Ziel dieses Beitrags ist es, einen Einblick in die PPS im Mittelstand zu geben und darzulegen, wie man dafür mittels eines kostengünstigen Retrofits eine geeignete Datenbasis schafft. Hierzu wurde gemeinsam mit einem mittelständischen Unternehmen ein Prozessablauf entwickelt und prototypisch umgesetzt, der für die Mitarbeiter den Aufwand zur manuellen Dateneingabe reduziert. **S. 222**

## Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit\*

C. Cevirgen, J. Hook, P. Nyhuis – IFA, Leibniz Uni Hannover

Die Fabrikplanung versucht, Veränderungen zu antizipieren und strukturelle Anpassungen durch die Dimensionierung vorzudenken. Inkrementelle Anpassungen über die ausgewiesene Fläche reichen dafür oft nicht aus, sodass Investitionen anfallen, die in einer frühen Planungsphase unter hoher Unsicherheit zu initiieren sind. Der Beitrag greift daran anknüpfende Herausforderungen auf und zeigt den Bedarf einer verbesserten Entscheidungsunterstützung zur zukunftsicheren Dimensionierung von Fabriken auf. **S. 227**

## Positionierung von Funktionseinheiten in der Fabrik\*

C. Kaucher, S. Gessert, K. Erlach – Fraunhofer IPA, Stuttgart

Die Positionierung von Funktionseinheiten in der Fabrik stellt eine wesentliche Aufgabe der Fabrikplanung dar. Die neu entwickelte „flussorientierte Positionierungsmethode“ erlaubt es, alle relevanten Flussbeziehungen zwischen den Funktionseinheiten zu berücksichtigen. In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines digitalen Werkzeugs zur effizienten Anwendung dieser Methode vorgestellt. Dieses ermöglicht die Visualisierung von Strukturalternativen in der Fabrikplanung einschließlich eines schnellen quantitativen Vergleichs. **S. 232**

## Digitalisierung in Großkonzernen\*

P. Kübler, M. Volkwein, O. Schöllhammer, T. Bauernhansl – Fraunhofer IPA, Stuttgart

Die digitale Transformation stellt für Unternehmen einen radikalen Wandel dar. In der Theorie weisen digitale Technologien große wirtschaftliche Potenziale auf. In der Praxis erzielen gerade Großkonzerne jedoch nicht die erhofften Erfolge. Eine dezidierte Digitalisierungsstrategie ist der Erfolgsfaktor für eine gelungene Transformation. Großkonzerne haben aufgrund ihrer Komplexität andere Herausforderungen zu bewältigen als kleine- und mittelständische Unternehmen. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe sich eine Digitalisierungsstrategie für Großkonzerne in fünf Phasen entwickeln lässt. **S. 237**

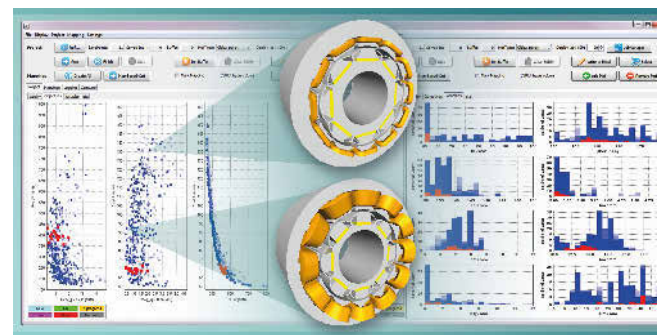
## Netzwerkunterstützung durch Digitale Zwillinge

B. Dinter, H. Wache, S. Ramm, E. Wittstock; F. Otto; A. Maasch – Professur Wirtschaftsinformatik sowie Professur Produktionssysteme und -prozesse, TU Chemnitz; N+P Informationssysteme, Meerane; chemmedia, Chemnitz

Bisherige Ansätze des Digitalen Zwillings beschränken sich auf die digitale Nachbildung einer Maschine insbesondere in deren Betriebsphase. Im Projekt „Co-TWIN“ wird dieses Konzept zum kollaborativen Digitalen Zwillings erweitert, der die Zusammenarbeit nicht nur lebenszyklus- sondern auch wertschöpfungspartnerübergreifend unterstützt. Dieser Beitrag zeigt die Grundidee des kollaborativen Digitalen Zwillings auf und präsentiert den aktuellen Stand der technischen Umsetzung der Co-TWIN-Plattform. **S. 243**

## Interaktive Visualisierung: Durchblick beim Produktdesign

L. Cibulski; H. Mitterhofer – Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD, Darmstadt; Linz Center of Mechatronics, Linz/A



In der Produktentwicklung und Produktionsplanung treten häufig Konflikte zwischen verschiedenen Zielgrößen auf. So lassen sich manche Zielgrößen nicht optimieren, ohne bei anderen Kompromisse eingehen zu müssen. Das Visualisierungstool „Paved“ (Pareto Front Visualization for Engineering Design) hilft, Unterschiede zwischen Alternativen besser zu verstehen und so tragfähigere Entscheidungen zu treffen. **S. 248**

## Linked Data für die selbstoptimierende Produktion\*

C. W. Mehling, K. Wenzel, A. Hellmich, S. Ihlenfeldt – Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen- und Umformtechnik IWU, Dresden

Interoperabilität ist der Kern von Industrie 4.0. Mit Standards wie der Verwaltungsschale und OPC UA lassen sich bereits Komponenten semantisch beschreiben und einheitlich steuern. Für selbstoptimierende Produktionssysteme muss zusätzliches Wissen aus weiteren Datenquellen maschinenlesbar abgebildet und flexibel durch intelligente, autonome Systeme abgefragt werden. Die Linked Factory liefert dafür eine passende Technologie und schafft semantische Interoperabilität auf dem Shopfloor. **S. 251**

## Virtuelle Montageplanung mit Motion Capture Systemen\*

M. Jonek, M. Manns, T. Tuli – Universität Siegen, Institut für Produktionstechnik, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Montage

In der Planung von teilautomatisierten Montageprozessen ist ein wichtiges Ziel, nicht wertschöpfende Tätigkeiten wie Laufbewegungen zu vermeiden. Dieser Beitrag stellt eine Methode vor, tatsächliche Laufbewegungen mit Motion Capture zu erfassen und in die Laufwegsplanung einzubeziehen, sodass sich Prozess- und Arbeitsplatzgestaltung bereits frühzeitig optimieren lassen. **S. 256**

## Flexibilitätsoptimale Austaktung der Fließmontage\*

C. Hofmann, J. Schoof, A. Kuhnle, G. Lanza – wbk, Karlsruhe

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die ausgehend vom Mischgraphen unter Berücksichtigung der minimalen Auslastung der Stationen und benötigter Betriebsmittel eine variantenflexible Allokation der Arbeitsinhalte auf die Produktionsstationen ermittelt. Ziel ist eine Allokation auf die Stationen der Mehrproduktlinie zu wählen, bei der stationsweise eine minimale Auslastung erreicht wird und der Korridor, innerhalb dessen die Variantenanteile schwanken dürfen, maximal ist. **S. 260**

## Entwicklung von Seilschleifwerkzeugen\*

B. Denkena, A. Krödel, C. Heller – IFW, Leibniz Uni Hannover

Das Seilschleifen gewinnt im Rückbau kerntechnischer Anlagen immer mehr an Bedeutung. Aufgrund der hohen Belastung kommt es jedoch häufig zu frühzeitigem Werkzeugversagen. Seilschleifwerkzeuge bestehen aus Schleifsegmenten, die mittels Gummierung auf dem Trägerseil fixiert werden. In diesem Beitrag wird der Einfluss des Werkzeugverbundes auf das Einsatzverhalten und die Lebensdauer untersucht. Die Verwendung von neuen Werkstoffen als Vergussmasse zeigt dabei das Potenzial einer signifikanten Lebensdauersteigerung. **S. 265**

---

\* Bei den mit einem Stern gekennzeichneten Beiträgen handelt es sich um Fachaufsätze, die von Experten auf diesem Gebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben wurden (peer-reviewed).



# Resiliente Produktionssysteme gestalten und planen

Zunehmende Dynamik und Volatilität im Geschäftsumfeld führen bei produktionstechnischen Unternehmen zu steigender Unsicherheit. Das hat zur Folge, dass zukünftige Marktentwicklungen und daraus resultierende Lieferkettenstörungen schlechter antizipiert und nicht mit ausreichend genauer Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden können. Die zentrale Herausforderung für Unternehmen besteht darin, trotz dieser Entwicklungen, eine nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen. Die aktuelle Covid-19-Pandemie verdeutlicht, wie unberechenbar das Geschäftsumfeld werden kann und wie anfällig die breit vernetzten Produktionssysteme auf eine derartige Störung reagieren. Vor diesem Hintergrund gewinnt der Aufbau resilienter Produktionssysteme, die auch bei unvorhersehbaren Marktveränderungen effiziente Abläufe gewährleisten, bei Unternehmen zunehmend an Bedeutung.

Anlässlich des immensen volkswirtschaftlichen Schadens in Folge der Corona-Krise müssen Unternehmen ihre Lieferketten und Logistikstrukturen neu bewerten. Die Planung und Gestaltung von Wertschöpfungssystemen war in den letzten Jahren vor allem durch Kostenoptimierung und Wirtschaftlichkeit geprägt. Um resiliente Produktionssysteme zu schaffen, die bei zukünftigen disruptiven Umweltveränderungen effizient und leistungsfähig bleiben, ist ein Umdenken erforderlich. Aufwandsarme Maßnahmen, die im Bedarfsfall die Produktion innerhalb vorgehaltener Leistungskorridore reaktiv anpassen, sind für Krisensituationen nicht mehr ausreichend. Die Gestaltung resilienter Produktionssysteme erfordert wandlungsfähige Strukturen, sodass bei unvorhersehbaren Krisenzuständen diese Leistungskorridore proaktiv variiert werden können und das System agil auf mögliche Störungen reagieren kann. Hinsichtlich der Planung resilienter Produktionssysteme könnte eine ausgewogene Balance zwischen logistischer Sinnhaftigkeit und wirtschaftlicher Tragfähigkeit als Leitmotiv dienen. Unternehmen sollten zukünftig stärker darauf achten, zum Beispiel ihre Bestände nicht nur hinsichtlich monetärer Faktoren zu planen, sondern Risikoaspekte stärker zu berücksichtigen, um auch in Krisensituationen die eigene Lieferfähigkeit nicht zu gefährden.

Diese weniger kosten- und mehr leistungsorientierte Sichtweise sowie die damit verbundenen Zielkonflikte müssen in der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) abgebildet werden. Die PPS ist ein wichtiger Stellhebel, um robuste Prozesse aufzubauen. Ein weiterer Treiber bei der Gestaltung und Planung resilienter Produktionssysteme ist die Digitalisierung. Eine Studie der Bundesvereinigung Logistik (BVL) identifizierte einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Grad der Digitalisierung und der Resilienz von Unternehmen. Mithilfe von Industrie 4.0-Lösungen können Unternehmen die Transparenz und Reaktionsfähigkeit ihrer Prozesse steigern, um so agil und wandlungsfähig auf Veränderungen zu reagieren.

Die momentane Pandemiesituation stellt zwar ein Extremszenario des turbulenten Produktionsumfelds dar, doch Warnungen vor nächsten Krisen – sei es durch den Klimawandel oder Unsicherheiten des Finanzsystems – existieren bereits und verdeutlichen, dass sich die Frequenz disruptiver Einschlüsse auf Unternehmen erhöht. Damit Unternehmen zukünftig einen Grad an Resilienz erreichen, der ein erfolgreiches Partizipieren auf den volatilen Märkten erlaubt, ist daher eine nachhaltige Umstrukturierung und Digitalisierung der Produktionssysteme unabdingbar.

Im Rahmen des Expertenforum PPS ([www.expertenforum-pps.de](http://www.expertenforum-pps.de)), das am 17. Juni 2021 als hybrides Event stattfindet, bietet sich die Möglichkeit der Diskussion dieser Themen mit hochrangigen Vertretern aus Wissenschaft und Industrie auf dem Weg zu resilienten, digitalen und nachhaltigen Produktionssystemen von morgen. Die Auswahl mehrheitlich wissenschaftlich begutachteter Beiträge in dieser Ausgabe der „wt Werkstattstechnik online“ widmet sich bereits einiger dieser Themen sowie damit verbundenen Herausforderungen und Fragestellungen. Den Autoren der Fachbeiträge sei an dieser Stelle für ihr Mitwirken in der vorliegenden Ausgabe herzlich gedankt.



Prof. Dr.-Ing. habil. **Peter Nyhuis** ist Institutsleiter am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Produktionstechnisches Zentrum Hannover (PZH) der Leibniz Universität Hannover.  
Bild: Christian Wyrwa

## Effiziente Produktionsplanung- und -steuerung

# Eilaufträge logistisch beherrschen

T. Heuer, J. T. Maier, M. Schmidt, P. Nyhuis

Das Erfüllen heterogener Wunschlieferzeiten stellt hohe Anforderungen an die Funktionalität der Produktionsplanung und -steuerung. Die Nutzung von Eilaufträgen lässt zwar kürzere Lieferzeiten zu, induziert aber längere Durchlaufzeiten für Normalaufträge, eine geringere Termintreue und höhere Sicherheitsbestände. Der in diesem Beitrag beschriebene Ansatz von Schnellläuferaufträgen soll kürzere Lieferzeiten bei einer höheren Logistikeffizienz erlauben.

### STICHWÖRTER

PPS (Produktionsplanung/-steuerung),  
Produktionsmanagement, Auftragsabwicklung

## Be in control of rush orders logistically

The satisfaction of heterogeneous desired delivery times requires a high functionality of the production planning and control. The use of rush orders allows for shorter delivery times, but induces longer throughput times for normal orders, lower schedule reliability and higher safety stocks. The fast-track order approach described in this paper is designed to enable shorter delivery times with greater logistics efficiency.

## 1 Einleitung

Das Wettbewerbsumfeld produzierender Unternehmen ist von einer steigenden Produktvielfalt und einem dynamischen wie unsicheren Nachfrageverhalten geprägt [1]. Dabei gelten die Lieferzeit sowie die Liefertermintreue als elementare logistische Leistungsmerkmale [2]. Während die Einhaltung von Qualität vorwiegend eine feste Anforderung ist, besteht kundenseitig der Bedarf, zwischen der Lieferzeit und dem Preis abzuwägen. Von dem Angebot verkürzter Lieferzeiten können produzierende Unternehmen wirtschaftlich profitieren, da Kunden teilweise bereit sind, für kürzere Lieferzeiten Preisaufschläge von bis zu 200 % zu zahlen. [3]

Die Lieferzeitanforderungen spielen eine wichtige Rolle bei der Wahl der Auftragsabwicklungsstrategie. So können kurze Lieferzeiten insbesondere durch eine Lagerfertigung realisiert werden. Bei einer sehr sporadischen Nachfrage der Erzeugnisse oder sehr kundenindividuellen Spezifikationen ist eine kundenauftragsanonyme Produktion aber nicht zweckmäßig. Ein Ziel der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sollte daher sein, im Rahmen der Auftragsfertigung gegenüber der Standardlieferzeit auch kürzere Lieferzeiten anbieten zu können, um den hohen Lieferzeitanforderungen gerecht zu werden. Trotz kürzerer Lieferzeiten ist weiterhin eine hohe Liefertermintreue zu gewährleisten. Gelingt dieses, kann ein nachhaltiger Wettbewerbsvorteil erreicht werden. [4]

Sobald die Wunschlieferzeit kürzer als die Standardlieferzeit ist, können solche Aufträge im Rahmen einer Terminierung mit festen Plan-Durchlaufzeiten nicht ohne weiteres termingerecht geplant werden. Um eine geringere Durchlaufzeit zu erreichen,

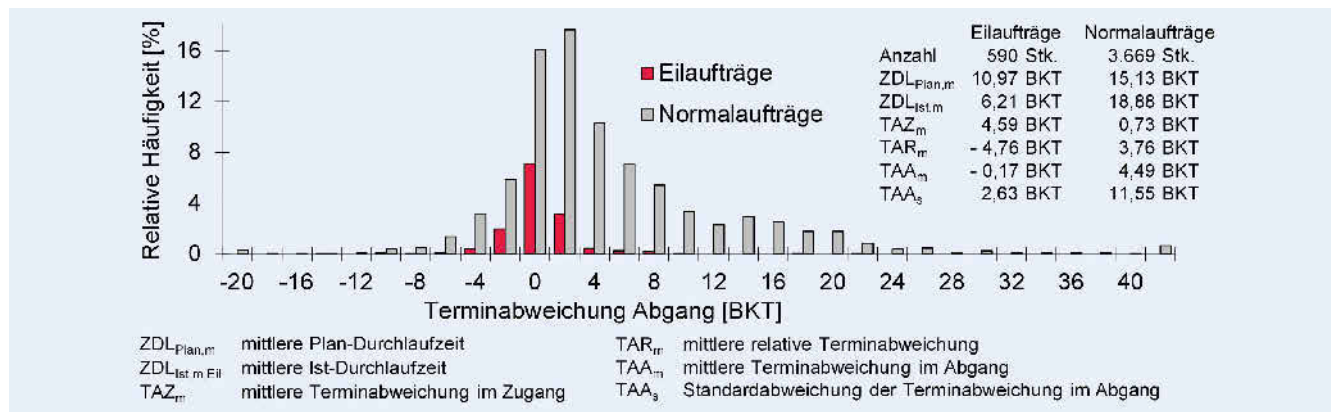
können Unternehmen zeitkritische Aufträge als Eilaufträge einsteuern, die durch eine konsequente Priorisierung an allen Arbeitssystemen minimale Durchlaufzeiten erreichen [5]. Dieses resultiert aber in einer Verlängerung der Durchlaufzeiten von Normalaufträgen [6]. Die effiziente Abwicklung von Eilaufträgen innerhalb der PPS stellt somit ein zentrales logistisches Leistungsmerkmal produzierender Unternehmen dar [7].

In Kapitel 2 wird allgemein beschrieben, wie Aufträge terminiert werden. Daran knüpft in Kapitel 3 eine Analyse der Herausforderungen der Nutzung von Eilaufträgen zur Durchlaufzeitreduzierung an. Aus diesen Herausforderungen wird in Kapitel 4 ein Ansatz abgeleitet, der die Realisierung heterogener Wunschlieferzeiten unter Berücksichtigung der Logistikeffizienz unterstützen soll. Der Beitrag schließt in Kapitel 5 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2 Auftragsterminierung

Trifft ein Kundenauftrag ein, so wird im Rahmen der Angebotsterminplanung die voraussichtliche Durchlaufzeit des Auftrags bestimmt und dem Kunden mitgeteilt [8]. Die Angebotsterminplanung nach Refa wird mithilfe von Eckterminen realisiert. Dazu werden mit internen Durchlaufzeiten sowie Wiederbeschaffungszeiten die Start- und Endtermine des Auftrages der jeweiligen Produktionsbereiche ermittelt, ohne die Kapazitätsbelastung zu betrachten [9]. Werden von den Kunden bereits Wunschlieferzeiten mitgeteilt, können zu deren Gewährleistung bereits in der Planung Priorisierungen von Aufträgen vorgenommen werden und unterschiedliche Durchlaufzeiten vergeben werden [6].





**Bild 1.** Terminabweichung im Abgang von Eil- und Normalaufträgen. Bild: IFA

Wird der Auftrag schließlich erteilt, werden dessen Termine für den Auftragsdurchlauf im Rahmen der Termin- und Kapazitätsplanung genauer bestimmt. Die Erstellung eines Produktionsplans erfordert die Durchführung einer Durchlaufterminierung, einer Belastungsrechnung und schließlich einer Kapazitätsterminierung als Kernaufgaben. [4]

In der Durchlaufterminierung werden ohne die explizite Berücksichtigung von Kapazitäten Start- und Endtermine für die einzelnen Arbeitsvorgänge bestimmt. Zur Abschätzung der Durchlaufzeiten an den einzelnen Arbeitssystemen werden Plan-Durchlaufzeiten verwendet. Diese lassen sich unter anderem schätzen oder durch Empirie ermitteln. [4]

Im Anschluss an die Durchlaufterminierung beginnt die Belastungsrechnung, worin die Kapazitätsbelastung der Arbeitssysteme bestimmt wird. Auf Grundlage der Plan-Zeiten aus den Arbeitsplänen und den im vorherigen Schritt bestimmten Terminen kann die periodenweise Belastung der Kapazitätseinheiten errechnet werden. Diese Belastungen werden in der Kapazitätsterminierung mit den zur Verfügung stehenden Kapazitäten verglichen. Falls über größere Zeiträume hinweg zwischen den Belastungen und Kapazitäten Abweichungen bestehen, muss eine Kapazitätsabstimmung erfolgen. Kurzfristig können Belastungsspitzen durch eine zeitliche Verschiebung der auftragsbezogenen Arbeitsschritte ausgeglichen werden. [4]

Liegt im Rahmen der Durchlaufterminierung der Plan-Endtermin zeitlich hinter dem gewünschten Liefertermin beziehungsweise der geplante Start-Termin bereits in der Vergangenheit, ist die Option einer Durchlaufzeitreduzierung zu prüfen. Diese kann entweder mithilfe einer Übergangszeitreduzierung, einer Splitting von Aufträgen oder einer Überlappung von Arbeitsvorgängen erreicht werden. [10] In der Literatur existieren lediglich vereinzelt Ansätze zur Übergangszeitreduzierung sowie zur Ableitung notwendiger Folgemaßnahmen zu deren Realisierung innerhalb der Fertigung [4].

### 3 Herausforderungen der Realisierung unterschiedlicher Lieferzeiten durch Eilaufträge

Einen Ansatz für die Übergangszeitreduzierung stellt die Nutzung von Eilaufträgen dar. Ist die Wunschlieferzeit des Kunden kürzer als die Standardlieferzeit, so wird der Auftrag als Eilauftrag klassifiziert. Ein Eilauftrag wird oftmals nicht mit verkürzten Plan-Durchlaufzeiten terminiert. Im Auftragsdurchlauf werden

Eilaufträge an jedem Arbeitssystem gegenüber Normalaufträgen priorisiert. [11] Werden regelmäßig Eilaufträge in die Fertigung eingelastet oder Aufträge nachträglich als Eilauftrag deklariert, so wird grundsätzlich empfohlen, nicht die gesamte Kapazität für Normalaufträge zu verplanen, sondern Kapazitäten für Eilaufträge zu reservieren [12]. Sofern genügend Arbeitsvorrat besteht, können Auslastungsverluste, die bei einem Ausbleiben von Eilaufträgen entstehen könnten, vermieden werden, indem andere Aufträge früher freigegeben werden. Um eine ungeplante Erhöhung des Bestandsniveaus und damit auch der mittleren Durchlaufzeiten zu vermeiden, sollte ein solches Vorgehen jedoch mit einer bestandsregelnden Auftragsfreigabe verbunden werden. [3]

Ein Beispiel für die Nutzung von Eilaufträgen und deren Wirkung auf die Auftragsdurchlaufkennzahlen zeigt **Bild 1**. Das Beispiel entstammt aus einem Unternehmen der Elektronikfertigung (hier der Leiterplattenfertigung), in dem das Anbieten kurzer Lieferzeiten ein wesentliches Wettbewerbsmerkmal darstellt. In dem Diagramm sind die Termineinhaltungsverteilungen der Normalaufträge und der vom Unternehmen als Eilauftrag deklarierten Aufträge gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass die Eilaufträge (~ 14 % aller Aufträge) im Mittel nahezu pünktlich zum geplanten Endtermin fertiggestellt wurden und dass auch die Streuung der Terminabweichung sehr gering ist. An den in dem Diagramm aufgeführten Kennzahlen fällt jedoch auf, dass aus Planungssicht auch diese Aufträge nicht beherrscht werden. Die Plan-Durchlaufzeit ist im Durchschnitt deutlich größer als die Ist-Durchlaufzeit. Zudem beziehungsweise als Folge werden die Aufträge gegenüber der Planung verspätet in die Fertigung eingelastet und anschließend im Auftragsdurchlauf stark beschleunigt. Die relative Terminabweichung, die auch der Differenz von Plan- und Ist-Durchlaufzeit entspricht, zeigt, dass eine Beschleunigung von fast fünf Betriebskalendertagen (BKT) realisiert wurde. Aus Kundensicht ist das Ergebnis sehr zufriedenstellend, aus Planungssicht aber wäre zu wünschen, dass schon in der Terminierung realistische Durchlaufzeiten hätten angesetzt werden können.

Bei allen anderen Aufträgen – nachfolgend als Normalaufträge bezeichnet – stellt sich die Situation gänzlich anders dar. Die Aufträge wurden im Schnitt zwar weitestgehend pünktlich eingelastet, jedoch in der Fertigung als Folge der Beschleunigung der Eilaufträge mit fast 4 BKT deutlich verzögert. Im Ergebnis betrug die Terminabweichung im Abgang fast fünf BKT. Die Streuung der Terminabweichung der Normalaufträge war, wie im Diagramm deutlich erkennbar, sehr groß. Soweit es sich bei den



Normalaufträgen auch um Kundenaufträge handelt, resultiert hieraus das Problem, dass die Verlässlichkeit gegenüber den Kunden sehr gering ist. Handelt es sich hingegen um Lageraufträge, so kann die Terminabweichung gegenüber den Kunden durch Lagerbestände kompensiert werden. Angesichts der sehr großen Terminabweichungen müssten jedoch hohe Sicherheitsbestände vorgehalten werden, die entsprechende Kapitalbindungskosten zur Folge hätten.

An dieser Stelle stellt sich die Frage, wie eine bessere Planungsbasis geschaffen werden kann. Für eine erste Prognose mittlerer Durchlaufzeiten können Produktionskennlinien genutzt werden. Mit diesen Kennlinien wird der funktionale Zusammenhang zwischen dem Bestand, der Leistung und der Durchlaufzeit an einem Arbeitssystem beschrieben [6]. Mithilfe dieser Kennlinien gelingt es im Rahmen einer logistischen Positionierung, aus einer Zielauslastung den erforderlichen mittleren Bestand und damit die mittlere Durchlaufzeit arbeitssystemspezifisch zu ermitteln [13]. Die Grundlage für eine Betrachtung unterschiedlicher Durchlaufzeiten von Eil- und Normalaufträgen bieten Nyhuis und Yu mit der maximalen Beschleunigung von Aufträgen [6, 14]. Eine sehr interessante Erweiterung dieser Ansätze erfolgte durch Trzyna [11]. In Anlehnung an die Arbeiten von Trzyna kann die mittlere Durchlaufzeit von Eilaufträgen mit den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$ZUE_{m,Eil} = \begin{cases} ZUE_{min} + \frac{ZDF_m \cdot (1 + ZDF_v^2)}{2}, & \text{für } ZUE_m > \frac{ZDF_m \cdot (1 - ZDF_v^2)}{2} + ZUE_{min} \\ ZUE_m, & \text{für } ZUE_m < \frac{ZDF_m \cdot (1 - ZDF_v^2)}{2} + ZUE_{min} \end{cases} \quad (1)$$

$$ZDL_{m,Eil} = ZDF_m + KWS \cdot ZDF_m + ZUE_{m,Eil} \quad (2)$$

mit  
 $ZUE_{m,Eil}$  mittlere Übergangszeit eines Eilauftrags / BKT  
 $ZUE_{min}$  minimale Übergangszeit / BKT  
 $ZDF_m$  mittlere Durchführungzeit der Auftragsbearbeitung / BKT  
 $ZDF_v$  Variationskoeffizient der Durchführungzeit / -  
 $ZUE_m$  mittlere Übergangszeit / BKT  
 $ZDL_{m,Eil}$  mittlere Durchlaufzeit eines Eilauftrags / BKT  
 $ZUE_m$  mittlere Übergangszeit / BKT  
 $KWS$  Wahrscheinlichkeit für Konkurrenz von Eilaufträgen / %

Bei den Gleichungen wurde unterstellt, dass sich die Arbeitsinhalte von Eilaufträgen und Normalaufträgen strukturell nicht unterscheiden. Der Summand steht für die Berücksichtigung des durch die Konkurrenz von Eilaufträgen verursachten Durchlaufzeitanzeils der Eilaufträge selbst. Dieser kann bei einem Eilauftragsanteil von bis zu 30 % vernachlässigt werden, da die Wahrscheinlichkeit für eine Konkurrenz von Eilaufträgen in diesen Fällen sehr gering ist [11, 15, 16]. Lediglich bei einer sehr starken Streuung der Arbeitsinhalte der Aufträge tritt die Konkurrenz schon bei einem kleineren Eilauftragsanteil verstärkt auf. Weitere Ausführungen hierzu sind der Literatur zu entnehmen [11].

Durch die Beschleunigung von Eilaufträgen werden Normalaufträge verzögert. In Abhängigkeit des Eilauftragsanteils ergibt sich in Anlehnung an Trzyna die Durchlaufzeit von Normalaufträgen [11]:

$$ZDL_{m,N} = \frac{ZUE_m - \sigma \cdot ZUE_{m,Eil}}{(1 - \sigma)} + ZDF_m \quad (3)$$

mit  
 $ZDL_{m,N}$  mittlere Durchlaufzeit eines Normalauftrags / BKT  
 $ZUE_m$  mittlere Übergangszeit / BKT  
 $\sigma$  Eilauftragsanteil am Arbeitsinhalt / -  
 $ZUE_{m,Eil}$  mittlere Übergangszeit eines Eilauftrags / BKT  
 $ZDF_m$  mittlere Durchführungzeit / BKT

Die beschriebenen Modellierungen basieren auf der Annahme, dass Eilaufträge konsequent und auch unabhängig von ihrer Terminierung priorisiert werden.

## 4 Planung und Steuerung von Schnellläuferaufträgen

Um heterogene Lieferzeitanforderungen zu erfüllen und dennoch eine hohe Termintreue gewährleisten zu können, wird nachfolgend ein Produktionsplanungs- und -steuerungsansatz vorgestellt, der die in der Praxis bestehenden Defizite auflösen soll und die zuvor dargestellten Erkenntnisse des Einflusses von Eilaufträgen auf die Durchlaufzeit berücksichtigt. Die Kernpunkte des Ansatzes werden mit dessen Schnittstellen im **Bild 2** dargestellt.

Ausgangspunkt für die nachfolgenden Überlegungen stellt die Produktionskennlinie nach Nyhuis und Wiendahl dar [6]. Über eine logistische Positionierung wird festgelegt, wie groß die mittlere Übergangszeit an dem Arbeitssystem sein wird (vgl. Kapitel 3). Über die Gleichung (1) lässt sich zudem eine Übergangszeitkennlinie für Eilaufträge ermitteln (vgl. **Bild 3**). Die Übergangszeitkennlinie für Eilaufträge stellt die untere Grenze der mittleren Übergangszeit an jedem Arbeitssystem und damit die Grenze des Machbaren dar.

Unter Vernachlässigung von Prozesszeiten für den Versand und die Lieferung beträgt die minimal erreichbare Lieferzeit für einen Eilauftrag:

$$ZL_{min} := ZDA_{Eil} = \sum_{i=1}^I (ZUE_{m,Eil,i} - ZDF_i) \quad (4)$$

mit  
 $ZL_{min}$  minimale Lieferzeit eines Eilauftrags / BKT  
 $ZDA_{Eil}$  mittlere Auftragsdurchlaufzeit eines Eilauftrags / BKT  
 $i$  Arbeitsvorgang ( $i = 1, \dots, I$ ) / -  
 $ZUE_{m,Eil,i}$  minimale mittlere Übergangszeit am Arbeitssystem für den Arbeitsvorgang  $i$  / BKT  
 $ZDF_i$  Durchführungzeit des Arbeitsvorgangs  $i$  / BKT

Liegt die Wunschlieferzeit für einen Auftrag unterhalb der minimal erreichbaren Lieferzeit, kann entweder ein späterer Liefertermin verhandelt oder der Auftrag abgelehnt werden. An dieser Stelle ist unternehmensseitig zu prüfen, ob solche Produkte mittelfristig für eine Lagerfertigung in Frage kommen, um entsprechende Nachfragen auch bei kurzen Wunschlieferzeiten sicher bedienen zu können.

Sofern die Wunschlieferzeiten oberhalb der minimal erreichbaren Lieferzeit liegen, können diese prinzipiell auftragsbezogen gefertigt werden. Es stellt sich dann die Frage, ob die Verwendung unterschiedlicher Standardlieferzeiten in Form von Lieferzeitklassen oder ein differenziertes Lieferzeitangebot nach Kun-

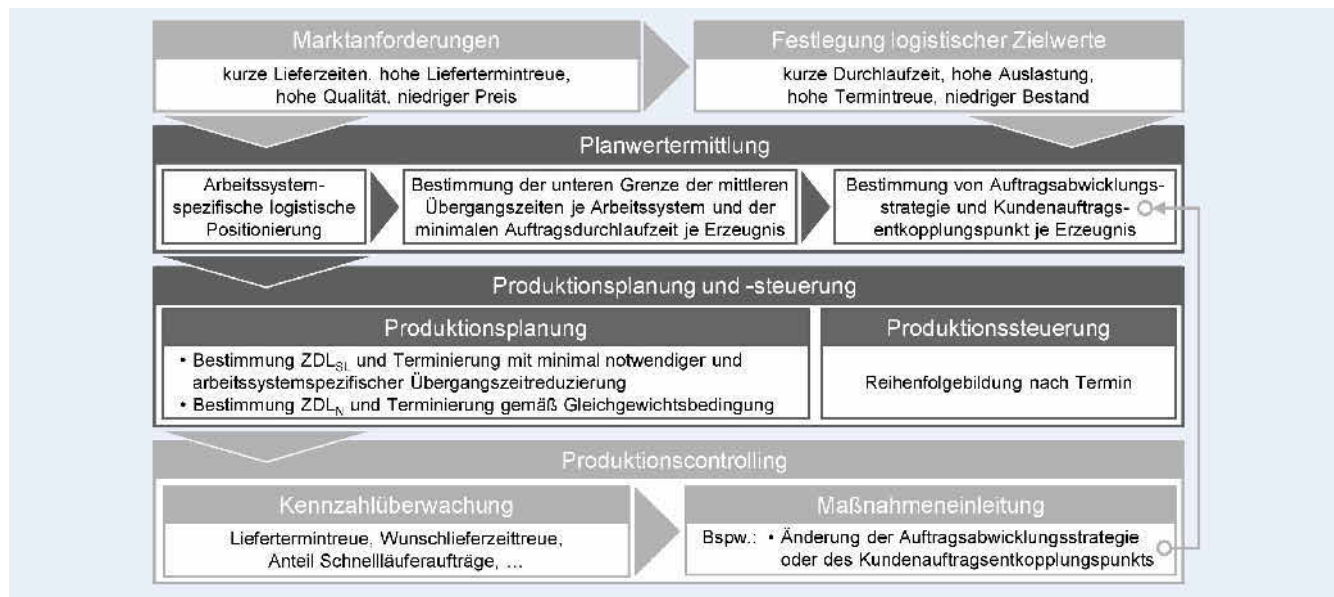


Bild 2. Produktionsplanungs- und -steuerungsansatz für die Verwendung von Schnellläuferaufträgen. Bild: IFA

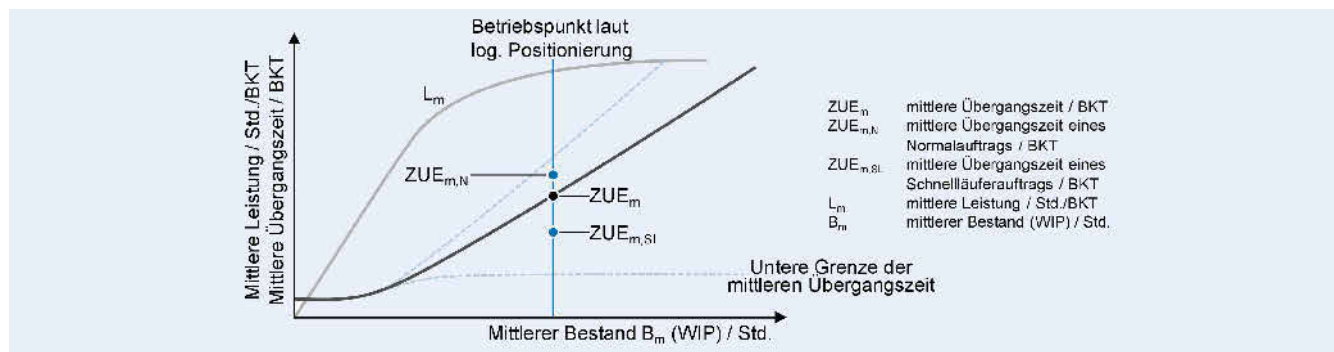


Bild 3. Produktionskennlinie eines Arbeitssystems. Bild: IFA

denwunsch besser geeignet ist. Während ein differenziertes Lieferzeitangebot mit beliebigen Lieferzeiten oberhalb der minimal erreichbaren Lieferzeit eine höhere Kundenorientierung ermöglicht, können unterschiedliche Lieferzeitklassen eine einfachere Handhabung in der Planung gewährleisten.

In der Praxis wird es nicht immer erforderlich sein, dass die Durchlaufzeiten auch für dringliche Aufträge, deren geforderte Lieferzeit geringer ist als die sich aus den Mittelwerten der Durchlaufzeiten ergebende Auftragsdurchlaufzeit (ermittelbar analog zu Gleichung (4)), bis an die Grenze des Machbaren reduziert werden. In Abgrenzung zu Eilaufträgen, die diese untere Grenze der erreichbaren Übergangszeiten darstellen, werden Aufträge, die mit niedrigeren als den mittleren Durchlaufzeiten je Arbeitssystem terminiert werden, aber nur die minimal notwendige Übergangszeitreduzierung erfahren, nachfolgend Schnellläuferauftrag genannt.

Grundsätzlich gilt es, dass die Lieferzeitenanforderungen auf die einzelnen Arbeitsvorgänge und damit die Arbeitssysteme heruntergebrochen werden müssen. Bei den Schnellläuferaufträgen sind die Übergangszeiten je Arbeitsvorgang entsprechend zu reduzieren. Dies kann gleichverteilt oder auch unter Berücksichtigung arbeitssystemspezifischer Restriktionen erfolgen. Ist diese Reduktion für alle Schnellläuferaufträge erfolgt, kann unter Nutzung der Gleichung (3) die Übergangszeit ermittelt werden, die

im Rahmen der Terminierung der nicht dringlichen Normalaufträge anzusetzen ist.

Die Reihenfolgebildung ist terminorientiert durchzuführen, um der Anforderung einer hohen Termintreue zu erfüllen. Ausnahmen können rüstintensive Prozesse darstellen. Eine dadurch induzierte reihenfolgebedingte Terminabweichung muss durch eine terminorientierte Reihenfolgebildung an den nachgelagerten Arbeitsvorgängen kompensiert werden.

Durch den beschriebenen Ansatz kann schließlich den Marktanforderungen nach kürzeren Lieferzeiten entsprochen werden, während gleichzeitig eine hohe Termintreue gewährleistet wird. Durch die bewusste Beschleunigung der dringlichen Aufträge ist eine geringe Auswirkung auf andere Aufträge zu erwarten. Stehen hinter nicht dringlichen Aufträgen konkrete Kundenaufträge, so können diese sicherer bedient werden. Handelt es sich bei den nicht dringlichen Aufträgen um Lageraufträge, ist ebenfalls für sie eine höhere Terminalsicherheit und eine niedrigere Wiederbeschaffungszeit in das Lager gewährleistet. Dadurch können die Sicherheitsbestände um einen wesentlichen Bestandteil reduziert werden [6].

Zur Gewährleistung einer hohen logistischen Zielerreichung sind logistische Kennzahlen permanent zu überwachen. Sofern der Anteil der Schnellläuferaufträge zu groß wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Produktionsstruktur den Marktan-

forderungen nicht mehr gerecht wird. Als Richtwert kann dafür ein Anteil von 30 % angenommen werden. In einem solchen Fall ist zu prüfen, ob die Voraussetzungen gegeben sind, einen Teil der Erzeugnisse als Lagerprodukte zu definieren oder einen anderen Kundenauftragsentkopplungspunkt in die bisherige Prozesskette einzubauen.

## 5 Fazit

Die Realisierung heterogener Wunschlieferzeiten bietet Unternehmen die Möglichkeit, höhere Margen zu erzielen. Daher wurden zunächst Grundlagen der Auftragsterminierung erläutert. Anhand des bestehenden Ansatzes der Nutzung von Eilaufträgen wurden aktuelle Problemstellungen aufgezeigt. Auf dieser Basis wurde ein Produktionsplanungs- und -steuerungsansatz vorgestellt, der diese Problemstellungen auflösen soll und die Realisierung heterogener Wunschlieferzeiten bei hoher Termintreue und niedrigeren Fertigwarenbeständen ermöglicht. Dieser Ansatz ist weiterhin zu konkretisieren und die Anwendbarkeit zu überprüfen.

### DANKSAGUNG

Dieses Forschungsprojekt wird im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 20906 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e.V. und die Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

### Literatur

- [1] Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin: Springer-Verlag 2009
- [2] Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. Aachen: FIR an der RWTH Aachen 2013
- [3] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin: Springer Verlag 2016
- [4] Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 2020
- [5] Lödding, H.; Engehausen, F.: Eilaufträge strategisch einsetzen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 7–8, S. 449–454
- [6] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin: Springer Verlag 2012

- [7] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.: Handbuch Logistik. Berlin: Springer-Verlag 2008
- [8] Grabowski, H.; Kambartel, K. H.: Rationelle Angebotsbearbeitung in Unternehmen mit Auftragsfertigung. Schwerpunkt industrielle Produktion. Essen: Girardet 1977
- [9] REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation: Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Steuerung Teil 3. München: Carl Hanser Verlag 1991
- [10] Mertens, P.: Integrierte Informationsverarbeitung 1. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2013
- [11] Trzyna, D.: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, Universität Hamburg-Harburg Dissertation, 2015
- [12] Kingsman, B. G.; Tatsiopoulos, I. P.; Hendry, L. C.: A structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies. European journal of operational research: EJOR 40 (1989) 40, S. 196–209
- [13] Ludwig, E.; Nyhuis, P.: Verbesserung der Termineinhaltung in komplexen Fertigungsbereichen durch einen neuen Ansatz zur Plan-Durchlaufzeit-Ermittlung. In: Görke, W., Rininsland, H. u. Syrbe, M. (Hrsg.): Information als Produktionsfaktor. Berlin: Springer Verlag 1992, S. 473–483
- [14] Yu, K.-W.: Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich, Universität Hannover genehmigte Dissertation, 2001
- [15] Thüer, M.; Silva, C.; Stevenson, M.: Workload control release mechanisms: from practice back to theory building. International Journal of Production Research 48 (2010) 12, S. 3593–3617
- [16] Jäger, Y.; Roser, C.: Effect of Prioritization on the Waiting Time. In: Moon I.; Lee G.; Park J.; Kiritsis D.; von Cieminski G. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing. APMS 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer 2018, S. 21–26



**Tammo Heuer, M. Sc.**

Bild: IFA

Prof. Dr.-Ing. habil. **Peter Nyhuis**

Leibniz Universität Hannover  
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA)  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
Tel. +49 511 / 762-2440  
heuer@ifa.uni-hannover.de  
www.ifa.uni-hannover.de

**Janine Tatjana Maier, M. Sc.**

Prof. Dr.-Ing. habil. **Matthias Schmidt**

Leuphana Universität Lüneburg  
Institut für Produkt- und Prozessinnovation (PPI)  
Universitätsallee 1, 21335 Lüneburg  
Tel. +49 4131 / 677-1847  
jtmaier@leuphana.de  
www.leuphana.de/ppi

## Logistische Modellierung von Arbeitssystemen in der Werkstattfertigung

# Produktionskennlinien mit Kapazitätsflexibilität

M. Winter, A. Luttkau, H. Lödding

Die Kapazitätsflexibilität ist von zentraler Bedeutung für das Produktionsmanagement. Sie ermöglicht es Unternehmen, auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Weniger bekannt ist ihre Bedeutung für die erreichbaren Bestände und Durchlaufzeiten der Produktion. Unternehmen können den erforderlichen Pufferbestand mit flexiblen Kapazitäten reduzieren. Dieser Effekt wird mithilfe von Produktionskennlinien modelliert und dargestellt.

### STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, PPS  
 (Produktionsplanung/-steuerung), Simulation

## Logistic Operating Curves with Capacity Flexibility

Capacity flexibility is of central importance for production management. It enables companies to respond to fluctuations in demand. Less well known is its significance for the necessary WIP buffers and throughput times in production. Based on flexible capacities, companies can reduce the required level of work-in-process buffer. This effect is modelled and visualized with production operating curves.

## 1 Einleitung und Stand der Technik

Unternehmen stehen vor der Herausforderung zu entscheiden, welchen Umlaufbestand sie für die Produktion vorsehen und welche Durchlaufzeiten realistisch sind. Dimensionieren sie die Bestände zu niedrig, riskieren sie Auslastungsverluste an den Arbeitssystemen. Hohe Bestände binden dagegen Kapital und führen zu langen Durchlaufzeiten. Produktionskennlinien bilden dieses Dilemma der Produktionsplanung ab und stellen die Auslastung als Funktion des mittleren Arbeitssystembestandes dar (**Bild 1**).

Nyhuis und Wiendahl [1] beziehungsweise Nyhuis [2] leiten Produktionskennlinien in einem deduktiv-experimentellen Vorgehen ab. Die ideale Kennlinie entsteht aus einem idealen Produktionsprozess, bei welchem bei einer Auslastung von 100 % zu jedem Zeitpunkt genau ein Auftrag in Bearbeitung ist. Die reale Näherungskennlinie berücksichtigt den Einfluss streuender Zwischenankunfts- und Auftragszeiten, die zu Belastungsstreuungen führen. So ist zusätzlich zum Bestand in Bearbeitung ein Pufferbestand erforderlich, um eine hohe Auslastung sicherzustellen. Die Produktionsplanung und -steuerung kann den erforderlichen Pufferbestand reduzieren, indem sie die Belastungsstreuung glättet (Nutzung der Belastungsflexibilität) und die Kapazitäten an die verbleibenden Belastungsschwankungen anpasst (Kapazitätsflexibilität).

Die Warteschlangentheorie untersucht seit langem die Zusammenhänge zwischen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung. Für das Produktionsmanagement eignet sich insbesondere die Näherungsgleichung von Kingman, weil sie keine Annahmen über die Verteilungsform der Auftrags- und Zwischenankunftszeit trifft,

sondern lediglich die Streuung und den Mittelwert der Verteilungen verwendet [3, 4]:

$$BA_m = A_m + \frac{A_m^2}{1 - A_m} \cdot \left( \frac{ZAU_v^2 + ZAZ_v^2}{2} \right),$$

mit

$BA_m$  mittlerer Bestand [Anzahl Aufträge]

$A_m$  mittlere Auslastung [-]

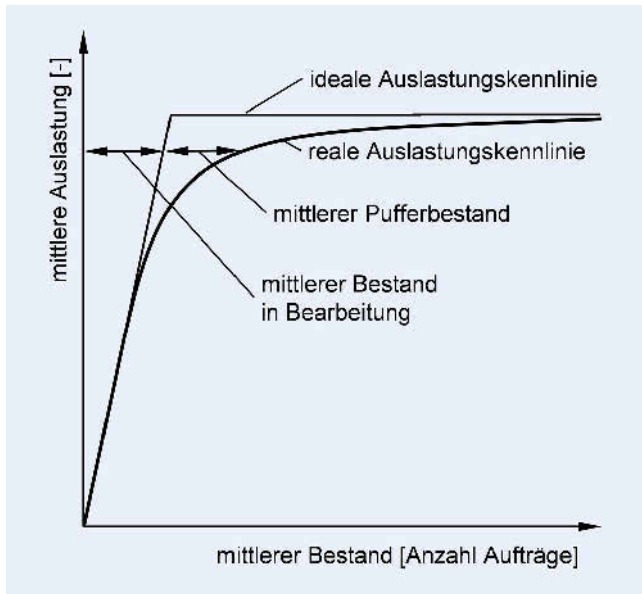
$ZAU_v$  Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

$ZAZ_v$  Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]

Die Gleichung wird in der Notation von Nyhuis und Wiendahl [1] dargestellt. Der erste Summand entspricht dem Bestand in der Bearbeitung, der zweite Summand dem mittleren Puffer- oder Warteschlangenbestand. Allerdings setzt die Kingman-Gleichung starre Kapazitäten voraus, sodass die berechneten Bestände sehr hoch sind. Die Produktionskennlinien nach Nyhuis berechnen deutlich geringere Pufferbestände und somit auch Durchlaufzeiten, da sie flexible Kapazitäten und Belastungen voraussetzen. Busse untersucht dies ausführlicher in seiner Dissertation, mit Schwerpunkt auf dem Einfluss der Belastungsstreuung [5]. Damit eignet sich die Produktionskennlinie nach Nyhuis besser für die Praxis als die Kennlinie nach Kingman. Diese hat jedoch den Vorteil, dass sie eine Obergrenze für den Pufferbestand bei starren Kapazitäten und Belastungen definiert, der sich sehr gut als Referenz für die weitere Modellierung eignet.

Fokus dieser Veröffentlichung ist die Kapazitätssteuerung. Die Kapazitätssteuerung (Abschnitt 2) passt die Kapazitäten an die Belastung an [6]. In den weiteren Abschnitten werden Produktionskennlinien mit unterschiedlich hoher Kapazitätsflexibilität





**Bild 1.** Produktionskennlinien nach Nyhuis und Wiendahl [1].  
Bild: IPMT in Anlehnung an [1]

simuliert (Abschnitt 3) und mit einer modellierten Produktionskennlinie verglichen (Abschnitt 4). Abschnitt 5 fasst die Inhalte der Veröffentlichung zusammen.

## 2 Kapazitätssteuerung

Die Auswirkung der Kapazitätssteuerung wird wesentlich durch das verwendete Verfahren der Kapazitätssteuerung und die Höhe der Kapazitätsflexibilität beeinflusst.

### 2.1 Verfahren der Kapazitätssteuerung

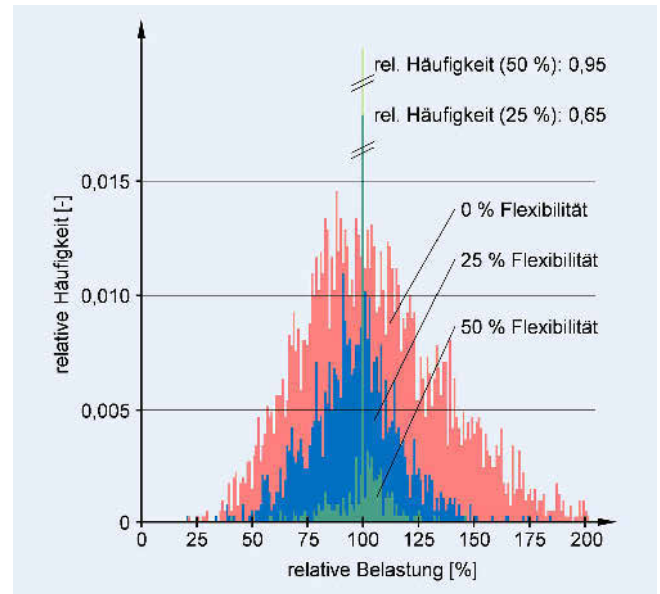
Für die Untersuchungen wird bewusst ein sehr einfaches Verfahren zur Kapazitätssteuerung verwendet, das die Kapazität für eine Planperiode im Rahmen der Kapazitätsflexibilität so festlegt, dass am Ende der Periode der definierte Zielbestand erreicht wird. Verfahrensparameter sind somit der Zielbestand und die Periodenlänge, für welche die Kapazität festgelegt wird. Um einen Bezug zur Kapazitätsanpassung herzustellen, wird der Zielbestand in Stunden gemessen.

$$\text{Kapa}_T = \frac{Z_{U_T} + B_{T-1} - B_{\text{Ziel}}}{P}$$

mit

$\text{Kapa}_T$	Kapazität der Periode T [Std/BKT]
$Z_{U_T}$	Auftragszeitzugang in Periode T [Std]
$B_{T-1}$	Endbestand der Vorperiode von T [Std]
$B_{\text{Ziel}}$	Zielbestand am Arbeitssystem [Std]
$P$	Periodendauer [BKT]

Die obere und untere Grenze der Kapazität werden durch die relative Kapazitätsflexibilität festgelegt. In der Simulation wurde ein Zielbestand von 0 Stunden sowie eine Periodenlänge von 1 Betriebskalendertag (BKT) und damit eine stark eingreifende Kapazitätssteuerung gewählt.



**Bild 2.** Einfluss der Kapazitätsflexibilität auf die relative Belastung.  
Bild: IPMT

### 2.2 Einfluss der Kapazitätsflexibilität

Die relative Kapazitätsflexibilität beschreibt das maximale Ausmaß, die tägliche Kapazität eines Arbeitssystems anzupassen. Beispielsweise kann ein Arbeitssystem mit einer Ausgangskapazität von 8 Std/BKT und einer relativen Kapazitätsflexibilität von 25 % mit einer Kapazität von 6 Std/BKT bis 10 Std/BKT betrieben werden.

Die Idee des Forschungsvorhabens ist es, die Kapazitätsflexibilität als Mittel zur Reduzierung der Belastungsstreuung zu interpretieren. Die Belastung durch die Zwischenankunfts- und Auftragszeiten wird dabei auf die vorhandene Kapazität bezogen und so normiert. So ergibt eine Belastung von 10 Stunden pro Tag bei einer Kapazität von 8 Stunden pro Tag eine relative Belastung von 125 %. Nach einer Kapazitätserhöhung auf 10 Stunden reduziert sich die relative Belastung auf 100 %. Die grundlegenden Einflussgrößen auf die relative Belastung sind die Ausgangsverteilung der Belastung, die relative Kapazitätsflexibilität und die Auslastung des Arbeitssystems.

**Bild 2** zeigt die Belastungsverteilung eines Arbeitssystems ohne Kapazitätsflexibilität sowie mit 25 % Flexibilität und 50 % Flexibilität bei einer mittleren Auslastung des Arbeitssystems von 0,85. Die Verteilung der relativen Häufigkeit zeigt eine stark reduzierte relative Belastungsstreuung für steigende Kapazitätsflexibilitäten. Vor allem zeigt die Verteilung mit 25 % (50 %) Kapazitätsflexibilität einen hohen Anteil von 65 % (95 %) der Perioden mit einer optimalen relativen Belastung von 100 %.

Analog zum fünften produktionslogistischen Grundgesetz nach Nyhuis und Wiendahl [1] reduziert die Kapazitätsflexibilität den erforderlichen Pufferbestand auf zwei Arten: Erstens wird bei hohen Belastungen die bereitgestellte Kapazität erhöht und damit der Aufbau von Pufferbestand verringert. Zweitens wird bei geringer Belastung die Kapazität reduziert, um Auslastungsverlusten entgegenzuwirken.

### 3 Simulierte Produktionskennlinien

#### 3.1 Beschreibung der Simulationsversuche

Die Simulationsergebnisse beruhen auf der Simulation einer Arbeitsstation in einer Werkstattfertigung in der Simulationsumgebung „Plant Simulation“. Für jede Produktionskennlinie wurden 200 Betriebspunkte ermittelt, wobei jeder Betriebspunkt für die Dauer von 30 000 Aufträgen untersucht wurde. Die zentralen Parameter der Versuche sind die Auslastung, der Mittelwert der Auftragszeit (1 Stunde), Zielbestand (0 Std) und Periodendauer (1 Tag) der Kapazitätssteuerung und die Streuung der Auftrags- und Zwischenankunftszeiten (abgeschnittene Normalverteilung mit Werten > 0 Std, Variationskoeffizient 0,6). In der Simulation wurden für vorgegebene Auslastungen der mittlere Bestand, die mittlere Leistung und die mittlere Durchlaufzeit gemessen.

#### 3.2 Simulationsergebnisse

Dieser Abschnitt beschreibt den Einfluss der Kapazitätsflexibilität auf die Bestandsauslastungskennlinien. Die Auslastung ist in Anlehnung an [2] als Verhältnis der mittleren Leistung zur mittleren zur Verfügung gestellten Kapazität definiert. Weil die Kapazitätssteuerung die Kapazitäten einstellt, wäre eine Verwendung von Standardkapazitäten nicht zielführend.

$$A_m = \frac{L_m}{\text{Kapa}_m}$$

mit

$A_m$  mittlere Auslastung des Untersuchungszeitraums [-]  
 $L_m$  mittlere Leistung des Untersuchungszeitraums [Std/BKT]  
 $\text{Kapa}_m$  mittlere Kapazität des Untersuchungszeitraums [Std/BKT]

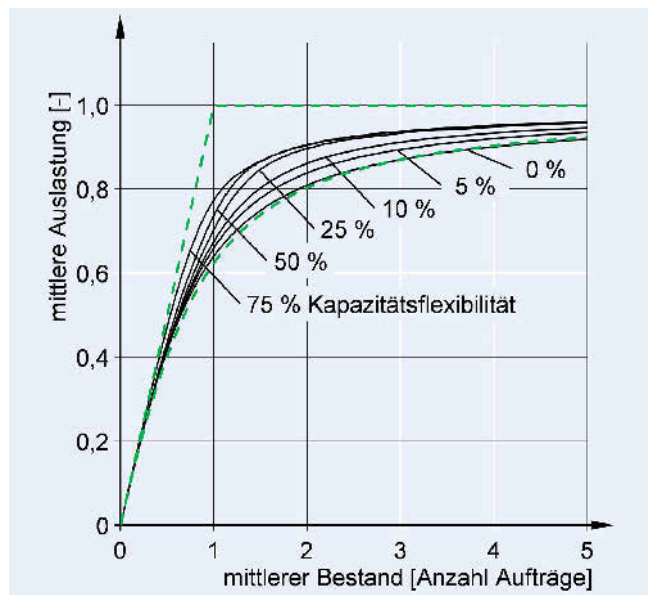
**Bild 3** vergleicht die Bestandsauslastungskennlinien der relativen Kapazitätsflexibilitäten von 0 %, 5 %, 10 %, 25 %, 50 % und 75 % bei einer Periodenlänge der Kapazitätssteuerung von einem Tag. Als Referenzkennlinien (grün gestrichelt) werden die ideale Produktionskennlinie nach Nyhuis sowie eine Produktionskennlinie ohne Kapazitätsflexibilität (Kingman-Gleichung) genutzt.

Je größer die Kapazitätsflexibilität ist, desto geringer ist der für ein definiertes Auslastungsniveau erforderliche Pufferbestand der Produktionskennlinien. Die Kennlinien nähern sich also mit steigender relativer Kapazitätsflexibilität der idealen Produktionskennlinie an. Mit einer relativen Kapazitätsflexibilität von 10 % kann der notwendige Pufferbestand für eine definierte Auslastung um circa 40 % reduziert werden. Eine Flexibilität von 75 % erlaubt eine Pufferbestandseinsparung von etwa 65 %. Gleichwohl ist der Pufferbestand auch bei sehr hoher Kapazitätsflexibilität nicht vernachlässigbar gering.

#### 4 Modellerte Produktionskennlinien

Die vorgeschlagene Näherungsgleichung für die Produktionskennlinien basiert auf der Kingman-Gleichung und erweitert den Term für den erforderlichen Pufferbestand um einen Faktor, der die Wirkung der Kapazitätsflexibilität beschreibt:

$$BA_m = A_m + \frac{A_m^2}{1 - A_m} \cdot \left( \frac{ZAU_v^2 + ZAZ_v^2}{2} \right) \cdot KF$$



**Bild 3.** Einfluss der relativen Kapazitätsflexibilität auf die mittlere Auslastung. Bild: IPMT

mit

$BA_m$  mittlere Bestand in Anzahl Aufträgen [-]  
 $A_m$  mittlere Auslastung [-]  
 $ZAU_v$  Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]  
 $ZAZ_v$  Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]  
 $KF$  Faktor der Kapazitätsflexibilität [-]

Diese Wahl hat verschiedene Vorteile:

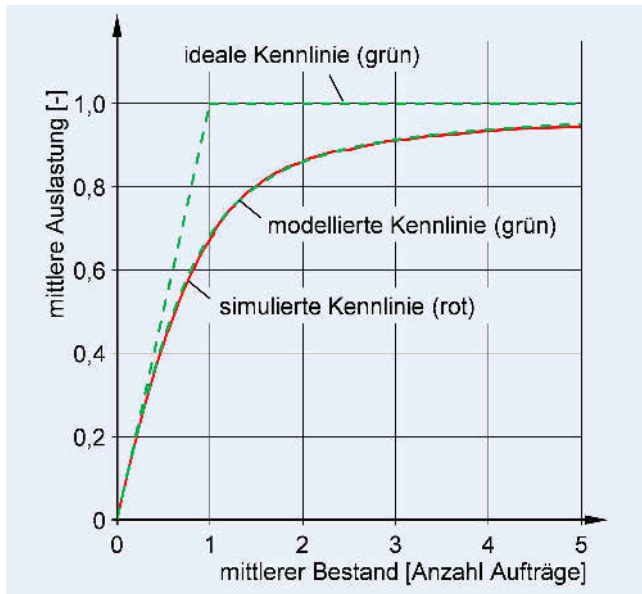
- Bei  $KF = 0$  bildet die Gleichung die ideale Produktionskennlinie nach Nyhuis ab. Ein Wert von null ist somit auch der untere Grenzwert für  $KF$ .
- Mit  $KF = 1$  entspricht die Gleichung der Kingman-Gleichung und bildet somit den Fall starrer Kapazitäten ab. Damit ist ein Wert von 1 der obere Grenzwert von  $KF$ .
- Der Faktor  $KF$  lässt sich leicht interpretieren, weil er den erforderlichen Pufferbestand in Bezug zum erforderlichen Pufferbestand bei starren Kapazitäten und Belastungen setzt. Bei  $KF = 0,5$  ist der erforderliche Pufferbestand, um eine bestimmte Auslastung zu erreichen, also halb so hoch wie bei starren Kapazitäten.
- Die Gleichung lässt sich leicht um einen weiteren Faktor für die Belastungsflexibilität erweitern.

Die Gleichung kann auch die Näherungsgleichung nach Nyhuis annähern. Dabei variiert der erforderliche  $KF$ -Wert je nach Ausprägung der Zwischenankunfts- und Auftragszeitverteilung.

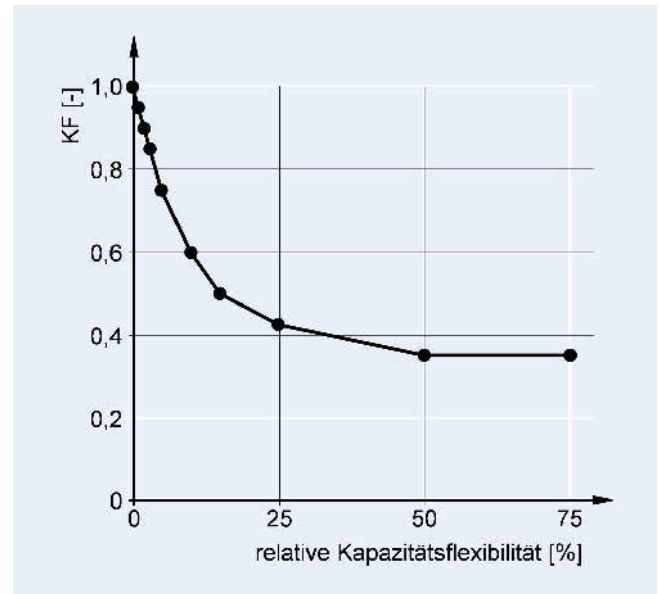
**Bild 4** stellt die simulierte Kennlinie (rot) für eine relative Kapazitätsflexibilität von 10 % der Näherungsgleichung (grün) mit einem  $KF = 0,6$  gegenüber. Die Modellierungsgüte ist sehr hoch.

Diese Genauigkeit leistet Gleichung 4 jedoch nicht für alle Kapazitätsflexibilitäten. Insbesondere bei sehr großen Kapazitätsflexibilitäten ergeben sich Abweichungen, welche für die unternehmerische Praxis aber kaum relevant sind.

Für eine Vielzahl der simulierten Produktionskennlinien wurden die  $KF$ -Werte bestimmt, bei denen die ermittelte Kingman-Gleichung die Simulationsergebnisse besonders gut abbildeten. Als Bezugspunkt wurde dazu der Pufferbestand im Simulations-



**Bild 4.** Bestands-Auslastungskennlinie mit KF (Faktor der Kapazitätsflexibilität). Bild: IPMT



**Bild 5.** Einfluss der relativen Kapazitätsflexibilität auf den Faktor KF. Bild: IPMT

versuch mit einer mittleren Kapazität in Höhe der Plan-Kapazität von acht Stunden gewählt. **Bild 5** zeigt den Verlauf des KF-Wertes über der relativen Kapazitätsflexibilität. Hieraus lassen sich für die den Simulationsversuchen zugrunde liegenden Einflussfaktoren die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Der für eine bestimmte Auslastung erforderliche Pufferbestand nimmt bereits bei geringen relativen Kapazitätsflexibilitäten deutlich ab. So kann der Pufferbestand schon bei einer relativen Kapazitätsflexibilität von 10 % um 40 % reduziert werden.
- Auch bei einer hohen Kapazitätsflexibilität lässt sich der erforderliche Pufferbestand nicht auf null reduzieren, sondern fällt auf einen Grenzwert, der im Beispiel bei etwa 35 % des Pufferbestands bei starren Kapazitäten liegt. Eine Untersuchung von Simulationen mit unterschiedlichen Periodenlängen für die Kapazitätssteuerung deutet daraufhin, dass dies an der Belastungsschwankung innerhalb der Steuerungsperiode liegt. Mit steigender Periodendauer sinkt daher der Effekt hoher Kapazitätsflexibilitäten.

Für die Praxis der Produktionsplanung und -steuerung lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Bedeutung der Kapazitätsflexibilität für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen ist groß: Die wirtschaftlich erreichbaren Bestände und damit auch die Durchlaufzeiten lassen sich mit flexiblen Kapazitäten deutlich senken.
- Bereits eine geringe Kapazitätsflexibilität führt zu relevanten Effekten. Weil die Kapazitätsflexibilität in der Praxis häufig durch Gesetze oder tarifliche Bestimmungen begrenzt ist, ist dies eine besonders wichtige Erkenntnis.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag hat die Auswirkungen der Kapazitätsflexibilität auf die erforderlichen Pufferbestände an Arbeitssystemen anhand von Simulationsversuchen analysiert. Eine Erweiterung der Kingman-Gleichung ermöglicht es, den Effekt über einen empirisch bestimmten Faktor KF abzubilden.

Ziel eines laufenden Forschungsvorhabens ist es, KF über eine Näherungsgleichung als Funktion der relevanten Einflussgrößen zu beschreiben. Darüber hinaus ist geplant, auch den Effekt der Belastungsflexibilität zu erläutern.

### DANKSAGUNG

Dieser Beitrag basiert auf Forschungsarbeiten aus dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt „Modellgestützte Ableitung einer allgemeingültigen Näherungsgleichung für Bestands-Auslastungs-Kennlinien“. Die Projektnummer lautet 415040468.

### Literatur

- [1] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Heidelberg: Springer-Verlag 2012
- [2] Nyhuis, P.: Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991
- [3] Kingman, J. F. C.; Atiyah, M. F.: The single server queue in heavy traffic. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 57 (1961) 04, pp. 902–904
- [4] Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory physics. Boston: McGraw-Hill/Irwin 2008
- [5] Busse, T. D.: Modellbasierte Bewertung der Belastungssteuerung auf das logistische Systemverhalten. Garbsen: PZH-Verlag 2013
- [6] Löffding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2016



**Michael Winter**, M.Sc.

*Bild: D. Manka, Fotokiste.de*

**Alexander Luttkau**, B.Sc.

Prof. Dr.-Ing. habil. **Hermann Lödding**

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Technische Universität Hamburg

Denickestr. 17, 21073 Hamburg

Tel. +49 40 / 42878-2655

ipmt@tuhh.de

[www.tuhh.de/ipmt/](http://www.tuhh.de/ipmt/)



## Erweiterung der Wertstromanalyse zur Erfassung der Produktionslogistik

# Prozessanalyse in der Wertstromlogistik

C. Leipoldt, R. Ungern-Sternberg, K. Erlach

Die Wertstromanalyse betrachtet die Logistikprozesse zur Materialversorgung kaum. Dies erschwert eine ganzheitliche Optimierung der Produktion. Im Beitrag werden zunächst die Ziele der Produktionslogistik definiert und die bestehende Forschungslücke aufgezeigt. Anschließend wird ein an die Wertstromanalyse angelehntes Vorgehen zur Beschreibung vorgestellt, das Potenziale bei Beständen und Transporten auf Prozessebene transparent macht. Die Praxistauglichkeit wird zuletzt an einem Industriebeispiel aufgezeigt.

### STICHWÖRTER

Lean Production, Logistik, Produktionsmanagement

## Process analysis of value stream logistics – Extension of value stream analysis to integrate production logistics

Value stream analysis is only partially covering the logistics of material supply processes. This prevents a holistic optimization of the production system. The paper defines the goals of production logistics and points out the gap in research. Then, –it presents a value stream analysis oriented approach to identify potential improvements regarding inventory and transport at process level. Practical feasibility is demonstrated on an industrial use case.

## 1 Motivation

Die Produktionslogistik als Teil der Unternehmenslogistik konzentriert sich auf Material- und Informationsflüsse vom Wareneingang bis Warenausgang [1, 2]. Die gängigen Ansätze aus der Produktionslogistik sehen die logistischen Anforderungen der Produktionsprozesse meist als gegeben an und konzentrieren sich auf die Optimierung der dafür notwendigen Logistikprozesse. So werden die in der Produktion verwendeten Behälter und Bereitstellungsmengen sowie die Dispositionsstrategien nicht hinterfragt.

Aus Sicht der Produktion hat sich die Wertstrommethode, bestehend aus Wertstromanalyse und Wertstromdesign, in der industriellen Praxis als ganzheitliches Optimierungswerkzeug „von Tor zu Tor“ etabliert. In der Wertstromanalyse werden neben den Produktionsprozessen auch deren logistische Verknüpfungen sowie die Dispositionsstrategien der zentralen Artikel analysiert. Im Gegensatz zu punktuellen Prozessverbesserungen verfolgt das Wertstromdesign einen ganzheitlichen Ansatz zur kundenorientierten Gestaltung der produktionsrelevanten Informations- und Materialflüsse. [3] Eine weitere Detaillierung aus Sicht der Produktionslogistik erfolgt jedoch nicht. In der Wertstromanalyse werden Informationen zu Bestandsreichweiten und verwendeten Gebinden nur für wenige exemplarische Teile aufgenommen. Die zur Bereitstellung aller Komponenten verwendeten Transportmittel, ihre Lieferfrequenzen sowie die Umschlagmengen werden nicht näher betrachtet.

Durch die entkoppelte Betrachtung von Produktions- und Logistikprozessen werden mögliche Synergien nur schwer erkannt. Daher lautet die hier zu behandelnde Fragestellung, wie

die Wertstromanalyse erweitert werden kann, um auf Prozessebene die zusätzlichen Anforderungen der Produktionslogistik darzustellen und Verbesserungspotenziale abzuleiten.

## 2 Ziele der Produktionslogistik

Die Anforderungen und Ziele der Produktionslogistik werden analog zum Wertstromdesign an den Kundenbedarfen ausgerichtet. Kunden der Produktionslogistik sind die jeweiligen internen Produktionsprozesse sowie der Warenausgang als Schnittstelle zum Endkunden.

Aus Kundensicht wird die Logistik im Kontext ihrer Leistungsfähigkeit wahrgenommen und anhand der Sachziele Art, Menge, Qualität, Zeit und Ort beschrieben [4, 5]. Die Messung der Zielerreichung erfolgt hingegen häufig anhand der Logistikkosten als Formalziel der Materialwirtschaft. So ist die Bereitstellung mit Kanban zwar kostengünstig, erzeugt bei vielen Varianten auf Kundenseite jedoch hohe Bestände und erzielt nur bei regelmäßigen Verbräuchen einen hohen Servicegrad [6, 7]. Daher orientiert sich der vorgestellte Ansatz an den Sachzielen und damit der logistischen Leistungsfähigkeit der Produktionslogistik.

Zur Erfüllung logistischer Ziele gilt es, die technischen Kernprozesse der Logistik (Transportieren, Umschlagen, Lagern und Kommissionieren) geeignet zu gestalten [1]. Daher ist die umfassende und detaillierte Analyse dieser Prozesse für die Produktionsversorgung erforderlich.

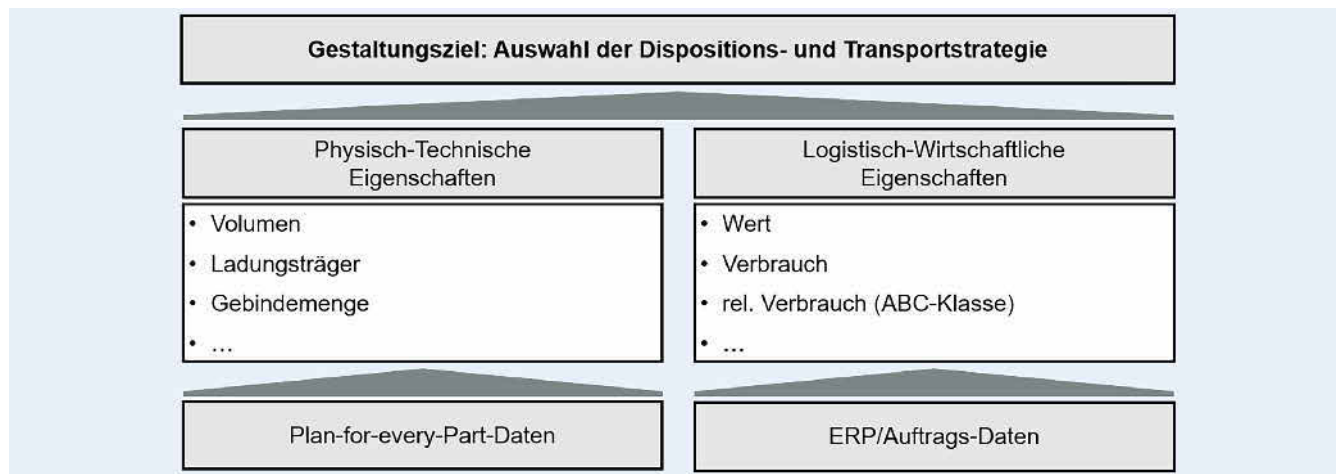


Bild 1. Ziele, Datenbedarfe und -quellen der Teilefamilienbildung. Bild: Fraunhofer IPA

### 3 Wertstromlogistik

Ziel des vorgestellten Ansatzes ist, die Schnittstelle zwischen Produktionsprozessen und Logistik zu analysieren und in eine zur Wertstromanalyse kompatible Darstellung zu bringen. Die Methode soll aufwandsarm sein, also idealerweise im Zuge der Wertstromanalyse mitaufgenommen werden. Die Ausweitung der Prinzipien der Lean Production und des Wertstromdesigns auf die logistischen Prozesse wurde bereits von einigen Autoren vorgeschlagen. Eine ganzheitliche mit der Wertstromdarstellung kompatible Visualisierung der Produktionslogistik fehlt jedoch [8–14]. Eine solche Visualisierung, vor allem bei hoher Teileanzahl, ermöglicht die Betrachtung der zahlreichen Abhängigkeiten in der Schnittstelle zwischen Produktionsprozess und Logistik. So wird die Grundlage für eine übergreifende Optimierung des Systems geschaffen.

Beispielsweise fokussiert der Ansatz von Günthner und Boppert auf die Produktionslogistik [15]. Dabei werden die durch die Produktion gegebenen Anforderungen an die Logistik jedoch als fixiert angesehen und die sich daraus ergebende Logistikstruktur in den Mittelpunkt gestellt. Dies trägt der in vielen Unternehmen ausgeprägten Trennung von Produktions- und Logistikabteilungen Rechnung und ermöglicht eine voneinander weitgehend entkoppelte Systemgestaltung.

Im Gegensatz zu den bestehenden Ansätzen liegt der Fokus dieses Beitrags auf der Betrachtung der Wechselwirkungen von Produktion und Logistik für den jeweiligen Produktionsprozess. Die unmittelbar mit dem Wertstrom in Verbindung stehende Logistik wird im Folgenden als Wertstromlogistik bezeichnet.

### 4 Prozessanalyse der Wertstromlogistik

Nachfolgend wird das am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA entwickelte Vorgehen zur Prozessanalyse der Wertstromlogistik vorgestellt. Es folgt dabei dem Vorgehen der Wertstromanalyse mit den drei Schritten Familienbildung, Prozessaufnahme und Potenzialableitung [3].

#### 4.1 Bildung von Teilefamilien

Ziel der Familienbildung ist es, die hohe Anzahl an Teilevarianten zu einer handhabbaren Anzahl von Teilefamilien zusammenzufassen.

Für diese kann dann jeweils eine gemeinsame Dispositions- wie auch Transportstrategie festgelegt werden (Bild 1).

Teilefamilien ermöglichen es, typische Teile eines Unternehmens zu strukturieren, wie etwa Kartonagen oder Schrauben. Die Bildung der Teilefamilien orientiert sich an den für die Logistik relevanten Eigenschaften der Teile, die sich in zwei Arten unterscheiden lassen:

- Physisch-technische Eigenschaften, wie Teilegeometrie oder verwendete Ladungsträger [10], können im Rahmen einer Plan-for-every-Part-Analyse erhoben werden [16, 17].
- Logistisch-wirtschaftliche Eigenschaften, wie Wert oder Verbrauchsmenge [18], sind häufig bereits in existierenden ERP (Enterprise Resource Planning)-Systemen vorhanden.

Die Bildung von Teilefamilien durch Kombination mehrerer Eigenschaften ist immer unternehmensspezifisch. Beispiele für Teilefamilien können günstige C-Teile als Schüttgut in Standard-Kleinladungsträgern mit regelmäßigem Verbrauch oder teure, variantenreiche Elektronikkomponenten in ESD (Electrostatic Discharge)-geschützten Sonderladungsträgern mit unregelmäßigem Verbrauch sein.

Zur Visualisierung der verwendeten Dispositionsstrategie in Lagern und Puffern, der verwendeten Ladungsträger sowie der Bestandsart innerhalb einer Teilefamilie werden die in Bild 2 dargestellten Symbole verwendet. Gegenüber der einheitlichen Informationsflussdarstellung aus dem Wertstrom wird diese in der Wertstromlogistik in drei unterschiedliche Dispositionsstrategien unterteilt. Die Ladungsträger werden mit Kisten beziehungsweise Palettsymbolen intuitiv dargestellt und detaillieren die Wertstromdarstellung der Behälter. Angelehnt an die Logik im ERP-System wird bei der Analyse in Lager (Bestand mit Materialbegleitskarte) und Puffer (Bestand mit Auftragspapieren) unterschieden.

#### 4.2 Logistikprozessaufnahme

Die Aufnahme der logistischen Prozesse erfolgt im Anschluss an die übliche Wertstromanalyse. Die ermittelte Produktionsprozessabfolge und ihre Kenngrößen werden übernommen und liefern die Eckdaten zur Ermittlung der Leistungsanforderungen an die Logistik. Soweit nicht bereits in der Wertstromanalyse aufgenommen, werden die wichtigsten Eckdaten der Planung und

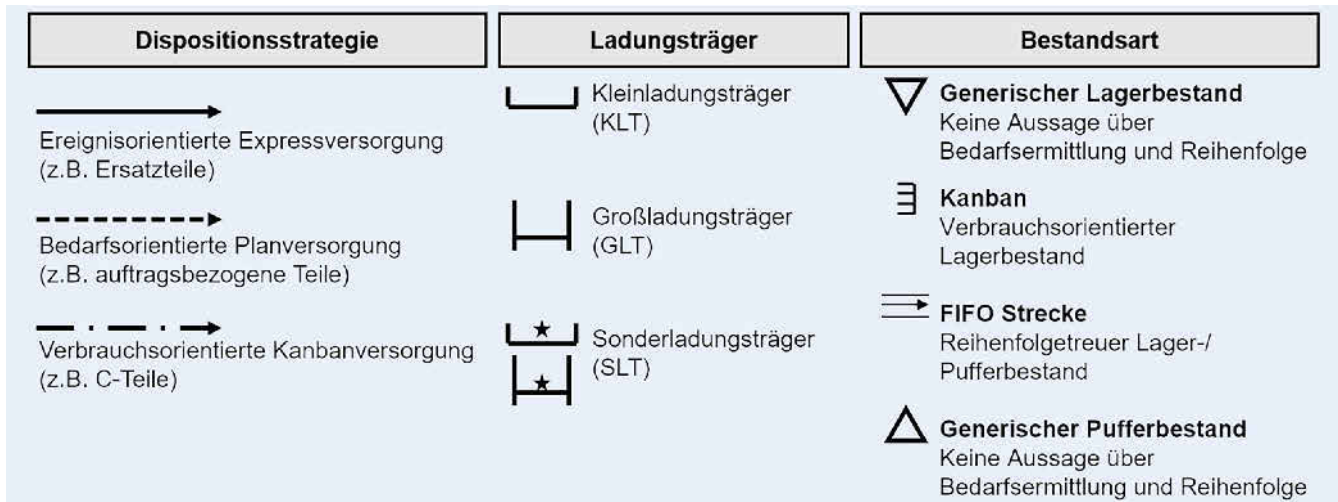


Bild 2. Symbole zur Darstellung von Material- und Informationsfluss in der Wertstromlogistik. Bild: Fraunhofer IPA

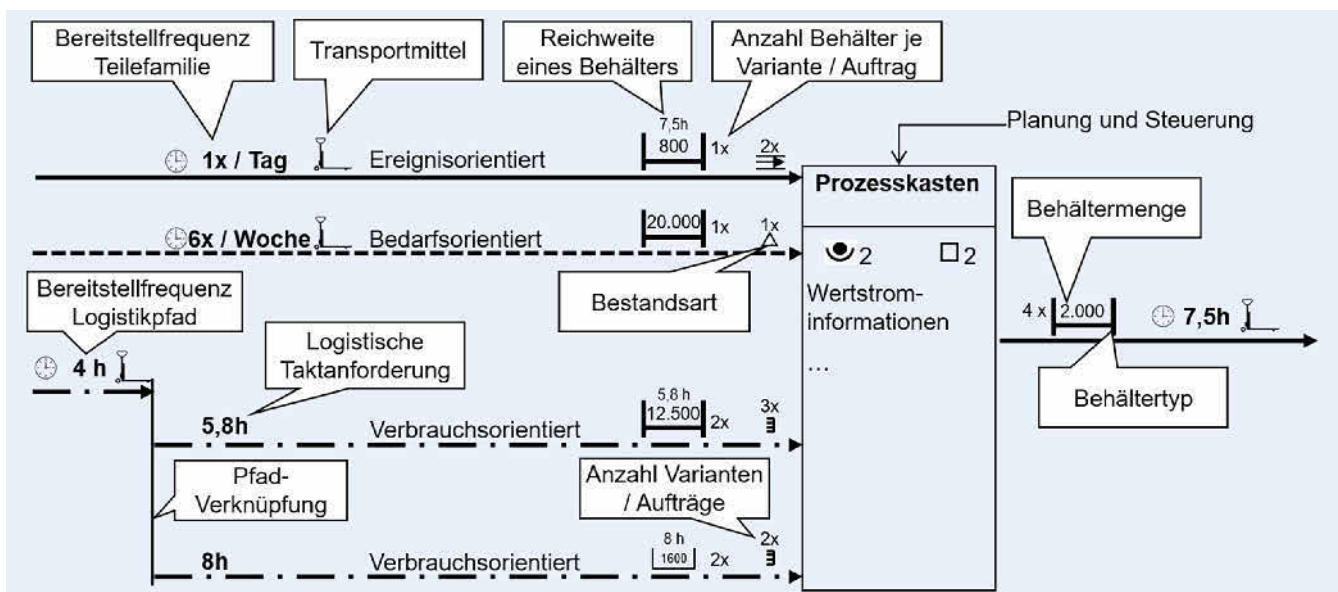


Bild 3. Darstellung der Wertstromlogistikanalyse für einen Produktionsprozess. Bild: Fraunhofer IPA

Steuerung erfasst, darunter die jeweiligen Losgrößen, die Variantenanzahl sowie die Logik zur Reihenfolgebildung.

Im nächsten Schritt werden die am Prozess bereitgestellten Teilefamilien aufgenommen. Abschließend werden die Teilefamilien zu Logistikpfaden zusammengefasst.

Die Aufnahme beginnt beim letzten Prozess im Wertstrom – typischerweise dem Versenden – und wird schrittweise flussaufwärts durchgeführt (Bild 3). Für jede Teilefamilie am Prozess werden die entsprechenden Ladungsträgertypen, deren Anzahl sowie die jeweiligen Artikelmenen aufgenommen und ihre Reichweiten berechnet. Zudem werden die Bestandsart und die dazu verwendeten Transportmittel dargestellt.

Abhängig von der Dispositionsstrategie werden für ereignis- und bedarfsorientiert bereitgestellte Teilefamilien die durchschnittlichen Bereitstellfrequenzen am jeweiligen Pfeil notiert. Für verbrauchsorientiert bereitgestellte Teilefamilien kann unter Berücksichtigung der Behälterreichweite und der Informationslaufzeit eine logistische Taktanforderung ermittelt werden, diese beschreibt die minimale Versorgungsfrequenz (Beispiel: Ein

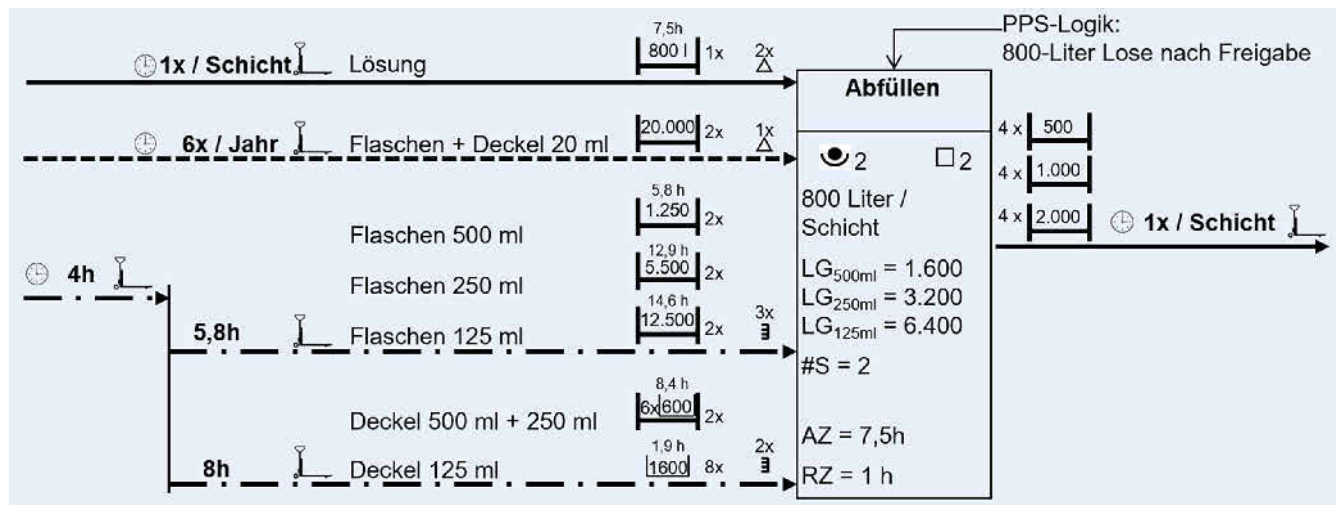
Zwei-Behälter-Kanban mit Behälterreichweite von 4 Stunden erfordert eine Bereitstellfrequenz von kleiner 2 Stunden).

Teilefamilien, die über einen gemeinsamen Logistikpfad versorgt werden, werden über eine vertikale Konsolidierungslinie miteinander verknüpft. Die Teilefamilie mit der höchsten Bereitstellfrequenz wird als Versorgungsengpass bezeichnet und gibt die Bereitstellfrequenz des konsolidierten Logistikpfades vor.

### 4.3 Ableitung der Verbesserungspotenziale auf Prozessebene

Die Erfassung der logistischen Prozesse ermöglicht einen Abgleich zwischen den Anforderungen des Produktionsprozesses und der ihn beliefernden Logistikpfade. Auf diese Weise können schnell Abstimmungsprobleme aufgezeigt werden. Anhand der Darstellung und aufgenommenen Daten lassen sich Potenziale in vier Bereichen identifizieren.

1. Mengen: Zunächst kann das Verhältnis der Behältermengen der unterschiedlichen Teile zueinander überprüft werden. Teile



**Bild 4.** Praxisbeispiel: Darstellung Prozessaufnahme Abfüllen. Bild: Fraunhofer IPA

sollten in einheitlichen Gebindemengen oder Vielfachen davon bereitgestellt werden, wobei gegebenenfalls die Mehrfachverwendung von Teilen zu berücksichtigen ist. Ziel ist es, angebrochene Behälter zu vermeiden sowie gleichzeitige Behälter- beziehungsweise Chargenwechsel zu gewährleisten.

- Bestandsreichweiten: Neben den Gebindemengen sollten die Reichweiten der bereitgestellten Mengen ebenfalls aufeinander abgestimmt sein. Idealerweise sind die Reichweiten identisch oder nah beieinander. Eine Anpassung der Reichweiten kann über die Behälteranzahl oder -mengen erfolgen. Durch die Vereinheitlichung der Bestandsreichweiten können die logistischen Takte aufeinander abgestimmt und eine gemeinsame Materialbereitstellung ermöglicht werden.
- Pfadbildung: Logistische Pfade sollten Teilfamilien mit gleichen Dispositionsstrategien, ähnlichen Ladungsträgern (sowie den daraus folgend ähnlichen Transportmitteln) und ähnlichen logistischen Taktanforderungen zusammenfassen. Durch die Betrachtung der Versorgungsengpässe der bestehenden Logistikpfade können Potenziale zur Neugruppierung der Logistikpfade identifiziert werden. So können effiziente Bereitstellungsprozesse gestaltet und die Auslastung der Transportmittel verbessert werden.
- Planung und Steuerung: Die PPS sollte die Teilebedarfe soweit wie möglich glätten und somit eine mittelwertorientierte Auslegung der Bestände ermöglichen. Dies ermöglicht die Reduzierung der bereitgestellten Mengen bei Gewährleistung einer durchgehenden Teileversorgung. Beispielsweise können durch Einführung von Heijunka-Boards und kleineren Losgrößen die notwendigen Bestandsreichweiten der variantenbezogenen Kanban-Teile bei gleichen Bereitstellfrequenzen verkürzt werden.

Die Potenziale auf Prozessebene verweisen in der Regel auf lokale Verbesserungsmöglichkeiten und müssen in der Praxis immer im Kontext des gesamten Produktionssystems betrachtet werden.

## 5 Praxisanwendung

Die Methode wurde anhand eines Abfüllprozesses im Rahmen einer Wertstromoptimierung erfolgreich validiert. Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Analyse und der Identifikation von Potenzialen kurz vorgestellt.

### 5.1 Aufnahme der Wertstromlogistik

Die im Folgenden beschriebenen Daten werden zur Darstellung der Wertstromlogistik verwendet (**Bild 4**).

Aus der Wertstromanalyse ist bereits bekannt, dass der Prozess in 2 Schichten mit einer Arbeitszeit von jeweils 7,5 h geplant wird. Dabei können inklusive Rüstzeit in einer Schicht 800 Liter abgefüllt werden. Wegen der schichtgebundenen Chargenvergabe werden in der Regel Lose mit 800 l eingeplant, sodass eine Schicht einen Produktionsauftrag bearbeitet. Die Abfüllung erfolgt in der Regel in Flaschen zu 500 ml (groß), 250 ml (mittel), und 125 ml (klein). Daraus ergeben sich für die Abfüllung folgende Flaschen-Losgrößen: 1600 große Flaschen beziehungsweise 3200 mittlere Flaschen oder 6400 kleine Flaschen pro Schicht.

Jeweils 500 große, 1000 mittlere und 2000 kleine abgefüllte Flaschen können auf einer Palette abgestellt werden. Am Ende der Schicht wird die Fertigung mittels Hubwagen von einem Logistikmitarbeiter abgeholt.

Die abzufüllende Lösung wird jeweils zum Schichtende mit Hubwagen zum Abfüllprozess transportiert und dort gemäß Fifo (First in First out)-Logik in 800-l-Fässern bereitgestellt. Da während der Herstellung stichprobenweise Qualitätskontrollen vorgenommen werden, kann es vorkommen, dass Chargen vollständig oder vorübergehend gesperrt werden. Daher stehen in der Regel zwei Behälter bereit, um Produktionsausfälle zu vermeiden.

Die Abfüllung erfolgt in der Regel in die drei vorgestellten Flaschengrößen. Für große und mittlere Flaschen gibt es einen gemeinsamen Deckel, für die kleinen Flaschen wird ein kleinerer Deckel verwendet. Auf einer Palette werden jeweils 1250 große Flaschen, 5500 mittlere Flaschen sowie 12 500 kleine Flaschen chargenrein in einem Kanban-Lager bereitgestellt und gemäß Fifo-Logik verwendet. Aus der Leistung des Abfüllprozesses ergeben sich für die Reichweite der bereitgestellten Paletten 5,8 h (500 ml), 12,9 h (250 ml) sowie 14,6 h (125 ml). Da die Bereitstellung als Kanban mit zwei Behältern erfolgt und ein Materialbedarf direkt durch Leerbuchung am Abfüllprozess ausgelöst wird, ergeben sich in diesem Praxisbeispiel logistische Taktanforderungen von 5,8 h für die großen Flaschen.

Einen Sonderfall sind die 20-ml-Flaschen. Diese werden nur sechsmal im Jahr für ein Exoten-Produkt benötigt und bedarfs-



orientiert bereitgestellt. Dabei werden jeweils 20 000 Flaschen inklusive Deckeln auf einer Palette bereitgestellt.

Die Deckel für 500-ml- und 250-ml-Flaschen werden auf Paletten mit je sechs Kleinladungsträgern (KLT) à 600 Teile im Zwei-Behälter-Kanban bereitgestellt. Für die großen Flaschen ergibt sich eine Palettenreichweite von 5,8 h. Die kleineren Deckel für die 125-ml-Flaschen werden in KLTs mit je 1600 Teilen bereitgestellt. Dabei wird ein Signalkanban-System mit acht Behältern verwendet. Dieses wird mit der Signalschwelle von vier Behältern aufgefüllt. Aus der Behälterreichweite von 2 h ergibt sich die logistische Taktanforderung zu 8 Stunden.

Die Bereitstellung von Flaschen und Deckeln erfolgt alle 4 Stunden mittels Hubwagen.

## 5.2 Identifizierung von Verbesserungspotenzialen

Aus der Wertstromlogistikaufnahme lassen sich Potenziale in allen vier Feldern identifizieren.

1. Mengen: Vor allem die Abweichung zwischen den Behältermengen der jeweiligen Flaschengrößen und der zugehörigen Deckel ist problematisch. Aufgrund der Chargenanforderung wird bei einem Behälterwechsel jeweils eine neue Produktionsscharge vergeben und eine Line-Clearance ist notwendig. Die dadurch erzeugten Aufwände in der Produktion und Verwaltung könnten durch eine Angleichung der Behältermengen reduziert werden.  
Bei den Paletten mit den bereits abgefüllten Flaschen ergibt sich ebenfalls eine Dissonanz bei den Behältermengen. Bei allen Flaschengrößen werden 3,2 Paletten benötigt, sodass die letzte Palette immer nur teilweise gefüllt wird. Durch eine Anpassung der Behältermengen könnte auch hier eine Synchronisation durchgeführt werden (etwa vier Paletten mit jeweils 400/800/1600 Flaschen).
2. Bestandsreichweiten: Bei den leeren Flaschen weisen die bereitgestellten Mengen sehr unterschiedliche Reichweiten auf. Die Reichweite der großen Flaschen ist mit 5,8 h erheblich kürzer als bei den mittleren und kleinen Flaschen. Die logistische Taktanforderung der Teilefamilie muss daher auf die 500-ml-Flaschen ausgelegt werden. Für die anderen Varianten entsteht dadurch Verschwendung. Durch eine Anpassung der bereitgestellten Reichweite, etwa durch einen zusätzlichen Behälter, können die Reichweite angepasst und die logistischen Taktanforderungen synchronisiert werden.
3. Pfadbildung: Es wird deutlich, dass die großen Flaschen den Bereitstellungsengpass am Prozess darstellen. Bei der gemeinsamen Versorgung über einen Logistikpfad entsteht somit für andere Teilefamilien Verschwendung in den logistischen Prozessen. Zur Vermeidung der Verschwendung sollte entweder die Pfadverknüpfung kritisch geprüft werden oder eine Synchronisierung der logistischen Taktanforderungen, zum Beispiel über die bereitgestellten Reichweiten, erfolgen.
4. Planung und Steuerung: Ist eine Anpassung der Reichweiten nicht sinnvoll, ist die Einführung einer entsprechenden Steuerungslogik denkbar. Im Beispielprozess kennzeichnet die Reichweite der großen Flaschen den Bereitstellungsengpass und gibt die Anforderung für den Logistikpfad vor. Wird etwa ein Heijunka-Board eingeführt, können die Abfüllungen in die großen Flaschen so eingeplant werden, dass dies nie in zwei aufeinanderfolgenden Schichten geschieht. Dadurch kann der Engpass aufgelöst und der Bereitstellzyklus auf den nächsten

Bereitstellungsengpass ausgelegt werden. Im Beispiel erlaubt dies die Erhöhung des Bereitstellzyklus von 4 h auf 8 h und reduziert so die logistischen Aufwände.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Vorgehen zur Aufnahme und Visualisierung der Wertstromlogistik für die einzelnen Produktionsprozesse erlaubt eine übersichtliche Darstellung des Istzustands sowie eine schnelle Identifikation der Potenziale auf Prozessebene. Damit wird eine wichtige Unterstützung bei der Abstimmung von Produktions- und Logistikprozessen gegeben. Am Industriebeispiel wird deutlich, dass durch Anwendung der Methode nicht-synchronisierte Prozesse einfach identifiziert werden können. Durch die Fokussierung des vorgestellten Ansatzes auf einzelne Prozesse kann die Methode noch nicht zur Optimierung des Gesamtsystems genutzt werden.

Im Sinne der Wertstrommethode gilt es daher in einem nächsten Schritt eine aggregierte Darstellung für das gesamte Logistiksystem zu entwickeln, um so insbesondere im Systemüberblick Potenziale ausweisen zu können. Als Voraussetzung für die Gestaltung eines Gesamtsystems sind zudem Richtlinien für die Gestaltung der Wertstromlogistik zu definieren. Dies wird in den Forschungsvorhaben zur „Systemanalyse der Wertstromlogistik“ und zum „Wertstromlogistikdesign“ ausgeführt.

### Literatur

- [1] Heiserich, O.-E.; Helbig, K.; Ullmann, W.: Logistik. Eine praxisorientierte Einführung. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien 2011
- [2] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. Berlin: Springer Vieweg Verlag 2018
- [3] Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. Berlin: Springer-Verlag 2020
- [4] Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. Wiesbaden: Gabler Verlag 2009
- [5] Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement der industriellen Produktion. Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Heidelberg: Springer Verlag 2011
- [6] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2016
- [7] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. München: Carl Hanser Verlag 1997
- [8] Villarreal, B.: The transportation value stream map (TVSM). European Journal of Industrial Engineering 6 (2012) 2, pp. 216–233
- [9] Knoll, D.; Reinhart, G.; Prüglmeier, M.: Enabling value stream mapping for internal logistics using multidimensional process mining. Expert Systems with Applications 124 (2019), pp. 130–142
- [10] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin: Springer Vieweg Verlag 2018
- [11] Jones, D. T.; Hines, P.; Rich, N.: Lean logistics. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 27 (1997) 3/4, pp. 153–173
- [12] Busert, T.; Fay, A.: Extended Value Stream Mapping Method for Information Based Improvement of Production Logistics Processes. IEEE Engineering Management Review 47 (2019) 4, pp. 119–127
- [13] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Berlin: Springer Verlag 2009
- [14] Dickmann, P. (Hrsg.): Schlanker Materialfluss. Mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2015
- [15] Günthner, W. A.; Boppert, J. (Hrsg.): Lean Logistics. Heidelberg: Springer Verlag 2013
- [16] Harris, R.; Harris, C.; Wilson, E. et al.: Making materials flow. A lean material-handling guide for operations, production-control, and engineering professionals. Cambridge, Mass.: Lean Enterprise Institute 2011

- [17] Ungern-Sternberg, R.; Erlach, K.: Auswahl der optimalen Lagertechnik. Optimierung von Flächennutzung, Zugriffszeiten und Prozesskosten mit Hilfe PFEP-Methode. *productivITy* 22 (2017) 3, S. 13–15
- [18] Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Carl Hanser Verlag 2020



**Christoph Leipoldt**, M.Sc.

*Bild: Fraunhofer IPA*

**Roman Ungern-Sternberg**, M.Sc.

**Dr. Klaus Erlach**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
Tel. +49 711 / 970-1129  
cpl@ipa.fhg.de  
www.ipa.fraunhofer.de

## Ganzheitliche Auswirkungsanalysen von Änderungsfällen und Identifikation von Lösungsmustern

# Integriertes Produkt-Produktions-Codesign

L. Schäfer, L. Burkhardt, A. Kuhnle, G. Lanza

Eine steigende Variantenvielfalt, hohe Marktvolatilität und heterogene Prozesslandschaften betonen die Bedeutung einer simultanen Betrachtung von Produkt- und Produktionssystem für produzierende Unternehmen. Vor dem Hintergrund einer wandlungsfähigen Produktionsplanung und -steuerung stellt dieser Beitrag eine Methodik zur Implementierung eines integrierten Produkt-Produktions-Codesigns vor. Bestandteile sind ein ganzheitliches Änderungsmanagement und die Identifikation von Lösungsmustern.

### STICHWÖRTER

PPS (Produktionsplanung/-steuerung), Wissensmanagement

## Integrated product-production codesign

An increasing number of variants, high market volatility, and heterogeneous process landscapes emphasize the importance of a simultaneous consideration of product and production for manufacturing companies. Against the background of adaptive production planning and control (PPC), this paper proposes a methodology for implementing an integrated product-production-Codesign, consisting of a holistic analysis of changes and their impact on the system, as well as the identification of solution patterns.

## 1 Einleitung

Das Umfeld der industriellen Produktion wird derzeit von vielfältigen Megatrends geprägt. Individualisierung als einer der sieben Megatrends spiegelt sich in dem zunehmenden Kundenwunsch nach individuellen Produkten wider, der von produzierenden Unternehmen aufgegriffen wird [1]. Damit steigt sowohl die produkt- wie die produktionsseitige Komplexität der Systeme und es entstehen komplexe „System-of-Systems“ [2, 3]. Durch steigende Produktvarianz und kurze Produktionslebenszyklen treffen prozessuale Ziele, wie die Reduktion der Time-to-Market, auf Anforderungen, wie beispielsweise eine hohe Anpassbarkeit von Produktionssystemen in kurzer Zeit [1].

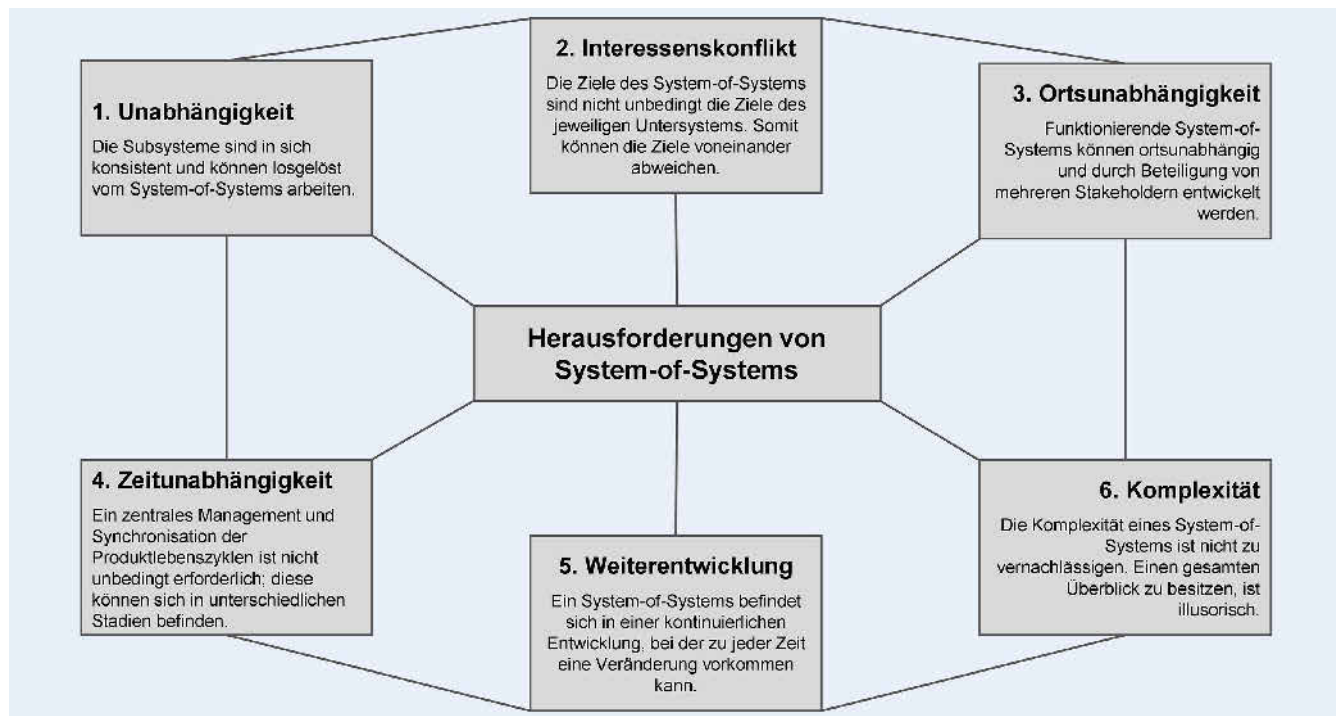
Um der steigenden Individualisierung gerecht zu werden, ist eine Wandlungsfähigkeit der Produktion essenziell [4]. In diesem Kontext spielt der Mensch, der sich aktiv am Änderungsmanagement beteiligt, als Ressource einen entscheidenden Faktor [5]. Die kurzen Produktlebenszyklen bei steigender Produktvielfalt machen den Menschen zu einem flexiblen und somit wichtigen Faktor in produzierenden Unternehmen [6].

Dieser Beitrag diskutiert Ansätze zur Unterstützung in einer menschenzentrierten Produktion und stellt eine Methode zur flexiblen und wandlungsfähigen Produktionsplanung und -steuerung vor. Mögliche Fragestellungen dabei sind, wie die Produktion modelliert werden kann oder welche Ansätze zur Planung und Steuerung geeignet sind. Hierbei ist das Ziel, durch die integrierte Betrachtung von Produkt und Produktion ein Produkt-Produktions-Codesign zu realisieren.

## 2 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Unter „Produkt-Produktions-Codesign“ ist im Kontext dieses Beitrags die simultane Betrachtung (vergleiche Simultaneous Engineering) von Produkt- und Produktionsdesign zu verstehen. Das Produkt-Produktions-Codesign vereint dabei eine funktions-optimale und produktionsgerechte Produktgestaltung mit einer wirtschaftlichen und produktgerechten Produktion. Diese simultane Betrachtung berücksichtigt sowohl Produktanforderungen, -design und -toleranzen als auch Prozessparameter, Maschinen und Technologien und kann nachträglich kostenintensive Anpassungen verhindern. Das übergeordnete Ziel ist die quantitative Optimierung von gemeinsamen Zielgrößen sowie eine Befähigung zu maximaler Wandlungsfähigkeit.

Der Begriff Produkt-Produktions-Codesign basiert auf dem Grundgedanken des Simultaneous Engineering. Dieses wird als „[...] zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit von Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung mithilfe eines straffen Projektmanagements [...]“ [7] definiert. Die Parallelisierung der Entwicklungsphasen zielt auf die Optimierung der Produktqualität sowie die Reduktion der Entwicklungszeit und -kosten ab [8]. Diese Verzahnung ermöglicht es, Kostenquellen oder Engpässe zu identifizieren [7]. Beim Simultaneous Engineering ist es von großer Bedeutung, dass die Fachbereiche intensiv an allen Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses beteiligt sind, um bereits zu Beginn der Entwicklungsphase Risiken zu identifizieren [9]. Voraussetzung dafür ist ein vernetztes und kommunikationsbasiertes Arbeiten. Eine Kollaboration über die Abteilungen hinweg ist lohnenswert, um die unternehmerische Wandlungsfähigkeit zu steigern [7].



**Bild 1.** Herausforderungen im Umgang mit einem System-of-Systems. Bild: [14]

Eine zentrale Herausforderung im Kontext von Simultaneous Engineering ist die steigende externe Marktkomplexität durch Globalisierung, Regionalisierung und Personalisierung [10] sowie Kundenanforderungen an Lieferfähigkeit und Verfügbarkeit bei zunehmender Variantenvielfalt [2]. Daraus ergibt sich eine starke Abhängigkeit zwischen der Komplexität, die auf ein produzierendes Unternehmen wirkt, und notwendiger Produktionsflexibilität beziehungsweise Wandlungsfähigkeit [2]. Da kybernetisch betrachtet nur Komplexität mit Komplexität umgehen kann [11], entstehen aus der wachsenden externen Komplexität im Kontext des Produkts und der Produktion komplexe System-of-Systems. Ein System-of-Systems wiederum erfordert eine ganzheitliche Betrachtung im Sinne des Produkt-Produktions-Codesign.

Unter einem System wird „[...] das Modell einer Ganzheit, die (a) Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die (b) aus miteinander verknüpften Teilen beziehungsweise Subsystemen besteht, und die (c) von ihrer Umgebung beziehungsweise von einem Supersystem abgegrenzt wird“ [12] verstanden. Werden mehrere Systeme miteinander vernetzt, entsteht ein Konglomerat aus Systemen: ein System-of-Systems [13]. Ein System-of-Systems kennzeichnet eine operative und betriebswirtschaftliche Unabhängigkeit der einzelnen Subsysteme [3]. Jedes einzelne Subsystem ist autark arbeitsfähig und strebt ein eigenes Ziel an [3]. Die folgenden sechs Aspekte (**Bild 1**) sind zu bedenken, um mit einem System-of-Systems erfolgreich umzugehen [14].

### 3 Problemstellung

Aus der geforderten flexiblen und wandlungsfähigen Produktionsplanung und -steuerung ergeben sich bisher ungelöste Problemstellungen, deren Lösung jedoch ein beachtliches Potenzial für produzierende Unternehmen birgt.

Bedingt durch das dynamische Umfeld treten im Rahmen komplexer System-of-Systems häufig kurzfristige Änderungsfälle auf, welche beispielsweise zeitlich bedingt nicht im Kontext einer umfassenden Neuplanung, sondern lediglich mit einer adaptiven Steuerung berücksichtigt werden können. Aus diesem Grund ist ein ganzheitliches Änderungsmanagement erforderlich, um auf auftretende Änderungsfälle im Wechselspiel zwischen Produkt und Produktion kurzfristig und flexibel reagieren zu können. Um die Zusammenhänge zwischen Produkt- und Produktionssystem planerisch nutzen zu können, ist deren Formalisierung essenziell. Auf Basis von merkmalsbasierten Referenzarchitekturen können Lösungsmuster detektiert werden und es ist möglich, historisches Wissen zu modularisieren und wiederzuverwenden, um so die Wandlungsfähigkeit zu steigern.

Ziel dieses Beitrags ist es eine Methode zu entwickeln, die diese Problemstellung adressiert und ein Vorgehen im Umgang mit Änderungsfällen sowie zur Detektion von Lösungsmustern vorschlägt.

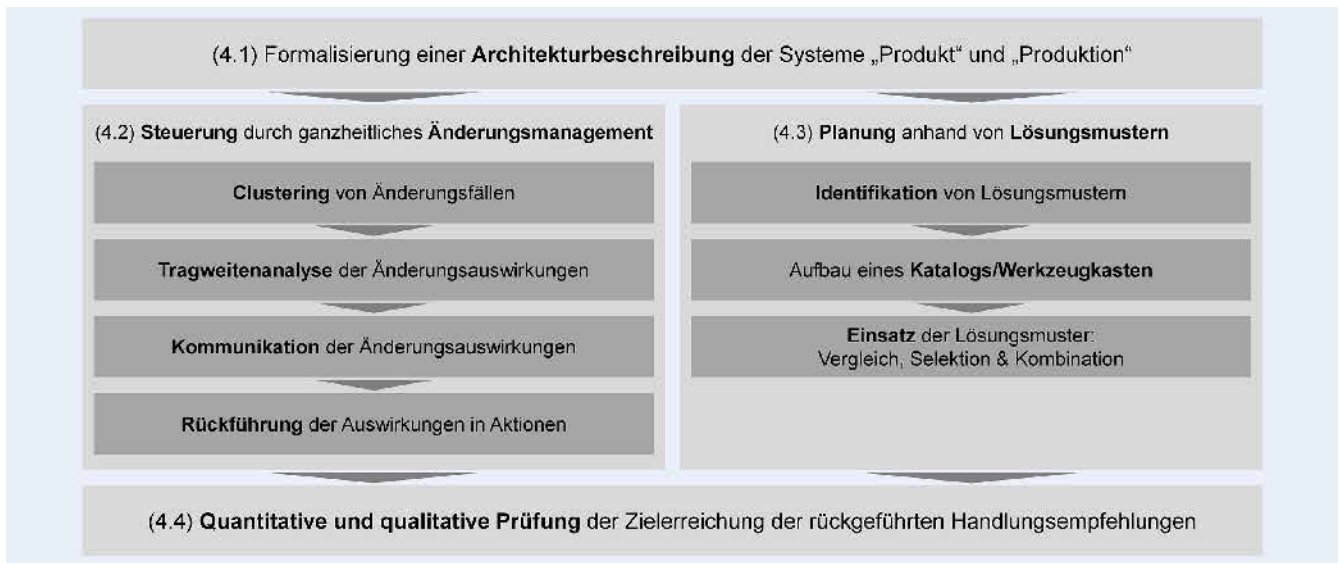
### 4 Methode

Um der beschriebenen Problematik zu begegnen, wird die in **Bild 2** visualisierte Methode vorgestellt. Das Ziel eines integrierten Produkt-Produktions-Codesign ist einerseits kurzfristig auf Produkt- als auch Produktionsänderungen zu reagieren sowie andererseits Lösungswissen formalisiert langfristig nutzen zu können.

#### 4.1 Formalisierung einer Architekturbeschreibung der Systeme „Produkt“ und „Produktion“

Die Grundlage der integrierten Betrachtung von Produkt- und Produktionssystem ist eine formalisierte Systembeschreibung.





**Bild 2.** Vorgehensmodell im Rahmen des Produkt-Produktions-Codesign. Bild: wbk Institut für Produktionstechnik

Seitens der Produktentwicklung werden beispielsweise Produktbaukästen als eine Art der Produktarchitekturgestaltung weit verbreitet als Basis zur Beherrschung der Variantenvielfalt eingesetzt [15]. Das bisher weniger verbreitete Pendant der Produktionsarchitektur wird maßgeblich von [15] getrieben und ist Gegenstand der folgenden Überlegungen.

Eine formalisierte Beschreibung der Produktion ist essenziell, um Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktion zu analysieren und implizit vorhandenes Lösungswissen festzuhalten. Produktionsarchitekturen können hier den Anforderungen an Standardisierung bei gleichzeitiger Flexibilität gerecht werden [15]. Um zudem quantitativen Zielen und Validierungsaspekten gerecht zu werden, ist eine parametrische Darstellung der Produktion nötig. So sind Ansätze zur Übertragung einer merkmalsbasierten Modellierung von Produkten – bei welcher sich die Systems Modeling Language (SysML) [16] etabliert hat – auf die Produktion denkbar. Um trotz der Vielseitigkeit der Systemlandschaft das Ziel eines unternehmensübergreifenden Systemabbilds zu erfüllen, ist die frühzeitige Integration von verschiedenen Stakeholdern bei der Erstellung einer Produktionsarchitektur erforderlich. Seitens des Produktionssystems existiert eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Strukturierung:

- Bei der Systemarchitektur nach [17]: Produkt-, Produktions-, Integrations- und IT-Systemebene
- Bei Methoden und Instrumenten des Produktionssystems nach [18]: Materialfluss, Bearbeitungs-, Personal-, Planungs- sowie Steuerungs- und Qualitätssystem
- Bei Komponenten des Produktionssystems nach [19]: menschliche Arbeit, Betriebs- und Ablauforganisation, Produktionstechnik und Funktionsbereiche des Unternehmens
- Bei Komponenten des Produktionssystems nach [20]: Räume, Energie, Informationen und Personal, Fertigungs-, Mess-, Lager- und Transportmittel
- Bei Systemebenen nach [21]: Arbeitsplatz/Zelle, Arbeitsplatzgruppe/Linie, Bereich/Abteilung, Werk/Fabrik und Produktionsnetzwerk

Eine zentrale Aufgabe bei der Modellierung der Systeme und der Formalisierung einer Architekturbeschreibung besteht somit in

der Beantwortung der Frage, aus welchen Bausteinen die Architektur aufgebaut wird.

## 4.2 Steuerung durch ganzheitliches Änderungsmanagement

Im Rahmen der Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Produktionssystem können eine Vielzahl an Änderungsfällen identifiziert werden. Die Reaktion auf solche Änderungen ist ein wichtiger Bestandteil einer flexiblen Produktionssteuerung. Unter dem Begriff „Änderungsfall“ wird in diesem Kontext das Auftreten eines Ereignisses verstanden, welches direkte oder indirekte Auswirkungen auf das Produkt-Produktions-Codesign und das betrachtete Gesamtsystem hat. Beispiele sind verbindliche regulatorische Vorgaben (etwa Abgasemissionen), die eine Produktanpassung (etwa Ottopartikelfilter) erfordern. Diese Änderung im Produktdesign beeinflusst wiederum das Produktionssystem. Neben solch planbaren Änderungen existiert auch eine Vielzahl an spontan auftretenden Änderungsfällen (zum Beispiel eine Absatzvolumenänderung durch den Kunden in der Angebotsphase). Die Formalisierung solcher Änderungsfälle erfordert somit eine parametrisierte Systembeschreibung (Kapitel 4.1).

Die vorgestellte Methode sieht zunächst die Identifikation von möglichen Änderungsfällen sowie das Vordenken von Möglichkeiten zum Clustering der Änderungsfälle vor. Solche Beispielcluster sind für unterschiedliche Ebenen und Abstraktions- oder Detailgrade denkbar. **Bild 3** gibt einen Überblick über mögliche Klassifizierungskriterien sowie deren Ausprägung beim Clustering von Änderungsfällen für produzierende Unternehmen.

Ausgehend von solch spezifischen Änderungsfällen ist eine ganzheitliche, systemübergreifende Auswirkungsanalyse der Änderungen notwendig. Die Bestimmung der Tragweite einer Änderung sowie die Beeinflussung der entsprechenden Subsysteme sind von zentraler Bedeutung und geben Aufschluss über die Komplexität der Auswirkungen sowie deren Absehbarkeit. Um einen Mehrwert zu generieren, ist es notwendig, direkte und indirekte Auswirkungen eines Änderungsfalles in dem soziotechnischen Handlungssystem transparent zu kommunizieren und an

Kriterium	Ausprägungen des Clustering-Kriteriums zur Einordnung der Änderungsfälle				
Scope	Unternehmens-extern	Unternehmensintern			
Supply Chain	Tier-X-Zulieferer	Unternehmen	Kunde	Endverbraucher	
Soziotechnisches System	Technisch	Organisational			
Produkt-Produktions-Codesign	Produktsystem	Produktionssystem			
Produkt	Funktion	Struktur	Anforderungen		
Produktion	Produktions-architektur (4.1)				
Situation	Absehbare Planungssituation	Spontane Notsituation			
Produktlebenszyklus	Einführung	Wachstum	Reife	Sättigung	Degeneration
Produktentstehungs-prozess	Produktplanung/ Technologieplanung	Produktentwicklung/ Prozessentwicklung	Produktionsplanung	Produktionsanlauf	Serienproduktion

**Bild 3.** Klassifizierungskriterien zum Clustering von auftretenden Änderungsfällen. Bild: wbk Institut für Produktionstechnik

den geeigneten Stellen in eindeutige Handlungsempfehlungen und Steuerungsaktionen zurückzuführen. Eine Tragweitenanalyse von initialen Änderungsfällen bildet die Grundlage zur Erstellung eines ganzheitlichen und modularen Kommunikationskonzepts, welches als Vorgehensmodell im Umgang mit auftretenden Änderungsfällen dienen soll. Dies ermöglicht eine zielgerichtete Empfehlung geeigneter Aktionen. Die flexible Reaktion auf spontane Änderungen resultiert schließlich in einer quantitativen Verbesserung von produktionsrelevanten Kennzahlen wie etwa Kosten, Zeit und Qualität.

### 4.3 Planung anhand von Lösungsmustern

In einem weiteren Schritt kann implizites Lösungswissen, das im Rahmen der Wechselwirkung zwischen Produkt- und Produktionssystem entsteht, anhand der eingeführten, parametrischen Systembeschreibung (Kapitel 4.1) formalisiert werden. Ein Lösungsmuster kann beispielsweise den Zusammenhang zwischen Produkteigenschaften wie Form, Gestalt, Material, Anforderungen, und Eigenschaften des Produktionssystems (zum Beispiel Layout, Technologie, Fähigkeit) beschreiben.

Die präsentierte Methode benutzt hierfür einen Katalog an Lösungsmustern. Der Katalog kann neben den Lösungsmustern selbst auch eine Systematik zur Bewertung der Güte eines Lösungsmusters enthalten. Anhand einer merkmalsbasierten Referenzarchitektur (Kapitel 4.1) und den identifizierten Lösungsmustern ist man in der Lage, historisches Wissen zu modularisieren und wiederzuverwenden. In planerischen Phasen, etwa bei der Einführung neuer Produkte, lässt sich anhand der zuvor identifizierten Produktionsmuster eine quantitative Bewertung möglicher Alternativen durchführen. Eine Selektion und Kombination von Lösungsmustern kann zu einer optimalen Lösung und damit zu Kosten- und Zeiteinsparungen führen.

### 4.4 Quantitative und qualitative Prüfung der Zielerreichung der Handlungsempfehlungen

Das Ergebnis der bisher vorgestellten Methodik sieht sowohl im Bereich des steuernden Änderungsmanagements (Kapitel 4.2) als auch für den planerischen Einsatz von Lösungsmustern (Kapitel 4.3) vor, spezifische Handlungsempfehlungen vorzulegen. Eine quantitative Prüfung hinsichtlich zuvor aufgestellter Anforderungen, wie der Reduktion der Time-to-Market, stellt die Bestimmung des Grades der Zielerreichung sicher. Mit dem Vorschlag einer qualitativen Prüfung sind die in Teilen nicht messbaren Auswirkungen der vorgestellten Methode auf die Arbeit des Menschen gemeint. Dieser profitiert etwa von der Formalisierung des implizit vorhandenen Wissens und von der lösungsmustergetriebenen Vorgehensweise.

## 5 Zusammenfassung

Die vorgestellte Methode beschreibt ein mögliches Vorgehen bei der Erstellung einer adaptiven Produktionsplanung und -steuerung. Produkt- und Produktionssystem werden aufgrund der zunehmenden Komplexität, die sich in komplexen System-of-Systems widerspiegelt, integriert betrachtet. Das geforderte Maß an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit wird durch den dargestellten Umgang mit kurzfristigen Änderungsfällen sowie einer Identifikation und den Einsatz von Lösungsmustern berücksichtigt.

Durch eine gemeinsame Entwicklung mit produzierenden Unternehmen können eine Praxistauglichkeit sowie die Übertragbarkeit im Kontext verschiedener Produkt- und Produktionscharakteristika sichergestellt werden.

### DANKSAGUNG

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ im Rahmen des Projekts „MoSyS – Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems“ (02J19B099) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

### Literatur

- [1] Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion. Heidelberg: Springer-Verlag 2016
- [2] Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014, S. 5–35
- [3] Maier, M. W.: Architecting principles for systems-of-systems. Systems Engineering – The Journal of The International Council on Systems Engineering 1 (1998) 4, pp. 267–284
- [4] Lanza, G.; Nyhuis, P.; Fisel, J. et al.: Wandlungsfähige, menschzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlage 2018
- [5] Lindemann, U.; Reichwald, R.: Integriertes Änderungsmanagement. Heidelberg: Springer-Verlag 1998
- [6] Spath, D. (Hrsg.): Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Studie. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2013
- [7] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München: Carl Hanser Verlag 2009
- [8] Kuster, J.; Huber, E.; Lippmann, R. et al.: Handbuch Projektmanagement. Heidelberg: Springer-Verlag 2011
- [9] Albers, A.: Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik. Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. In: Deutscher Konstrukteurtag – Entwicklung und Konstruktion im Strukturwandel. Düsseldorf: VDI Verlag 1994, S. 73–106
- [10] Koren, Y.: The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems. Hoboken, NJ: Wiley a John Wiley & Sons Inc 2010
- [11] Ashby, W. R.: An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall Ltd 1956
- [12] Ropohl, G.: Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik. s.l.: KIT Scientific Publishing 2009
- [13] Keating, C.; Rogers, R.; Unal, R. et al.: System of systems engineering. IEEE Engineering Management Review 36 (2008) 4, p. 62
- [14] Kurrle, A.; Albers, A.; Klingler, S.: The Connected Car – A system-of-systems: Exploration of challenges in development from experts view. In: Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wiedemann, J. (Hrsg.): 16. Internationales Stuttgarter Symposium. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016, pp. 1439–1450
- [15] Tücks, G.; Stoffel, M.: Die Kraft von Produktionsarchitekturen. Complexity Management Journal (2015) 3, S. 4–7
- [16] Object Management Group OMG: OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) Version 1.6. Stand: 2019. Internet: [www.omg.sysml.org](http://www.omg.sysml.org). Zugriff am 13.04.2021
- [17] Kolberg, D.; Hermann, J.; Mohr, F.: SmartFactoryKL Systemarchitektur für Industrie 4.0-Produktionsanlagen. Whitepaper SF-1.2. Kaiserslautern: Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V 2018
- [18] TCW: Schlanke Produktionssysteme. Methoden und Instrumente des Produktionssystems. Internet: [www.tcw.de/beratungsleistungen/produktion/produktionssysteme-86](http://www.tcw.de/beratungsleistungen/produktion/produktionssysteme-86). Zugriff am 13.04.2021
- [19] Kleinhempel, K.; Satzer, A.; Steinberger, V. et al.: Produktionssysteme mit Alternativen. bessere Arbeitsbedingungen gestalten. Düsseldorf: Ohrndorf Kommunikation GmbH 2011
- [20] Westkämper, E.: Produktionssysteme. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Einführung in die Organisation der Produktion. Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 195–234
- [21] Hoeschen, A.: Varianten, Preisdruck und Termine. Wie kann auch der Mittelstand den steigenden Anforderungen an Variantenvielfalt und Lieferzeiten gerecht werden? Aachen: Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, Fraunhofer IPT 2007



**Louis Schäfer**, M.Sc.  
Bild: Autor, wbk

**Laura Burkhardt**, B.Sc.

Dr.-Ing. **Andreas Kuhnle**

Prof. Dr.-Ing. **Gisela Lanza**  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe  
Tel. +49 1523 / 9502570  
[louis.schaefer@kit.edu](mailto:louis.schaefer@kit.edu)  
[www.wbk.kit.edu](http://www.wbk.kit.edu)

## Systematische Steigerung der Terminierungssicherheit durch Industrie-4.0-Ansätze

# Stufenmodell zur Steigerung der Termintreue

U. Dombrowski, M. Kaufmann, Y. Dix

Die Termintreue nimmt als produktionslogistische Zielgröße eine exponierte Stellung ein, da sie die Kundenzufriedenheit unmittelbar beeinflusst und Lieferterminabweichungen oftmals an Vertragsstrafen gebunden sind. Dieser Beitrag stellt ein Stufenmodell bereit, um die Terminierungssicherheit durch Integration von Ansätzen der Industrie 4.0 in die Durchlaufterminierung systematisch zu unterstützen.

### STICHWÖRTER

PPS (Produktionsplanung/-steuerung),  
Industrie 4.0, Digitalisierung

### Increase of adherence to schedules by Industrie 4.0

Adherence to schedules takes an exposed position as a production-logistic objective, as it directly influences customer satisfaction and delivery date deviations are often linked to contractual penalties. This paper provides a stage-model to support systematically the scheduling security by integrating Industrie 4.0 approaches into the scheduling process.

## 1 Einleitung

Die Termintreue wird in Umfragen von Industrieunternehmen regelmäßig als wichtigste produktionslogistische Zielgröße benannt [1, 2]. Sie dient als Kennzahl für die Einhaltung der zugesicherten (Kunden-)Liefertermine und beeinflusst damit unmittelbar die Kundenzufriedenheit. Bei entsprechender Vertragsgestaltung können Lieferterminabweichungen außerdem zu Vertragsstrafen führen. Die Voraussetzung einer hohen Termintreue ist eine valide Durchlaufterminierung, die auf Grundlage des anvisierten Liefertermins die einzelnen Arbeitsvorgänge zeitlich plant und damit über die Produktionsfreigabe von Aufträgen entscheidet. Die Verlässlichkeit dieser Planung wird maßgeblich durch die Prognosegenauigkeit zukünftiger Durchlaufzeiten bestimmt, auf deren Grundlage die Durchlaufterminierung vorgenommen wird.

Der vorliegende Beitrag zeigt die relevanten Zusammenhänge für die Steigerung der Termintreue durch die Durchlaufterminierung auf und diskutiert auf dieser Grundlage beschriebene Potenziale durch Industrie-4.0-Ansätze. Im Ergebnis wird ein Stufenmodell vorgestellt, das die systematische Steigerung der Terminierungssicherheit, das heißt, die Validität der Durchlaufterminierung, durch Integration von Ansätzen der Industrie 4.0 in die Durchlaufterminierung beschreibt.

## 2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung

Die Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) besteht darin, die Auslieferung von Kundenbestellungen in der nachgefragten Menge und zum vereinbarten Termin sicherzustellen.

len [3]. Unter dieser Zielsetzung sind die Produktionsprozesse mengen-, termin- und kapazitätsbezogen zu planen und zu steuern [4, 5]. Die Zusammenhänge der PPS werden durch den Regelkreis der PPS ganzheitlich beschrieben. Dieser ist in **Bild 1** dargestellt.

Die PPS-Aufgaben und -Verfahren bilden den Regler der PPS (Funktion: regeln), indem die Soll-Werte der Zielgrößen sowie die Kundenbedarfe in Plan-Werte für Beschaffungs-, Fertigungs-, Montage- und Distributionsaufträge überführt werden. Die Plan-Werte stellen die Grundlage für die Durchführung der Beschaffungs-, Fertigungs-, Montage- und Distributionsprozesse dar. Über die Betriebsdatenerfassung werden die Ist-Werte der durchgeführten Prozesse erhoben (Funktion: messen). Im Rahmen des logistischen Controllings werden die Ist-Werte den Plan-Werten gegenübergestellt, sodass die Identifikation und Analyse von Abweichungen ermöglicht wird (Funktion: auswerten). Unter der Zielsetzung, eine minimale Soll-Ist-Abweichung zu realisieren, erfolgt auf Grundlage der Abweichungsanalyse eine Anpassung der PPS-Aufgaben und -Verfahren [6].

Eine zentrale Zielgröße, die durch den beschriebenen Regelungsprozess beeinflusst wird, ist die Termintreue. Sie beurteilt auf Grundlage der Terminabweichung den prozentualen Anteil termintreuer Aufträge innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums. Ein Auftrag gilt als termintreu, wenn seine Terminabweichung innerhalb eines definierten Termintoleranzfensters liegt [7]. Die Terminabweichung beschreibt die Abweichungen des Ist-Termins gegenüber dem Soll-Termin und kann sowohl positive (verspätet) als auch negative (verfrüht) Werte annehmen [8]. Die Auswertung der Termintreue wird in der Regel auf den kompletten Auftragsdurchlauf bezogen, um die Termineinhaltung gegenüber dem zugesicherten Kundenliefertermin zu messen.



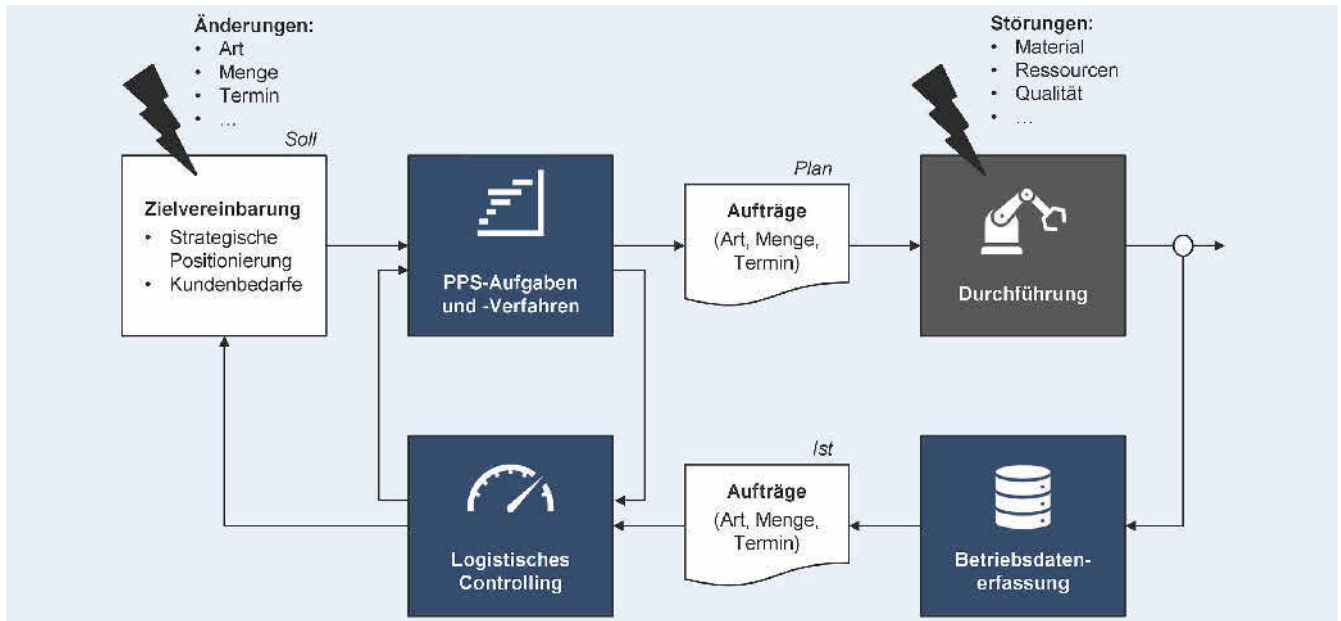


Bild 1. Regelkreis der PPS. Bild: nach [6]

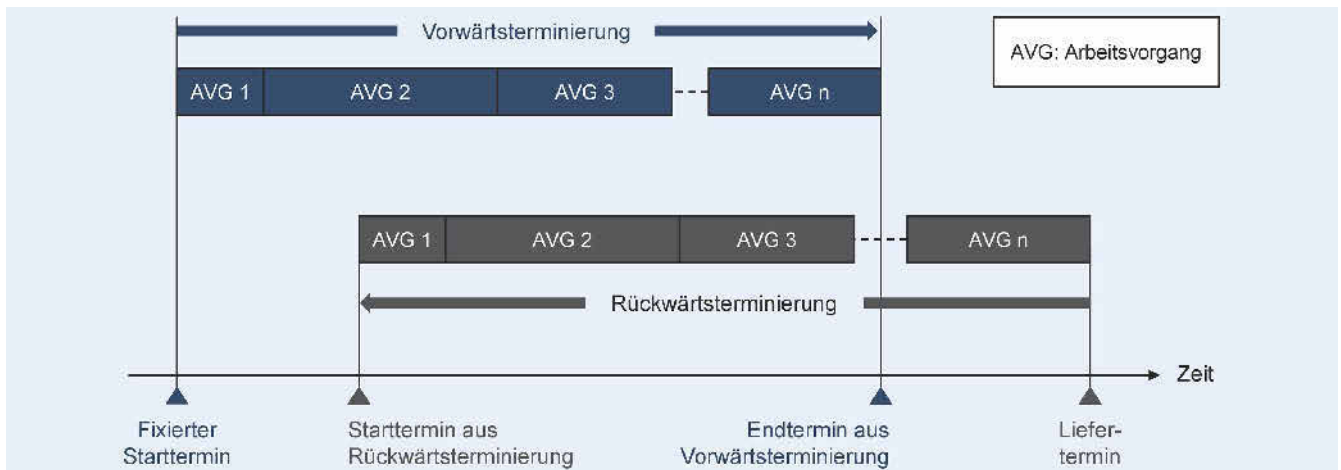


Bild 2. Verfahren der Durchlaufterminierung. Bild: [3]

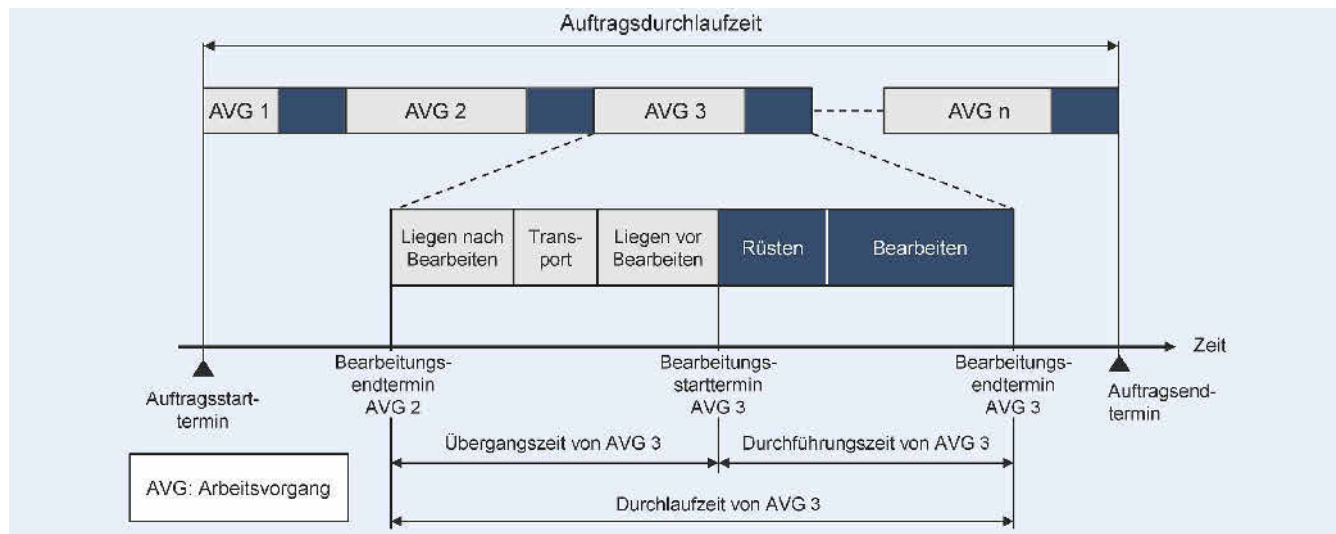
### 3 Zusammenhang von Termintreue und Durchlaufterminierung

Die Termintreue wird maßgeblich durch die Planungsgenauigkeit der Durchlaufterminierung determiniert, die der Termin- und Kapazitätsplanung zuzuordnen ist. Das Ergebnis der Durchlaufterminierung legt fest, zu welchem Zeitpunkt ein Auftrag gestartet werden muss, sodass der vorgegebene Kundenliefertermin eingehalten wird. Hierzu werden die einzelnen Arbeitsvorgänge (AVG) des zu beplanenden Auftrags in zeitlicher Abfolge aneinandergereiht und terminiert [3].

Für die Terminierung der Start- sowie Endtermine der einzelnen Arbeitsvorgänge, wird zwischen drei Verfahren unterschieden. Die Rückwärtsterminierung bestimmt ausgehend vom geplanten Liefertermin die spätestmöglichen Starttermine der Arbeitsvorgänge, sodass der Kundenliefertermin eingehalten wird. Die Vorwärtsterminierung ermittelt auf Grundlage eines fixierten Auftragsstarttermins die frühestmöglichen Endtermine der Ar-

beitsvorgänge. Die Mittelpunktsterminierung stellt eine Kombination der beiden Terminierungslogiken dar, indem der Starttermin eines Arbeitsvorganges auf einer Engpassressource fixiert wird. Ausgehend von dieser Fixierung werden die vorhergehenden Arbeitsvorgänge rückwärts- und die nachfolgenden Arbeitsvorgänge vorwärtsterminiert [9]. Eine schematische Darstellung der Durchlaufterminierung sowie die daraus resultierenden Zeitpunkte sind am Beispiel der Vorwärts- und Rückwärtsterminierung in **Bild 2** dargestellt. Da die Mittelpunktsterminierung eine Kombination beider Terminierungslogiken darstellt, wird auf eine gesonderte Darstellung verzichtet.

Die Durchlaufterminierung bedarf einer Abschätzung der arbeitsvorgangsbezogenen Durchlaufzeiten (Plan-Durchlaufzeiten), die in **Bild 2** durch die Länge der entsprechenden Planungselemente berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges ist zwischen der Übergangszeit und der Durchführungszeit zu unterscheiden [10]. Die Übergangszeit beschreibt die Dauer zwischen dem Bearbeitungsendtermin des vor-



**Bild 3.** Zeitanteile der arbeitsvorgangsbezogenen Durchlaufzeit. Bild: nach [11]

herigen Arbeitsvorganges und dem Bearbeitungsstarttermin des betrachteten Arbeitsvorganges und setzt sich aus den Zeitanteilen Liegen nach Bearbeiten, „Transport“ sowie „Liegen vor Bearbeiten“ zusammen. Die Durchführungszeit entspricht der Zeit zwischen dem Bearbeitungsstarttermin und dem Bearbeitungs-endermin eines Arbeitsvorganges und subsummiert die Zeitanteile „Rüsten“ und „Bearbeiten“ [11]. Die Zeitanteile der arbeitsvorgangsbezogenen Durchlaufzeit sind in **Bild 3** visualisiert.

Durchführungszeiten für gleiche Arbeitsumfänge sind statisch und daher gut planbar. Die Bestimmung von Übergangszeiten ist hingegen herausfordernd, da sich diese in Abhängigkeit des aktuellen Umlaufbestands dynamisch entwickeln [12]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Liegezeitanteile davon abhängig sind, wie viele Aufträge zum betrachteten Zeitpunkt auf ihren Transport („Liegen nach Bearbeiten“) respektive ihren Bearbeitungsstart („Liegen vor Bearbeiten“) warten. Desto mehr Aufträge um die gleiche Ressource konkurrieren, desto größer wird die Übergangszeit. Unter der Annahme von weitestgehend statischen Durchführungszeiten führt dieser Zusammenhang zu einer positiven Korrelation zwischen Umlaufbestand und Durchlaufzeit beziehungsweise Übergangszeit. Dies wird durch das sogenannte Trichtermodell wissenschaftlich belegt [12].

In Bezug auf die Durchlaufterminierung führt eine Unterschätzung von Plan-Übergangszeiten dazu, dass zu niedrige Durchlaufzeiten eingeplant werden und die entsprechenden Aufträge infolgedessen zu spät gestartet werden. Aus zu spät gestarteten Aufträgen resultieren oftmals verspätete Fertigstellungen und somit Lieferterminverzögerungen. Eine Überschätzung von Plan-Übergangszeiten führt dazu, dass Aufträge zu früh gestartet und infolgedessen zu früh fertiggestellt werden. Dies resultiert in einer Bestandsbildung und damit in höheren Kapitalbindungskosten sowie verlängerten Durchlaufzeiten [13].

Die Festlegung von Plan-Übergangszeiten kann durch sogenannte Produktionskennlinien vorgenommen werden, wobei die Qualität der verwendeten Plan-Zeiten in der betrieblichen Praxis als unbefriedigend beschrieben ist [12]. Im Rahmen dieses Beitrags soll daher ein praxistaugliches Stufenmodell vorgestellt werden, das die Festlegung von Plan-Übergangszeiten durch Integration von Industrie-4.0-Ansätzen beschreibt, um die Terminierungssicherheit systematisch zu steigern.

## 4 Potenziale zur Steigerung der Terminierungssicherheit durch Ansätze der Industrie 4.0

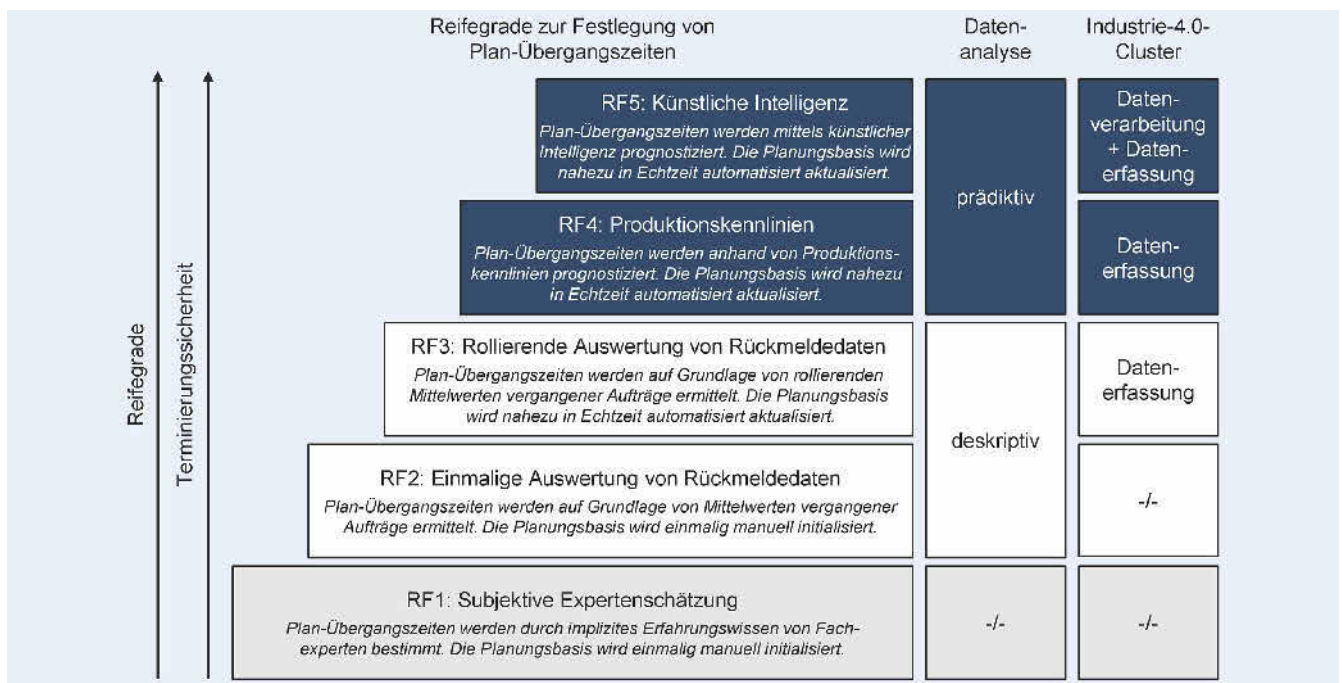
Die Vision der Industrie 4.0 beschreibt die „echtzeitfähige, intelligente und digitale Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten zum Management von Unternehmensprozessen und Wertschöpfungsnetzwerken“ [14]. Die Umsetzung dieser Vision verspricht insbesondere in produzierenden Unternehmen weitreichende Potenziale zur Effizienzsteigerung, indem Bestands-, Logistik- und Komplexitätskosten signifikant reduziert werden [15]. Grundlage hierfür bildet eine echtzeitnahe Planung und Steuerung des Wertschöpfungsprozesses [16]. Aktuelle Studien belegen, dass Ansätze der Industrie 4.0 für sämtliche Bereiche der PPS, das heißt für die Betriebsdatenerfassung, das logistische Controlling und für die PPS-Aufgaben und -Verfahren, Potenziale bieten [1].

Die Potenziale zur Steigerung der Terminierungssicherheit durch Ansätze der Industrie 4.0 werden durch Beiträge in der einschlägigen Literatur belegt und mitunter ausführlich beschrieben. Die **Tabelle** verschafft hierüber einen Überblick. Zwecks nachfolgender Referenzierung werden die aufgeführten Beiträge den beiden Industrie-4.0-Potenzialclustern „Datenerfassung“ und „Datennutzung“ zugeordnet.

Die in der Literatur beschriebenen Ansätze weisen im Wesentlichen zwei Potenziale durch Industrie-4.0-Ansätze für die Steigerung der Terminierungssicherheit auf. Einerseits versprechen die beschriebenen Ansätze eine bessere Datenerfassung im Rahmen der Betriebsdatenerfassung, welche auf neue technologische Möglichkeiten zur automatisierten Datenerfassung im Wertschöpfungsprozess zurückzuführen sind [16, 17]. In Form einer regelmäßigen Aktualisierung der Planungsdaten, wirken diese Ansätze mittelbar auf die Terminierungssicherheit [18]. Weiterhin wird das Potenzial einer besseren Datennutzung beschrieben, welches insbesondere durch Ansätze des Data Minings eröffnet wird und unmittelbar auf die Terminierungssicherheit wirkt. Dabei ist zwischen deskriptiven (beschreibenden) und prädiktiven (prognostischen) Ansätzen zu unterscheiden. Deskriptive Ansätze werden unter anderem genutzt, um Einflussfaktoren auf die Termintreue datenbasiert zu analysieren [19]. Prädiktive An-

**Tabelle.** Potenziale von Industrie-4.0-Ansätzen für die Steigerung der Terminierungssicherheit.

Ansatz / Potenzial	Industrie-4.0-Potenzialcluster	Quelle
Kontinuierliche Rückmeldung der Ist-Durchführungszeiten	Datenerfassung	[16]
Kontinuierliche Bestandsaufzeichnung einzelner Artikel	Datenerfassung	[17]
Regelmäßige Aktualisierung der Planungsdaten auf Grundlage ausgewerteter Ist-Zeiten	Datennutzung	[18]
Identifikation von Einflussfaktoren auf die Termintreue durch Data-Mining-Verfahren	Datennutzung	[19]
Vergleich unterschiedlicher Data-Mining-Ansätze zur Durchlaufzeitprognose	Datennutzung	[20]
Prognose von Durchlaufzeiten durch Data-Mining-Verfahren in der Auftragsfertigung	Datennutzung	[21]
Dreistufiges Konzept zur Festlegung von Übergangszeiten mittels Data-Mining-Verfahren	Datennutzung	[22]
Prognose von Übergangszeit durch Data-Mining-Verfahren in der Werkstattfertigung	Datennutzung	[23]



**Bild 4.** Stufenmodell zur systematischen Steigerung der Terminierungssicherheit. Bild: IAP

sätze ermöglichen darüber hinaus die Prognose von Kennzahlen, wie etwa Durchlauf- oder Übergangszeiten [20 – 23]. Da die Ansätze der Datennutzung eine hinreichend gute Datenbasis bedingen, bauen die damit verbundenen Potenziale auf einer besseren Datenerfassung auf.

## 5 Reifegrade zur systematischen Steigerung der Terminierungssicherheit

Auf Grundlage der beschriebenen Potenziale und bestehenden Ansätze wird nachfolgend ein Stufenmodell zur systematischen Steigerung der Terminierungssicherheit durch Integration von Industrie-4.0-Ansätzen unter Berücksichtigung produktionslogistischer Abhängigkeiten vorgestellt. Das Stufenmodell ist in **Bild 4** dargestellt und zeigt fünf aufeinander aufbauende Reifegrade (RF) mit zunehmender Terminierungssicherheit.

### 5.1 RF1: Subjektive Experteneinschätzung

In der ersten Stufe werden Plan-Übergangszeiten einmalig auf Grundlage von implizitem Expertenwissen von einem oder mehreren Prozessbeteiligten festgelegt. Dieser Reifegrad ist von einer hohen Subjektivität geprägt, da Plan-Übergangszeiten durch „Bauchgefühle“ anstelle von objektiven Ist-Übergangszeiten bestimmt werden. Folglich weist dieser Reifegrad die niedrigste Terminierungssicherheit auf.

### 5.2 RF2: Einmalige Datenauswertung

Anstelle von subjektiven Expertenschätzungen werden Plan-Übergangszeiten auf Basis von vergangenen Ist-Übergangszeiten manuell bestimmt. Bei dieser deskriptiven Datennutzung werden Mittelwerte gebildet und zur Planung zukünftiger Plan-Übergangszeiten genutzt. Eine Auswertung erfolgt einmalig bei der Initialisierung der Durchlaufterminierung. Die sich typischerweise im Laufe der Zeit ändernden Produktionsbedingungen

werden mangels fortlaufender Aktualisierung der Plan-Werte nicht berücksichtigt, sodass die Gefahr einer zunehmenden Diskrepanz zwischen Plan-Übergangszeiten und Ist-Übergangszeiten besteht.

### 5.3 RF3: Rollierende Datenauswertung

In der dritten Reifegradstufe werden die mittleren Plan-Übergangszeiten je Arbeitssystem auf Grundlage der entsprechenden Ist-Übergangszeiten in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Die rollierende Aktualisierung bietet den Vorteil, dass Änderungen im Produktionssystem (zum Beispiel Layoutänderungen, Änderungen der Materialbereitstellung) durch Auswertung der Ist-Daten erfasst und in zukünftige Plan-Daten überführt werden. Die Realisierung der rollierenden Datenauswertung erfordert eine lückenlose und fehlerfreie Erfassung der Bearbeitungsstart- und Bearbeitungsendtermine, um auf dieser Grundlage die Ist-Übergangszeiten zu ermitteln. Zu diesem Zweck empfiehlt sich der Einsatz von Industrie-4.0-Ansätzen zur automatisierten und echtzeitnahen Datenerfassung. Dabei ist insbesondere die RFID-Technologie, die eine sichtkontaktlose Identifikation von Objekten erlaubt, oder Real Time Locating Systeme (RTLs), welche die räumliche Ortung von Objekten im Raum ermöglicht, hervorzuheben.

### 5.4 RF4: Produktionskennlinien

Durch das Konzept der Produktionskennlinien wird unter anderem die Übergangszeit eines Arbeitssystems als Funktion des Bestandes modellbasiert beschrieben [12]. In den vorherigen Reifegradstufen wird die Abhängigkeit der Übergangszeit vom Bestand ignoriert, indem jeweils mittlere vergangene Übergangszeiten herangezogen werden. In Reifegradstufe vier wird die Plan-Übergangszeit in Abhängigkeit des aktuellen Bestandsniveaus des Arbeitssystems ermittelt. Ferner ist es möglich, die Übergangszeiten für ein in der Zukunft erwartetes Bestandsniveau festzulegen. Die Umsetzung erfordert eine hohe Datenqualität hinsichtlich der Ist-Situation des Produktionssystems (zum Beispiel Bestandsniveau der Arbeitssysteme) sowie eine entsprechende Verarbeitung dieser Daten mittels produktionslogistischer Modelle. Folglich sind Industrie-4.0-Ansätze zur automatisierten Datenerfassung (vergleiche RF3) zu implementieren. Um eine echtzeitnahe Datenvisualisierung zu ermöglichen, sind insbesondere Business Intelligence Tools hervorzuheben. Diese Tools bieten das Potenzial, das Bestandsniveau der Arbeitssysteme echtzeitnah zu visualisieren und die Plan-Übergangszeiten durch Implementierung der entsprechenden Berechnungsvorschriften automatisiert zu ermitteln. Durch die fortlaufende Aktualisierung der Plan-Daten wird die Terminierungssicherheit gesteigert.

### 5.5 RF5: Künstliche Intelligenz

Während die Plan-Übergangszeiten in der vierten Reifegradstufe auf Basis des aktuellen, das heißt zum Zeitpunkt der Planung vorliegenden, Bestandsniveaus bestimmt werden, basiert die Ermittlung der Plan-Übergangszeiten in dieser Reifegradstufe auf der Prädiktion zukünftiger Bestände. Dazu wird das zukünftige Bestandsniveau des jeweils zu beplanenden Arbeitssystems unter Berücksichtigung des Produktionsprogramms prognostiziert, um die erwartete Übergangszeit zu ermitteln. Dieser Ansatz wirkt der

Problematik der zeitpunktbezogenen Planung im Rahmen von Reifegradstufe vier entgegen. Aufgrund des Zeitverzugs zwischen Planungszeitpunkt und Auftragsbearbeitung können signifikante Bestandsänderungen auftreten, sodass die Übergangszeiten, die zum Zeitpunkt der Planung vorliegen, erheblich von den zukünftigen Ist-Übergangszeiten abweichen. Für die Prognose zukünftiger Bestände sind Prädiktionsalgorithmen der Künstlichen Intelligenz prädestiniert. Ihre Eignung im Produktionsumfeld für vergleichbare Zielsetzungen wurde bereits nachgewiesen [20 – 23]. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist eine hinreichend gute Datenbasis (vergleiche RF3). Für die Datenverarbeitung und -visualisierung bieten sich erneut Business Intelligence Tools an (vergleiche RF4), welche die Integration von Prädiktionsmethoden über entsprechende Add-ins ermöglichen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird die Relevanz von Plan-Durchlaufzeiten für die Erreichung einer hohen Termintreue aufgezeigt und die aktuelle Problematik in Bezug auf die Bestimmung von Plan-Übergangszeiten thematisiert. Zur Steigerung der Terminierungssicherheit wird ein Stufenmodell vorgestellt, das Unternehmen bei der sukzessiven Integration von Ansätzen der Industrie 4.0 in den Planungs- und Wertschöpfungsprozess unterstützt. In weiteren Forschungsarbeiten werden die einzelnen Reifegradstufen hinsichtlich der technischen Umsetzung sowie die prozessuale Integration weiter detailliert und konkretisiert. Die praktische Umsetzung sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in weiteren Publikationen veröffentlicht.

### Literatur

- [1] Dombrowski, U.; Sandler, M. (Hrsg.): PPS 4.0: Wozu den Auftragsabwicklungsprozess digitalisieren? Aachen: Shaker Verlag 2019
- [2] Nyhuis, P. (Hrsg.): Aktuelle Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Garbsen: PZH-Verlag 2016
- [3] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. München: Hanser-Verlag 1997
- [4] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3. Berlin: Springer-Verlag 2002
- [5] Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg-Verlag 2012
- [6] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser-Verlag 2014
- [7] Löffing, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Berlin: Springer-Vieweg-Verlag 2016
- [8] Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Dissertation, Universität Hannover, 1988
- [9] Mertens, P.: Integrierte Informationsverarbeitung 1. Wiesbaden: Springer-Gabler-Verlag 2013
- [10] Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation, Universität Hannover, 1980
- [11] Heinemeyer, W.: Die Analyse der Fertigungsdurchlaufzeit im Industriebetrieb. Dissertation, Universität Hannover, 1974
- [12] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Berlin: Springer Vieweg 2012
- [13] Plossl, G. W.: Manufacturing Control. New York: Reston 1973
- [14] Dombrowski, U.; Richter, T.: Supplementing Lean Production Systems with Information and Communication Technologies, International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Seoul/Republic of Korea, 27. – 30.06.2016, pp. 654–661
- [15] Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer-Vieweg-Verlag 2014, S. 5–35



- [16] Nyhuis, P.; Mayer, J.; Kuprat, T.: Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle. In: Kersten, W.; Koller, H.; Lödding, H. (Hrsg.): Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Berlin: GITO-Verlag 2014, S. 79–100
- [17] Schmidt, M. et al.: Potenziale der Digitalisierung für die Aufgaben der PPS. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser-Verlag 2017, S. 34–45
- [18] Schuh, G.; et al.: Entscheidungsunterstützung in einer cyberphysischen Produktionssteuerung. In: Schuh, G. (Hrsg.): ProSense – Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik. Aachen: Apprimus-Verlag 2015, S. 82–119
- [19] Veigt, M. et al.: Data Analytics in der Produktionsplanung. wt Werkstattstechnik online 109 (2019) 4, S. 230–234. Düsseldorf: VDI-Verlag
- [20] Backus, P. et al.: Factory Cycle-Time Prediction With a Data-Mining Approach. In: IEEE (Hrsg.): IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 19 (2006) 2, pp. 252–258
- [21] Öztürk, A.; Kayaligil, S.; Özdemirel, N. E.: Manufacturing lead time estimation using data mining. European Journal of Operational Research 173 (2006), pp. 683–700
- [22] Schuh, G. et al.: Databased prediction of order-specific transition times. CIRP Annals – Manufacturing Technology 68 (2019), pp. 467–470
- [23] Schuh, G. et al.: Databased prediction and planning of order-specific transition times, 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems, Chicago/USA, July 1 – 3, 2020, pp. 885–890



Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Uwe Dombrowski**  
Bild: IAP GmbH

**Michael Kaufmann**, M. Sc.

**Yannick Dix**, M. Sc.

Technische Universität Braunschweig / IAP GmbH  
Rebenring 37, 38106 Braunschweig  
Tel. +49 531 / 23835-0  
info@iap.eu  
www.iap.eu

## Selbstoptimierende Reihenfolgebildung in der Werkstattfertigung durch bestärkendes Lernen

# Selbstoptimierende Reihenfolgebildung in der Fertigung

B. Denkena, M.-A. Dittrich, S. Fohlmeister

Konventionelle Ansätze der Reihenfolgebildung basieren zumeist auf regelbasierten Heuristiken und erfordern bei Systemänderungen manuelle Anpassungen. Dieser Beitrag stellt einen Ansatz zur dezentralen Reihenfolgebildung mittels „Deep Q-Learning“ vor. Durch die Berücksichtigung verschiedener Fertigungskennzahlen für die Bewertung wird die automatisierte Anpassung der Reihenfolgebildung an das Fertigungssystem und eine Verringerung der Durchlaufzeit erreicht.

### STICHWÖRTER

PPS (Produktionsplanung und -steuerung),  
Künstliche Intelligenz (KI), Industrie 4.0

### Intelligent order sequencing in manufacturing

Conventional approaches for order sequencing are usually put into practice by rule-based heuristics, requiring manual adjustments if changes to the production system occur. This article presents an approach for decentralized sequencing using deep q-learning. By considering different production key figures for evaluation, the sequencing can be adapted automatically to changes of the production system, thus achieving a reduction of the cycle time.

## 1 Einleitung

Vor allem Auftragsfertiger sind angesichts hohen Zeitdrucks und zunehmender Produktvielfalt auf den effizienten Einsatz ihrer Fertigungskapazitäten angewiesen [1]. Durch kurzfristige Auftragseingänge kommt der Fertigungssteuerung eine besondere Bedeutung zu, da hier echtzeitnah regelnde Eingriffe möglich sind. Gerade mit Blick auf termingebundene Aufträgen ist die Reihenfolgebildung eine elementare Teilaufgabe der Fertigungssteuerung [2].

Die meisten der nach Stand des Wissens bekannten Methoden der Reihenfolgebildung basieren auf echtzeitfähigen Prioritätsregeln. Diese werden aus Kennzahlen ermittelt und jedem Auftrag zugeordnet [3]. Während einfache Reihenfolgeregeln auf einzelnen Kennzahlen basieren, berücksichtigen komplexe Regeln gewichtete Kennzahlen [4]. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist aber die geringe Flexibilität bei variierenden Systemzuständen, wie beispielsweise Auslastungsschwankungen. In solchen komplexen Anwendungsfällen werden Metaheuristiken verwendet, die für jeden einzelnen Systemzustand annähernd optimale Reihenfolgen finden [5, 6]. Dieses Vorgehen ist jedoch in der Regel zeitintensiv, da jede Entscheidung auf einem individuellen Optimierungsprozess basiert [7].

Vor diesem Hintergrund birgt die Digitalisierung durch Implementierung von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) Optimierungspotenziale, indem physische Fertigungskomponenten mit digitalen Softwareeinheiten zur intelligenten Datenverarbeitung verknüpft werden. Für die Fertigungssteuerung können CPPS softwaretechnisch durch Multiagentensysteme (MAS) um-

gesetzt werden [8, 9]. Ein solches System umfasst mehrere Softwareagenten, die etwa Maschinen und Aufträge repräsentieren. Diese Agenten können dezentral Daten erfassen, Entscheidungen treffen und deren Ausführung initiieren [10]. Durch die lokale Begrenzung von Entscheidungsproblemen und die Reduzierung des Datenaustausches mit zentralen Systemen erreicht ein solches System eine nahezu echtzeitfähige Entscheidungsfindung.

Mit dem Ziel einer echtzeitnahen Optimierung kann die Reihenfolgebildung als Markow-Entscheidungsprozess (MDP) modelliert werden. Hierzu müssen alle möglichen Zustände  $s_t$  des Fertigungssystems zu jedem Zeitpunkt  $t$  als eine sequenzielle Zustandskette dargestellt werden können. Die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen jedem Übergang zu  $s_{t+1}$  darf außerdem nur von der Zustandsinformation  $s_t$  abhängen, sodass vorherige Zustände nicht relevant sind [11]. Dies ist für die Reihenfolgebildung erfüllt, da die Menge der Aufträge durch die Bearbeitung diskret verändert wird und, eine entsprechende Datenerfassung vorausgesetzt, alle notwendigen Daten zum Zeitpunkt  $t$  zur Verfügung stehen.

Ein MDP kann durch bestärkendes Lernen optimiert werden. Dazu wird jede Entscheidung  $a_t$  mit einer Belohnungsfunktion  $r_t$  und den um  $\gamma$  diskontierten erwarteten zukünftigen Belohnungen bis zum Ende einer Trainingsepisode bewertet. Anhand eines iterativen Prozesses wird die geschätzte Bewertung jeder Aktion mit der Lernrate  $\alpha$  aktualisiert [12]. Um die Ausbildung lokaler Optima zu vermeiden, entsprechen die Entscheidungen mit Wahrscheinlichkeit  $1-\epsilon$  der geeignetsten Aktion. Die übrigen Entscheidungen werden mit Wahrscheinlichkeit  $\epsilon$  zufällig getroffen, um lokale Optimierungstendenzen zu vermeiden (Bild 1).

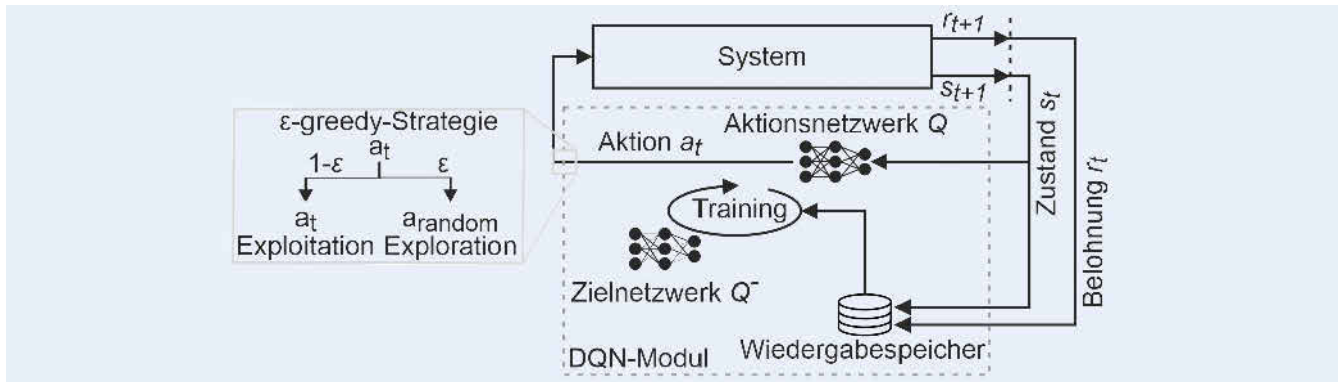


Bild 1. Methode des „Deep Q-Learning“ Bild: IFW

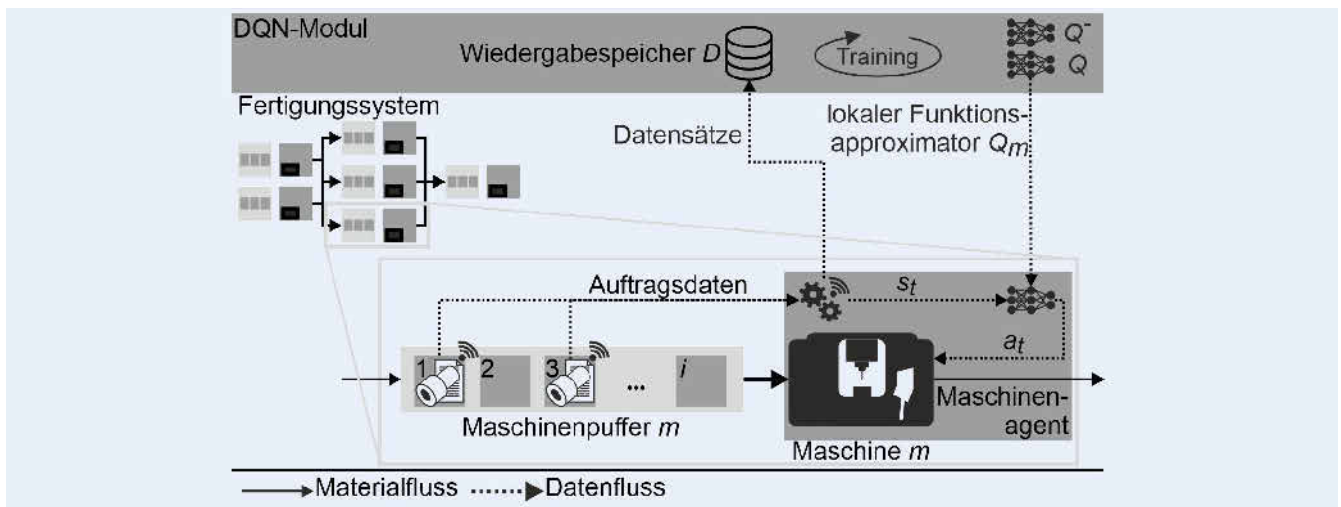


Bild 2. Dezentrale Reihenfolgebildung als Teilaufgabe der Fertigungssteuerung Bild: IFW

Um auch bei komplexen Optimierungsproblemen ein stabiles Lernverhalten zu gewährleisten, entwickelten Mnih et al. das „Deep Q-Learning“. Hier wird der aus jeder Entscheidung resultierende Datensatz  $(s_t, s_{t+1}, a_t, r_t)$  für die letzten  $N$  Zustände im Wiedergabespeicher  $D$  gespeichert. Der iterative Optimierungsprozess wird durch ein künstliches neuronales Netz als Funktionsapproximator realisiert. Hierbei wird die erwartete Belohnung mit der Funktion  $Q(s_t, a_t; \theta)$  geschätzt. Die zugehörigen Netzparameter  $\theta$  werden gemäß der Verlustfunktion nach Gleichung 1 anhand des Gradientenabstiegsverfahrens mit einer Stichprobe  $j$  aus  $D$  optimiert. Dabei beschreibt  $y_j$  die mittels eines Zielnetzes  $Q^-$  mit Netzparametern  $\theta^-$  berechnete maximale Belohnung [12].

$$L_j = [y_j - Q(s_j, a_j; \theta)]^2 \quad (1)$$

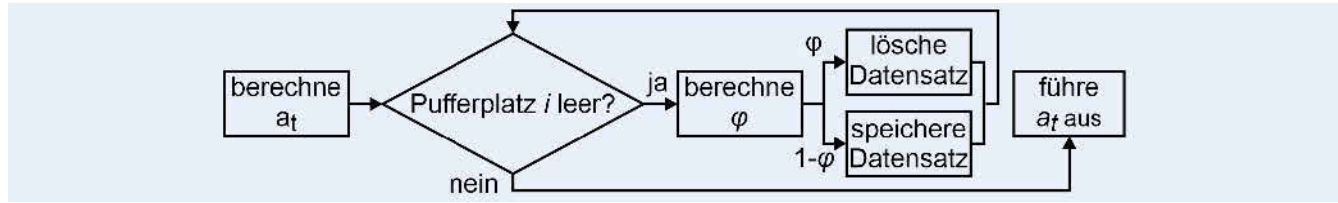
Der Stand der Forschung zeigt, dass konventionelle Methoden zur Reihenfolgebildung je nach Ausprägung Defizite hinsichtlich Flexibilität oder Rechenzeit aufweisen. Diese können durch eine Modellierung als MDP und eine erfahrungsbasierte Entscheidungsoptimierung durch bestärkendes Lernen behoben werden. Das Potenzial dieses Ansatzes zeigten bereits Altenmüller et al. und Kuhnle et al. [13, 14]. Diese beschränken sich aber im Wesentlichen auf Prozesse der Intralogistik und nicht auf die eigentliche Bearbeitungsfolge, beziehungsweise basieren im Gegensatz zu CPPS auf einer zentralen Dateninfrastruktur. Daher wird in diesem Beitrag eine Methode für die Implementierung einer

selbstoptimierenden, dezentralen Reihenfolgebildung als Erweiterung der in [15] dargestellten Methode vorgestellt.

## 2 Integration in die Fertigungssteuerung

Die Methode zur dezentralen und selbstoptimierenden Reihenfolgebildung wird gemäß Bild 2 in die Fertigungssteuerung integriert. Dabei wird jede Maschine  $m$  mit dem zugehörigen Wartepuffer mit  $i$  Pufferplätzen als eine dezentrale Einheit betrachtet. Diese werden, ebenso wie die Aufträge, durch Softwareagenten repräsentiert, welche die Fertigungsdaten über Sensoren erfassen, untereinander kommunizieren und auf dieser Grundlage Steuerungsentscheidungen treffen. Hierzu ist in jedem Agenten ein lokaler Funktionsapproximator  $Q_m$  hinterlegt. Demgegenüber werden das erfahrungsbasierte Training sowie der Wiedergabespeicher in einem zentralen Deep-Q-Learning-Modul (dqn-Modul) implementiert.

Sobald eine Reihenfolgebildung notwendig ist, fordert der Maschineneagent die relevanten Daten von den Auftragsagenten im Wartepuffer an. Anschließend werden diese zu einem Zustandsvektor vorverarbeitet und es wird durch  $Q_m$  die geeignetste Aktion  $a_t$  berechnet, die den nächsten Auftrag definiert. Sobald dieser Auftrag bearbeitet ist, wird die Reihenfolgebildung erneut ausgeführt. Auf diese Weise wird eine rollierende Reihenfolgebildung ermöglicht.



**Bild 3.** Methode für die Filterung von identischen Datensätzen. Bild: IFW

Während zum Zweck der Echtzeitfähigkeit die Entscheidungsfindung dezentral an der Maschine durchgeführt wird, ist die Optimierung in dem zentralen dqn-Modul implementiert. Somit entfällt die Begrenzung durch lokale Rechenkapazitäten und für jede Maschine können Erfahrungswerte der anderen Maschinen berücksichtigt werden. Dazu werden die Erfahrungsdaten aller Maschinen in einem zentralen Wiedergabespeicher  $D$  gespeichert. Der Funktionsapproximator  $Q$  wird dann kontinuierlich mit diesen Daten trainiert. Der lokale Funktionsapproximator  $Q_m$  der Maschinen wird in regelmäßigen, manuell festgelegten Intervallen aktualisiert.

### 3 Modellierung des Optimierungsprozesses

Wegen der hohen Approximationsfähigkeit für Mustererkennung und Entscheidungsfindung [16] basiert die Optimierung auf einem künstlichen neuronalen Netz mit einer verdeckten Schicht und einer vollverknüpften Feedforward-Struktur. Die Aktivierung der Neuronen erfolgt für eine hohe Robustheit gegenüber dem Problem verschwindender Gradienten durch eine ReLU (Rectified Linear Unit)-Funktion [17]. Die Ausgangsneuronen werden linear aktiviert, um eine korrekte Schätzung der Belohnung zu ermöglichen.

Der für die Entscheidungsfindung nötige Zustandsvektor  $s_{t,m}$  beschreibt den Zustand der Aufträge im Wartepuffer einer Maschine  $m$  zum Zeitpunkt  $t$ . Durch die Verwendung eines künstlichen neuronalen Netzes muss der Zustandsvektor für jeden möglichen Zustand die gleiche Dimension haben. Um eine konstante Dimension für den Zustandsvektor zu gewährleisten, wird dieser nicht direkt aus den jeweiligen Aufträgen abgeleitet, denn deren Anzahl kann abhängig von der Systemauslastung variieren. Stattdessen basiert der Zustandsvektor auf der konstanten Anzahl der Pufferplätze, indem jeder Pufferplatz  $i$  einer Maschine durch ein Tupel  $s_{t,i}$  beschrieben wird. Der Vektor  $s_{t,i}$  umfasst nach Gleichung 2 die fünf Kennzahlen Rüstzeit  $st_i$ , Prozesszeit  $pt_i$ , Wartezeit im Puffer  $wt_{t,i}$ , Liefertermin  $dd_i$  und Schlupfzeit  $slt_{t,i}$  des jeweiligen Auftrags auf Pufferplatz  $i$ . Ist ein Pufferplatz leer, werden die Kennzahlen genullt.

$$s_{t,i} = \begin{cases} \{0,0,0,0,0\} & \text{wenn gewählter Pufferplatz leer ist} \\ \{st_i, pt_i, wt_{t,i}, dd_i, slt_{t,i}\} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

Der Aktionsvektor  $a_t$  beschreibt die möglichen Steuerungsentscheidungen der Maschinenagenten für die Reihenfolgebildung. Da die Bedingung der konstanten Dimension auch für den Aktionsvektor gilt, entspricht eine Aktion der Auswahl eines Pufferplatzes. Wenn der Pufferplatz leer ist, wird der Entscheidungsprozess wiederholt, bis ein belegter Pufferplatz ausgewählt wird.

Zur Optimierung des Entscheidungsprozesses werden zwei Belohnungsfunktionen formuliert. Unmittelbar nach einer Entscheidung wird die Belohnung  $r_t$  gemäß Gleichung 3 bestimmt. Die negative Belohnung im Falle der Auswahl eines leeren Pufferplatzes stellt sicher, dass der Algorithmus lernt, keine belegten Pufferplätze auszuwählen.

$$r_t = \begin{cases} -1 & \text{wenn gewählter Pufferplatz leer ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

Die Optimierung der Entscheidungsfindung zur logistischen Zielerreichung basiert auf der globalen Belohnungsfunktion  $r_T$  (siehe Gleichung 4). Deren Wert wird nach Abschluss eines Produktionsprogramms zum Zeitpunkt  $T$  bestimmt. Die Berechnung basiert auf der mittleren relativen Abweichung  $rct$  der tatsächlichen Durchlaufzeit  $ct_a$  von der Soll-Durchlaufzeit  $ct_{ta}$ . Folglich werden Entscheidungsstrategien, welche zu einem schnelleren Abschluss eines Produktionsprogramms führen, stärker belohnt, sodass Auftragsfertiger ihre Kapazitäten möglichst früh für neue Auftrags-eingänge verplanen können.

$$r_T = (1 - rct) \cdot 100 \quad (4)$$

Vor allem zu Beginn des Trainingsprozesses besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass ein leerer Pufferplatz gewählt wird. In der Folge beschreiben die meisten der im Wiedergabespeicher hinterlegten Datensätze nur die Auswahl leerer Pufferplätze. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf den Trainingsprozess, da so in der Regel nicht ausreichend Datensätze zur Verfügung stehen, um Entscheidungen im Sinne der kennzahlenbasierten Reihenfolgebildung anzutrainieren. In diesem Kontext haben Chua *et al.* eine Methode zur dynamischen Filterung von Datensätzen für das bestärkende Lernen entwickelt. Durch den Vergleich der Zustandsvektoren von aufeinanderfolgenden Datensätzen wird die Ähnlichkeit dieser Datensätze bewertet. Liegt diese über einem definierten Ähnlichkeitsgrad, wird nur der erste dieser Datensätze berücksichtigt [18]. Dieser Ansatz wird gemäß **Bild 3** angepasst in den vorgestellten Algorithmus integriert.

Für die Reihenfolgebildung ist keine Definition eines Ähnlichkeitsniveaus erforderlich, da zwischen der wiederholten Auswahl von leeren Pufferplätzen keine Änderung des Systemzustands eintritt. Stattdessen soll sich nicht mehr als die Hälfte der gespeicherten Datensätze auf leere Pufferplätze beziehen. Hierzu wird eine Wahrscheinlichkeit  $\varphi$ , mit der ein mit dem vorherigen Zustand identischer Datensatz herausgefiltert wird, als das Verhältnis der Anzahl gültiger zu ungültigen Aktionen innerhalb der letzten  $N$  Aktionen definiert:

$$\varphi = \frac{N_{valid}}{N_{empty}} \quad (5)$$



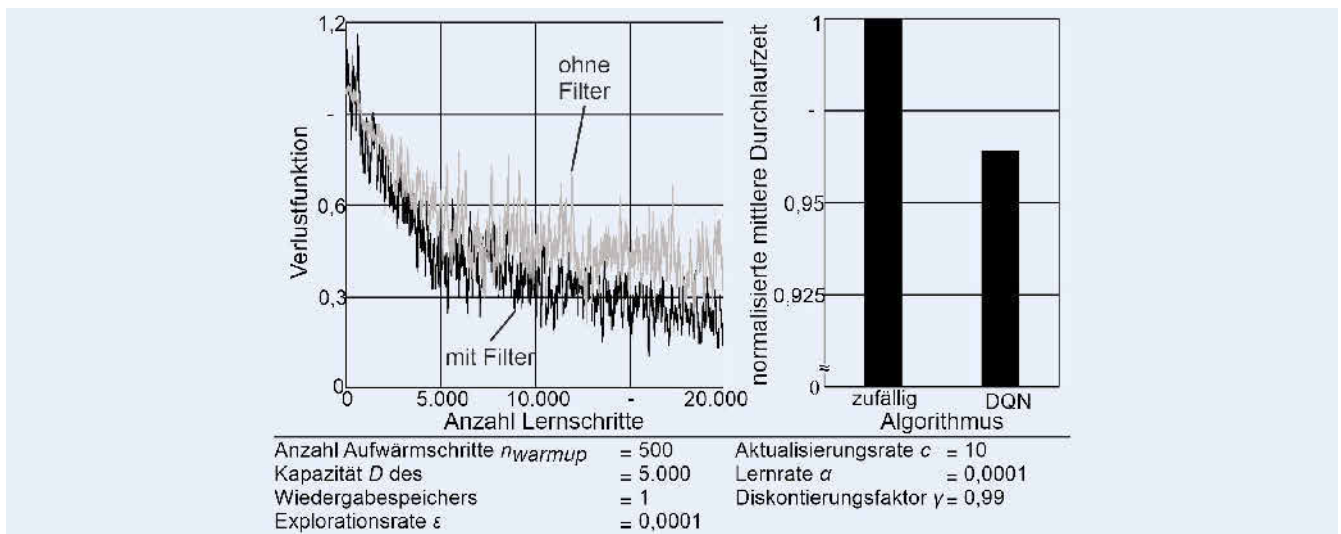


Bild 4. Lernprozess des vorgestellten Algorithmus. Bild: IFW

## 4 Experimentelle Validierung

In diesem Beitrag wird die Funktionalität des Gesamtsystems und die Wirksamkeit des Datenfilters durch einen Vergleich mit einer zufälligen Reihenfolgebildung untersucht. Dazu wurden drei über Schnittstellen verbundene Softwarekomponenten implementiert. Zunächst wurde das MAS in dem Java-basierten Framework „Jade“ programmiert. Das Fertigungssystem wurde in der ereignisdiskreten Materialflusssimulation „Tecnomatix Plant Simulation“ modelliert. Beide Komponenten sind über Netzwerk-Sockets verknüpft. Das Deep-Q-Learning-Modul wurde in Python mit dem Programmierframework „TensorFlow“ umgesetzt. Die Schnittstelle zwischen dem Deep-Q-Learning-Modul und dem MAS wird durch eine SQLite-Datenbank als Wiedergabespeicher bereitgestellt. Außerdem wird der aktuell trainierte Funktions-Approximator des Deep-Q-Learning-Moduls als .pb-Datei in das MAS importiert.

Um Überlagerungseffekte mit der Belegungsplanung zu vermeiden, wurde ein Fertigungssystem mit nur einer Fräsmaschine angenommen. Die betrachtete Maschine verfügt über einen Wartepuffer mit zehn Plätzen. Die Aufträge sind in fünf verschiedene Auftragsstypen unterteilt, die sich in Bezug auf Bearbeitungszeit, Rüstzeit und Häufigkeit unterscheiden. Während der Simulation entspricht ein Produktionsprogramm einer Episode mit 42 eingehenden Aufträgen. Nach jeder Episode wird das Simulationsmodell zurückgesetzt und neu gestartet.

Die linke Seite von Bild 4 zeigt die Entwicklung der Verlustfunktion über 20 000 Lernschritte. Während dieser Zeit wurden 1000 Episoden simuliert.

Die Simulationsergebnisse zeigen eine signifikante Verbesserung durch die Implementierung des Datenfilters. So konnte die Auswahl an leeren Pufferplätzen pro Episode durch Anwendung des Datenfilters von 50 auf nahezu null reduziert werden. Die Verlustfunktion kann mit dem Datenfilter schneller und nach 20 000 Lernschritten weiter minimiert werden. Dadurch sind in der Folge insgesamt weniger Lernschritte und damit Rechenkapazität notwendig. Dies führt zu einer verbesserten Vorhersage des

erwarteten Belohnungswerts einer Entscheidung und damit zu entsprechend besseren Steuerungsentscheidungen. Um die Wirksamkeit der globalen Belohnungsfunktion  $r_T$  nachzuweisen, ist die Verbesserung der Durchlaufzeit im rechten Teil von Bild 4 dargestellt. Mit der anfänglich zufälligen Reihenfolgebildung konnte die mittlere Durchlaufzeit aller Aufträge innerhalb eines Produktionsprogramms während der Trainingsphase reproduzierbar um 3,6 % reduziert werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Reihenfolgebildung bietet ein erhebliches Optimierungspotenzial für Auftragsfertiger. Konventionelle Ansätze sind bei Änderungen des Fertigungssystem oder der Auftragsstruktur jedoch wenig flexibel. Um die Flexibilität und Echtzeitfähigkeit zu erhöhen, wurde in diesem Beitrag eine Methode für eine flexible und selbstoptimierenden Reihenfolgebildung auf Basis des „Deep Q-Learning“ vorgestellt. Durch die Integration mehrerer auftragsbezogener Kennzahlen in den Zustandsvektor können diese je nach Auftragsstruktur automatisiert und erfahrungsbasiert gewichtet werden. Für eine konstante Dimension des Zustands- und Aktionsvektors werden diese Vektoren auf die konstant dimensionierten Wartepuffer und nicht auf die Aufträge bezogen. Es konnte gezeigt werden, dass dies in Kombination mit einem auf Ähnlichkeit basierenden Datenfilter die gezielte Auswahl der zugeteilten Pufferplätze und die Verbesserung der mittleren Durchlaufzeit während des Trainings ermöglicht.

Basierend auf den vorgestellten Erkenntnissen ist eine umfassende Untersuchung der Eingangsgrößen des Zustandsvektors vorgesehen. Zudem soll die Optimierung der Termintreue neben der in diesem Artikel dargestellten Durchlaufzeit vertiefend erforscht und hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Streuung mit konventionellen Reihenfolgeregeln verglichen werden. Weiterhin wird die Integration der Reihenfolgebildung in die in [15] vorgestellte Methode untersucht, um so eine Methode für eine ganzheitliche, flexible und selbstoptimierende Fertigungssteuerung zu entwickeln.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die Förderung des Projekts DE 447/181-1 „Selbstoptimierende dezentrale Fertigungssteuerung“

## Literatur

- [1] Denkena, B.; Dittrich, M.-A.; Winter, F.: Adaptive process planning and control. In: Denkena, B.; Mörrcke, T. (Hrsg.): Cyber-Physical and Intelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. London: Elsevier 2013, pp. 281–292
- [2] Lödding, H.: Handbook of Manufacturing Control – Fundamentals, Description, Configuration. Heidelberg: Springer-Verlag 2013
- [3] Schuh, G.; Brosze, T.; Brandenburg, U.: Aachener PPS-Modell. In: Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1. Heidelberg: Springer-Verlag 2012, S. 11–28
- [4] Grundstein, S.; Freitag, M.; Scholz-Reiter, B.: A new method for autonomous control of complex job shops – Integrating order release, sequencing and capacity control to meet due dates. Journal of Manufacturing Systems 42 (2017), pp. 11–28
- [5] Oguz, C.; Salman, F. S.; Yalcin, Z. B.: Order acceptance and scheduling decisions in make-to-order systems. International Journal of Production Economics 125 (2010) 1, pp. 200–211
- [6] Buergin, J.; Helmig, S.; Andreas, J. et al.: Local order scheduling for mixed-model assembly lines in the aircraft manufacturing industry. Production Engineering Research and Development 12 (2018), pp. 759–767
- [7] Rolf, B.; Reggelin, T.; Nahhas, A. et al.: Assigning dispatching rules using a genetic algorithm to solve a hybrid flow shop scheduling problem. Procedia Manufacturing 42 (2020), pp. 442–449
- [8] Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T. et al.: Cyber-physical systems in manufacturing. CIRP Annals – Manufacturing Technology 55 (2016) 2, pp. 697–720
- [9] Vogel-Heuser, B.; Lee, J.; Leitao, P.: Agents enabling cyber-physical production systems. At – Automatisierungstechnik 63 (2015) 10, pp. 777–789
- [10] Wooldridge, M. J.: An introduction to multiagent systems. Chichester: Wiley 2002
- [11] Sutton, R. S.; Barto, A. G.: Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge, USA: The MIT Press 1998
- [12] Mnih, V.; Kavukcuoglu, K.; Silver, D. et al.: Human-level control through deep reinforcement learning. Nature 518 (2015), pp. 529–533
- [13] Altenmüller, T.; Stüker, T.; Waschneck, B. et al.: Reinforcement learning for an intelligent and autonomous production control of complex job-shops under time constraints. Production Engineering Research and Development 14 (2020), pp. 319–328
- [14] Kuhnle, A.; Kaiser, J.; Theiß, F. et al.: Designing an adaptive production control system using reinforcement learning. Journal of Intelligent Manufacturing (2021) 32:855–876. Doi.org/10.1007/s10845-020-01612-y
- [15] Dittrich, M.-A.; Fohlmeister, S.: Cooperative multi-agent system for production control using reinforcement learning. CIRP Annals - Manufacturing Technology 69 (2020) 1, pp. 389–392
- [16] Hornik, K.: Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. Neural Networks 4 (1991) 2, pp. 251–257
- [17] Glorot, X.; Bordes, A.; Bengio, Y.: Deep Sparse Rectifier Neural Networks. Proceedings of the 14th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS) 2011, pp. 315–323
- [18] Chua, R.; Costa, R. P.: Towards dynamic filtering in deep reinforcement learning. Accepted Paper at the European Workshop on Reinforcement Learning 14, 2018, Lille, France



**Silas Fohlmeister**, M.Sc.

Bild: IFW

Prof. Dr.-Ing. **Berend Denkena**

Dr.-Ing. **Marc-André Dittrich**

Leibniz Universität Hannover  
Institut für Fertigungstechnik  
und Werkzeugmaschinen (IFW)  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
Tel. +49 511 / 762-18162  
fohlmeister@ifw.uni-hannover.de  
ifw.uni-hannover.de

## Zielgerichtete Digitalisierung der Produktionssteuerung und -planung

# Echtzeitfähigkeit in der schiffbaulichen Fertigung

P. Burggräf, T. Adlon, K. Müller, S. Vierschilling, R. Minderjahn, N. Schäfer

Die Produktion maritimer Systeme stellt Werften aufgrund ihrer Dimensionen und der damit einhergehenden Produktkomplexität vor große Herausforderungen. Um den häufig auftretenden Störungen entgegenzutreten, wird im Forschungsprojekt „ProProS“ eine Methodik zur proaktiven Produktionssteuerung und -planung anhand tagesaktueller Echtzeitdaten entwickelt. In diesem Beitrag wird der Begriff der Echtzeitfähigkeit vorgestellt und dessen Bedeutung in der schiffbaulichen Fertigung untersucht.

### STICHWÖRTER

Industrie 4.0, PPS (Produktionsplanung/-steuerung)

## Real-time capability in shipbuilding – Purposeful digitization of production control and planning

The production of maritime systems poses great challenges for shipyards due to their dimensions and the associated product complexity. To counteract the frequently occurring disruptions, the ProProS research project is developing a methodology for proactive production control and planning, based on daily updated real-time data. This paper introduces the concept of real-time capability in the context of shipbuilding and examines its implications on production planning and control.

## 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die schiffbauliche Fertigung in Deutschland von der Serienfertigung von Containerschiffen und Frachtern in Richtung einer komplexeren und kundenindividuelleren Produktion von Yachten, Militär-, Forschungs- und Spezialschiffen entwickelt [1]. Diese Entwicklung im Handelsschiffbereich wird vor allem durch den Kostendruck asiatischer Werften getrieben und verschiebt den Fokus deutscher Werften zunehmend auf Nischenmärkte. Zusätzlich ist die Branche stark konjunkturabhängig und der durch die Covid-19-Pandemie im gesamten Markt zurückgehende Absatz verstärkt den damit einhergehenden Kostendruck [2, 3]. Die Fertigung kundenindividueller Produkte erfordert aufgrund der typischerweise niedrigen Stückzahlen eine optimale Produktionsplanung und -steuerung, die derzeit von europäischen Werften im internationalen Vergleich besser beherrscht wird. Da Schiffbauaufträge weltweit rückläufig sind, steigt der Druck auf internationale Schiffbauer mit Fokus auf Serienfertigung auch Nischenmärkte zu bedienen und erhöht somit den Konkurrenzdruck auf die deutschen Werften. Um den aktuellen Wettbewerbsvorteil aufrecht zu erhalten und die Marktposition zu behaupten, müssen die hierzulande eingesetzten Planungs- und Steuerungsmethoden kontinuierlich verbessert und weiterentwickelt werden [4]. So lassen sich Kosten einsparen und Produktionszeiten verringern.

An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt ProProS an. Im Projekt wird eine proaktive PPS (Produktionsplanung und -steuerung) für die Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus entwickelt. Eine umfangreiche Definition der Begrifflichkeiten Fertigungs- beziehungsweise Produktionssteuerung und -planung

im Kontext der Auftragsfertigung bietet das Standardwerk von Lödging und ergänzend Wandt [4, 5]. Das Produktionssystem Werft wird bestimmt durch inhärente Strukturen, Ressourcen und Prozesse [6]. Um mit den beschriebenen Herausforderungen umzugehen, muss die Transparenz über den Status der schiffbaulichen Prozesse verbessert werden, sodass Störungen proaktiv beseitigt werden können. Das langfristige Ziel ist eine durchgängige Digitalisierung der Produktionsprozesse im Schiffbau und eine auf Echtzeitdaten basierende Entscheidungsunterstützung der PPS. Welche PPS-Aufgaben besonders von Echtzeitdaten profitieren, hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab.

## 2 Grundlagen

Die schiffbauliche Produktion hat einen projektbezogen-planerischen Charakter. Mit einem Projektzeitraum von mehreren Jahren ähnelt sie Bauprojekten, bei denen umfangreiche Planungswerkzeuge zum Einsatz kommen [7, 8]. Diese Charakteristik des Schiffbaus entsteht durch das branchentypische Engineering-to-Order-Prinzip, da die Auftragsabwicklung respektive Konstruktion erst bei Eingang des Kundenauftrags beginnt [9, 10]. Ansätze des Produktionsmanagements aus der Serienfertigung, wie in der Automobilbranche, lassen sich daher kaum übertragen.

Der technologische Ablauf der sektionsweisen Produktion kann anhand der Baumethodik beschrieben werden, in der Bau- und Montagereihenfolgen der Sektionen hinterlegt sind. Zu Beginn der schiffbaulichen Planung werden die groben Phasen und Meilensteine wie etwa Brennbeginn und Kiellegung im Projekt- und Meilensteinplan definiert. Im laufenden Projekt werden

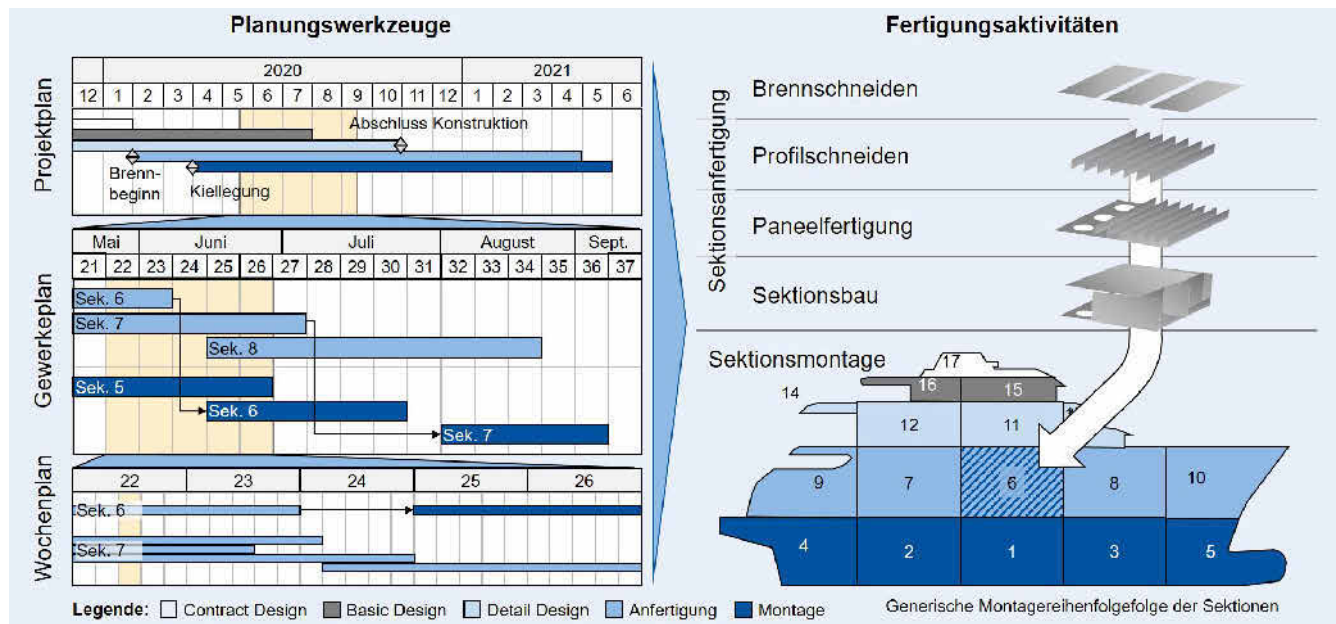


Bild 1. Planungswerkzeuge und Fertigungsaktivitäten in der schiffbaulichen Produktion. Bild: WZL

die parallelen Konstruktions- und Fertigungsaktivitäten in den untergeordneten Plänen ausdetailliert und zeitlich angeordnet (Bild 1). Nach der Konstruktion einer Sektion wird diese aus gebrannten Blechen und geschnittenen Profilen am Sektionsbauplatz in unterschiedlichen Zwischenstufen zusammengefügt und schließlich in der Sektionsmontage zum Schiff montiert. Je nach Baumethodik des Schiffs können somit Situationen auftreten, in denen Bereiche des Schiffs bereits montiert werden, andere Bereiche sich jedoch noch in der Konstruktionsphase befinden. [6, 11, 12]

## 2.1 Herausforderungen der schiffbaulichen Produktionssysteme

Meist nutzen Werften zur Produktionsplanung und -steuerung abteilungsindividuell implementierte, historisch gewachsene IT-Lösungen, welche eine Einführung neuer oder die Optimierung bestehender informationstechnischer Systeme erschweren [13]. Damit sind Synergieeffekte zwischen Gewerken kaum vorhanden und Planungsdaten verteilen sich unstrukturiert auf mehrere, ungenügend vernetzte Systeme [14]. Weiterhin werden die häufigen Störungen während der Produktion überwiegend nicht erfasst. Auf einen Verzug im Projektplan wird mit verstärktem Einsatz von Facharbeitern geantwortet ohne Transparenz über die Ursache des Problems zu schaffen [15]. Ursachen der betrieblichen Störungen sind etwa fehlendes Material, Verspätungen in der Konstruktion und Kapazitätsengpässe bei Mensch oder Maschine. Besonders störanfällig sind Sektionsbau und -montage. Selbst wenn Störungsquellen bekannt sind, werden diese in den vorhandenen Informationssystemen nicht ausreichend dokumentiert und überwacht [16].

Während der Fertigung geänderte Kundenwünsche führen ebenfalls zu ungeplanten Veränderungen und erschweren so zusätzlich einen ununterbrochenen Produktionsablauf. Obwohl Technologien zur automatischen Identifikation von Ereignissen derzeit selektiv eingeführt werden, besteht gegenüber anderen Branchen ein deutlicher Aufholbedarf in der Digitalisierung [17].

Dazu müssen die Informationssysteme in maritimen Produktionen die Erfüllung der zukünftigen Marktanforderungen gewährleisten. Hier stellt sich die Frage, welche Anforderungen an eine Echtzeitfähigkeit im Schiffbau gestellt werden und wie diese bezogen auf den Anwendungsfall bewertet werden können.

## 2.2 Echtzeitfähigkeit

Um den Begriff der Echtzeitfähigkeit für den Schiffbau zu erfassen, wird zunächst dessen allgemeine Definition betrachtet. Die Echtzeitfähigkeit eines Systems kann als eine ausreichend rechtzeitige Ergebnisausgabe unter Einhaltung einer Zeitbedingung beschrieben werden [18]. Das Verhalten des Echtzeitsystems bei Überschreiten der Zeitbedingung ermöglicht die Unterscheidung von harten und weichen Echtzeitsystemen. In einem harten Echtzeitsystem verliert die Ergebnisausgabe nach Ablauf der Zeitbedingung ihren Wert. Beispiel ist die Berechnung des optimalen Zündzeitpunkts im Ottomotor. Sollte die Zeitbedingung verletzt werden, liegt der berechnete Zündzeitpunkt bereits in der Vergangenheit und das Ergebnis ist somit wertlos.

Bei weichen Echtzeitsystemen werden geringe Überschreitungen der Zeitbedingung toleriert. Zur Beurteilung des Systems werden Kriterien wie eine mittlere Antwortzeit, Standardabweichungen oder andere statistische Verfahren herangezogen. So führt eine verspätete Ausgabe bei der Buchung eines Sitzplatzes im Flugzeug zu einer um einige Sekunden erhöhten Wartezeit des Passagiers, jedoch nicht zu einem vollständigen Wertverfall des Ergebnisses, welches in diesem Fall die erfolgreiche Buchung ist.

Die Steuerung eines Echtzeitsystems erfolgt entweder zeit- oder ereignisgesteuert. Bei der zeitgesteuerten Prozessaufführung wird die Berechnung der Ausgabe zu vorgegebenen Zeitpunkten vorgenommen. Die zur Berechnung nötigen Daten werden periodisch angefordert. Bei ereignisgesteuerten Systemen wird die Erforderlichkeit der Berechnung der Ausgabe durch ein Ereignis oder eingehendes Signal ausgelöst. Somit reagiert das Echtzeitsystem bei der Ereignissteuerung auf einen Eingang, während dieser bei der Zeitsteuerung angefordert wird. [19, 20]



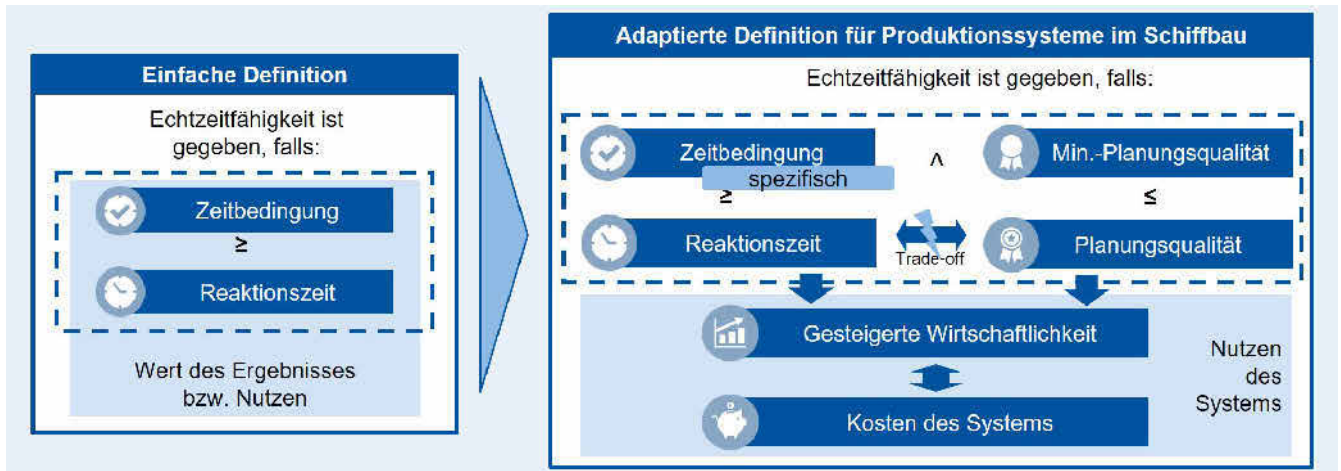


Bild 2. Adaptierte Definition für Produktionssysteme im Schiffbau. Bild: WZL

In der üblichen Begriffsverwendung der Echtzeit sind die betrachteten Anwendungen ausschließlich informationstechnische Systeme oder elektronische Steuereinheiten. Hierbei wird die Zeitbedingung mit der Berechnungszeit des Systems verglichen, um eine Aussage über die Echtzeitfähigkeit zu treffen. Um den Begriff der Echtzeit im Kontext der Störungsbehebung und PPS in schiffbaulichen Produktionssystemen zu verwenden, ist ein angepasstes Verständnis der Echtzeitfähigkeit nötig, bei dem die Besonderheiten dieses Anwendungsfalls berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden zunächst die anwendungsfallsspezifischen Lücken der Definition identifiziert, um anschließend eine erweiterte, adaptierte Definition zur Bewertung der Echtzeitfähigkeit schiffbaulicher Produktionssysteme abzuleiten.

### 3 Adaption der Echtzeitdefinition für schiffbauliche Produktionssysteme

Produktionssysteme sind allgemein weiche Echtzeitsysteme mit Ereignissteuerung, da die Behandlung unerwarteter Ereignisse, wie Störungen, bei kürzeren Reaktionszeiten in niedrigeren Standzeiten und schnelleren Produktionsabläufen resultieren. Die Reaktionszeit kann etwa vom Auftreten einer Störung bis zur Störungsbehandlung in Form eines aktualisierten Produktionsplans bemessen werden. Denkbar sind hier alle drei Stellgrößen der PPS (Plan-Zugang, Plan-Abgang und Plan-Reihenfolge) sowie die Revidierung bereits freigegebener Aufträge aufgrund von späten Kundenwünschen [5]. Die Rechtzeitigkeit ist somit direkt mit ökonomischen Vorteilen behaftet und kann mit einer Zeitbedingung überprüft werden. Ein Überschreiten der Zeitbedingung ergibt jedoch keinen vollständigen Wertverfall der Störungsbehandlung.

Auch zeigt sich im Vergleich zu herkömmlichen Echtzeitsystemen ein Unterschied in der Bewertbarkeit der Störungsbehandlung, welche durch einen angepassten Produktionsplan umgesetzt werden kann. In den zuvor angeführten Beispielen, wie der Berechnung des Zündzeitpunktes im Ottomotor oder der Sitzplatzbuchung, ist die Prämisse eines exakt ermittelbaren Ergebnisses erkennbar – hier der optimale Zündzeitpunkt oder die Zuteilung des Sitzplatzes im Flugzeug [20]. Im Gegensatz dazu ist ein aktualisierter Produktionsplan nicht binär zu bewerten, sondern kann unabhängig von der Reaktionsgeschwindigkeit qualitativ unterschiedliche Alternativen bieten. Demnach ist die

Bewertung der Echtzeitfähigkeit nach der Rechtzeitigkeit nicht hinreichend, sondern muss um das Kriterium der Planungsqualität erweitert werden.

Nach der nun adaptierten Definition ist zur Erreichung der Echtzeitfähigkeit von Produktionssystemen im Schiffbau sowohl die Rechtzeitigkeits- als auch eine Qualitätsbedingung zu erfüllen. Bild 2 zeigt, dass die Rechtzeitigkeitsbedingung analog zur einfachen Definition mit einer ausreichend geringen Reaktionszeit erfüllt wird. Dabei sollte die Zeitbedingung in Abhängigkeit vom Störfall spezifisch festgelegt werden. Reguläre, erwartete Rückmeldungen aus der Produktion bestätigen den geplanten Produktionsablauf und erfordern keine Umplanung. Beispiele sind Materialbestellungen, Bauteilfertigstellungen oder abgeschlossene Montagen nach Plan.

Unerwartete Ereignisse hingegen benötigen eine Störungsbehandlung, die auch Änderungen im Produktionsablauf bewirken kann. Beispiele sind fehlende oder falsch gefertigte Bauteile oder neue Kundenwünsche, die eine teilweise Neukonstruktion erfordern. Bei Anpassungen des Produktionsplans sollte eine geforderte Mindestplanungsqualität erreicht werden. Die Qualität eines Produktionsplans lässt sich anwendungsfallsspezifisch über die Ausprägung der logistischen Zielgrößen (Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung, Termintreue) bewerten.

Zwischen den beiden Bedingungen Rechtzeitigkeit und Planungsqualität lässt sich ein Zielkonflikt erkennen. Die Anpassung und insbesondere Verbesserung eines Produktionsplans erfordert ressourcenbelastende und zeitliche Mehraufwände. Dadurch wird die Reaktionszeit vergrößert und gefährdet die Sicherstellung der Rechtzeitigkeit. Analog ist eine Verkürzung der Reaktionszeit möglich, indem weniger Zeit zur Erarbeitung oder Berechnung eines besseren Produktionsplans genutzt wird.

Der Nutzen des produktionstechnischen Echtzeitsystems wird in einer ökonomischen Betrachtungsweise durch Gegenüberstellung der gesteigerten Wirtschaftlichkeit und der Kosten des Systems bewertet. Hervorzuheben ist, dass die gesteigerte Wirtschaftlichkeit nur indirekt über den Einfluss der Reaktionszeit und Qualität des Produktionsplans in Zusammenhang mit einer höheren Echtzeitfähigkeit steht. Demnach existiert eine optimale Echtzeitfähigkeit und ein echtzeitfähigeres, also reaktionsschnelleres und qualitativ besseres Produktionssystem, ist nicht zwangsläufig wirtschaftlich vorteilhafter.

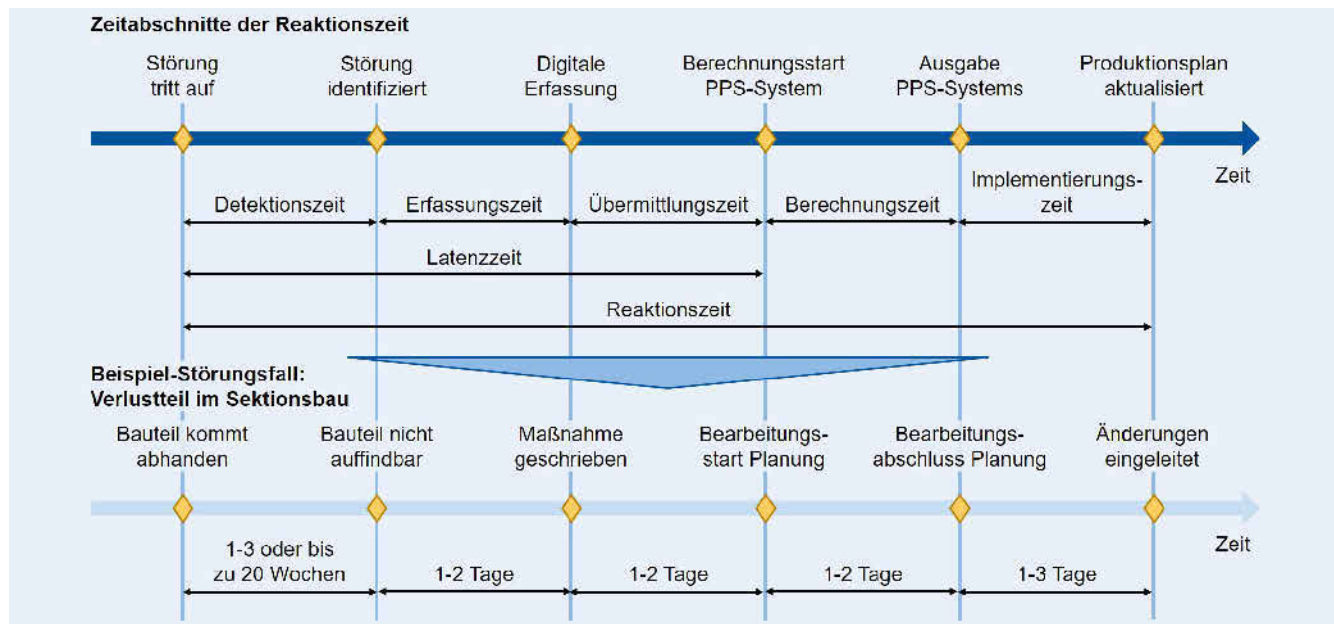


Bild 3. Aufgegliederte Zeitabschnitte der Reaktionszeit und Detaillierung für den Störfall „Verlustteil im Sektionsbau“ inklusive Zeitschätzung. Bild: WZL

#### 4 Untersuchung der Reaktionszeit zur zielgerichteten Digitalisierung

Ausgehend von der adaptierten Definition wird die Reaktionszeit untersucht. Zur Verbesserung der Echtzeitfähigkeit kann im Rahmen dieser Bedingung die Reaktionszeit innerhalb aufgegliederter Zeitabschnitte reduziert werden. In der oberen Hälfte von **Bild 3** sind die fünf allgemeinen Zeitabschnitte angegeben. Hierbei handelt es sich um ein industrienahes jedoch imaginäres Beispiel zur Verdeutlichung. Darunter wird der exemplarische Störfall „Verlustteil im Sektionsbau“ auf die Struktur angewandt und erfahrungsbasierte Zeitschätzungen für aktuelle schiffbauliche Produktionssysteme angegeben. Ein Verlustteil ist ein Bauteil, welches ursprünglich gefertigt wurde, jedoch für den nächsten Bearbeitungsschritt nicht mehr auffindbar ist.

Der Zeitraum zwischen Auftreten und Identifikation einer Störung wird mit der Detektionszeit bemessen und hat überproportionalen Einfluss auf die gesamte Reaktionszeit sowie die Aufwände zur Fehlerbehebung. Je länger eine Störung unentdeckt bleibt, desto größer sind die damit verbundenen Verluste an Produktivität und die zugehörigen Fehlerkosten [21]. Daher sollten präventive Maßnahmen ergriffen werden, die eine frühzeitige Fehlererkennung begünstigen. Die Erfassungszeit beschreibt die Dauer von der Detektion bis zur digitalen Erfassung der Störung. Diese Erfassung muss je nach Störfall mit entsprechend ausreichendem Detailgrad ausgeführt werden, damit im PPS-System ausreichend Informationen zur Störungsbehandlung vorhanden sind. Die Erfassungszeit hängt wesentlich davon ab, ob am Ort der Störung ein Eingabegerät mit geeigneter Benutzeroberfläche vorhanden ist und durch Scansysteme unterstützt werden kann. Deshalb hat der Digitalisierungsgrad der Produktionsumgebung maßgeblichen Einfluss auf die Erfassungszeit.

Sobald die erforderlichen Störungsinformationen im PPS-System vorliegen, können die Auswirkungen auf den aktuellen Produktionsplan überprüft und dieser entsprechend angepasst werden. Derzeit werden diese Änderungen in der Planung manuell vorgenommen und in die Fertigung eingeleitet. Zukünftig soll

eine teilautomatisierte Verarbeitung der Störung einschließlich Entscheidungsunterstützung bei der Störungsbehandlung anhand von Algorithmen möglich sein [22, 23]. Dazu müssen geeignete Schnittstellen zur Produktion geschaffen und die produktionstechnische Logik digital hinreichend abgebildet werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird im Forschungsprojekt Pro-PPoS die Nutzung von Echtzeitdaten zur Produktionssteuerung im Rahmen der Entwicklung eines Demonstrators erforscht. Dafür werden zuerst die in einer Störungsanalyse identifizierten, am häufigsten auftretenden Störungen mit der vorgestellten Aufgliederung der Reaktionszeit untersucht. Indem entweder eine fachliche Sichtweise, etwa aus Perspektive der Produktionsgestaltung oder des IT-Managements, oder eine prozessbezogene, Sichtweise genutzt wird, können verschiedene Maßnahmen zur wirkungsvollen Reduktion der Reaktionszeit identifiziert werden. So werden die Voraussetzungen für eine echtzeitfähige PPS im Zuge einer zielgerichteten Digitalisierung des Produktionssystems geschaffen. Damit kann Störungen schneller entgegengetreten werden und die anwendungsfallspezifisch geplante, logistische Zielerreichung ist kürzer von den Störungsauswirkungen betroffen. Dies kann sich beispielsweise positiv auf die interne Termintreue auswirken.

#### 5 Zusammenfassung

Zur Definition der Echtzeitfähigkeit in schiffbaulichen Produktionssystemen und vergleichbaren Anwendungsfällen wurde zunächst die Begriffsdefinition der Echtzeitfähigkeit untersucht. Anschließend wurde unter Erweiterung der Systemgrenzen und unter Berücksichtigung der vorliegenden Charakteristiken die Definition adaptiert. Somit werden Anwenderunternehmen bei der Identifikation der Einflussfaktoren auf die Echtzeitfähigkeit eines Produktionssystems und folglich bei Prozessveränderungen und Technologieauswahl unterstützt. Letztlich erfolgt auf diese Weise eine Unterstützung zur Implementierung einer echtzeitfähigen PPS.

### DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des Forschungsprojektes ProProS „Proaktive Produktionssteuerung für die Produktion maritimer Systeme“ (Förderkennzeichen 03SX492B).

### Literatur

- [1] CESA: European Orderbook by Ship Types. Stand: 21.10.2020. Internet: [www.cesa.eu/the-industry](http://www.cesa.eu/the-industry). Zugriff am 12.04.2021
- [2] Danish Ship Finance (eds.): Shipping Market Review – May 2020. Internet: [www.shipfinance.dk/media/2033/shipping-market-review-may-2020.pdf](http://www.shipfinance.dk/media/2033/shipping-market-review-may-2020.pdf). Stand: 2020. Zugriff am 12.04.2021
- [3] Jiang, G.; Feng, D.; Zhu, W.: Toward Efficient Merchant Shipbuilding Based on the Lean Production Methodology. Journal of Ship Production and Design 32 (2016) 04, pp. 245–257
- [4] Wandt, R.: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikattfertigung am Beispiel des Schiffbaus. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2014
- [5] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Heidelberg: Springer-Verlag 2016
- [6] Sender, J.: Methoden zur Planung von Produktionssystemen für maritime Großstrukturen. Dissertation, Universität Rostock, 2018
- [7] Lee, Y. G.; Ju, S.; Woo, J. H.: Simulation-based planning system for shipbuilding. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 33 (2020) 6, pp. 626–641
- [8] Aramo-Immonen, H.; Vanharanta, H.: Project management: The task of holistic systems thinking. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 19 (2009) 6, pp. 582–600
- [9] Sender, J.; Illgen, B.; Klink, S. et al.: Planung und Organisation von Engineer-to-Order-Produktionsverbünden. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020) 1–2, S. 19–22
- [10] Sikorra, J. N.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Early estimation of work contents for planning the one-of-a-kind production by the example of shipbuilding. MATEC Web of Conferences 77 (2016), p. 1025
- [11] Czarnietzki, R.: Entwicklung rechnerunterstützter Methoden zur Belegungsplanung auf einer Kompaktwerft und deren Anwendung zur Untersuchung ausgewählter Fertigungsreihenfolgen bei der Paneel- und Sektionsfertigung. Dissertation, Universität Rostock 2008
- [12] Lee, D. K.; Kim, Y.; Hwang, I. H. et al.: Study on a process-centric modeling methodology for virtual manufacturing of ships and off-shore structures in shipyards. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 71 (2014) 1–4, pp. 621–633
- [13] Lee, D. K.; Shin, J. G.; Kim, Y. et al.: Simulation-Based Work Plan Verification in Shipyards. Journal of Ship Production and Design 30 (2014) 02, pp. 49–57
- [14] Friedewald, J. N. S.; Haux, M. A.; Hübler, M. et al.: Hocheffiziente, digitale Produktionsplanung für Prototypenkompetenz. Schiff & Hafen (2017) 4, S. 33
- [15] Shin, J. G.; Kim, Y.; Jeong, Y.-K. et al.: Model-Based Computational Shipyard Dynamics and Its Applications. Journal of Ship Production and Design 36 (2020) 01, pp. 87–95
- [16] A. K. Ahn; B. Wang; C. Park: Study on Scheduling of the Planning Method Using the Web-based Visualization System in a Shipbuilding Block Assembly Shop. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering (2010) 4, pp. 821–824
- [17] Fraga-Lamas, P.; Fernandez-Carames, T. M.; Noceda-Davila, D. et al.: Enabling automatic event detection for the pipe workshop of the shipyard 4.0. 2017 56th FITCE Congress, Madrid, 2017 – 2017, pp. 20–27
- [18] Salfner, F.; Sommer, S.: Echtzeitsysteme: Grundlagen. EMES: Eigenschaften mobiler und eingebetteter Systeme. Internet: [www.informatik.hu-berlin.de/de/forschung/gebiete/rok/teaching/WS/E-MES/Slides/02-realtime.pdf](http://www.informatik.hu-berlin.de/de/forschung/gebiete/rok/teaching/WS/E-MES/Slides/02-realtime.pdf). Stand: Wintersemester 2010/2011. Zugriff am 12.04.2021
- [19] Siemers, C.; Gerstl, S.: Grundlagen von Echtzeitsystemen. Internet: <https://www.embedded-software-engineering.de/echtzeit-grundlagen-von-echtzeitsystemen-a-669520/>. Stand: 07.12.2017. Zugriff am 12.04.2021
- [20] Zöbel, D.: Echtzeitsysteme. Grundlagen der Planung. Heidelberg: Springer-Verlag 2008
- [21] Brüggemann, H.; Bremer, P.: Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2015
- [22] Wei, Y.; Nienhuis, U.: Automatic Generation of Assembly Sequence for the Planning of Outfitting Processes in Shipbuilding. Journal of Ship Production and Design 28 (2012) 02, pp. 49–59



Prof. Dr.-Ing. **Peter Burggräf**  
Bild: Autor

**Tobias Adlon**, M.Sc.

**Katharina Müller**, M.Sc.

**Sebastian Patrick Vierschilling**, M.Sc., M.Sc.

**Richard Minderjahn**, M.Sc., M.Sc.

**Niklas Schäfer**, M.Sc., M.Sc.

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen  
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen  
Tel. +49 241 / 80-24992  
[t.adlon@wzl.rwth-aachen.de](mailto:t.adlon@wzl.rwth-aachen.de)  
[www.wzl.rwth-aachen.de](http://www.wzl.rwth-aachen.de)

## Mit Retrofit zur Datenbasis für die Produktionsplanung und -steuerung in KMU

# Datenhandhabung für die PPS in KMU

P. Grzona, D. Fischer, R. Riedel

Ziel dieses Beitrags ist es, einen Einblick in die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) im Mittelstand zu geben und darzulegen, wie man dafür mittels eines kostengünstigen Retrofits eine geeignete Datenbasis schafft. Hierzu wurde gemeinsam mit einem mittelständischen Unternehmen ein Prozessablauf entwickelt und prototypisch umgesetzt, der für die Mitarbeiter den Aufwand zur manuellen Dateneingabe reduziert. Dabei wurden ebenso die Schnittstellen zu den im Unternehmen eingesetzten Systemen und deren Interaktion miteinander berücksichtigt.

## Data handling for production planning and control in SME

This article aims to give an in-depth look into production planning and control in small and medium-sized enterprises and shows how an adequate data basis can be gathered using a cost-efficient retrofit solution. In collaboration with a medium-sized enterprise, a process flow was developed and implemented prototypically to reduce the need and effort for manually entered data and to interact with interfaces of existing digital systems.

### STICHWÖRTER

PPS (Produktionsplanung/-steuerung),  
Betriebsdatenerfassung (BDE), Digitalisierung

## 1 Einleitung

Im PPS-Report 2017/2018 schrieben Seitz et al., dass „Der Produktionsplanung und -steuerung [...] im Zeitalter zunehmend volatiler Marktbedingungen eine immer wichtigere Rolle zu [kommt]“ [1]. In ihrer Studie über den Einsatz von Technologien sowie Methoden der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) und des Produktionscontrollings befragten sie 123 Vertreter aus Unternehmen. 44 Teilnehmer entstammten Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern. Sie sahen die größten Verbesserungspotenziale der genutzten Produktionsplanungssysteme in

- der Abbildungsgenauigkeit von Unternehmensprozessen,
- der Anpassungsfähigkeit und
- den Systemschnittstellen. [1]

Betrachtet man die einzelnen, aufeinander aufbauenden Funktionen eines PPS-Systems, so bildet eine funktionierende Betriebsdatenerfassung (BDE) die fundamentale Basis. Erst mit diesen Daten, wie Bearbeitungszeiten, Durchlaufzeiten oder auch Ausfallzeiten, lassen sich PPS-Systeme zufriedenstellend nutzen. [2]

In der Untersuchung von Seitz et al. gaben 75 % der Befragten an, dass sie Rückmelde- und Betriebsdaten täglich erheben und nur 52 %, dass sie diese täglich auswerten. „Im Bereich des Produktionscontrollings ergeben sich Potenziale bei der automatisierten Auswertung von Bewegungs- und Stammdaten“. [1]

Gerade das Wissen über spezifische Ist-Daten zu den Betriebsmitteln, etwa das verfügbare Kapazitätsangebot einer Maschine inklusive der Abschläge für Ausfälle, bilden die Basis für eine Produktionsprogrammplanung. Ist man als Unternehmen in der

Lage auf aktuelle Daten wie etwa Ausfallzeiten zurückzugreifen, so verbessern sich qualitativ die Ergebnisse dieser Berechnungen und der nachfolgenden Schritte. Mit laufenden Rückmeldungen aus der Produktion wird das Unternehmen in die Lage versetzt die Qualität der mittelfristigen Planung zu steigern und die nachfolgende steuernde Einflussnahme zu reduzieren. Anhand auftragsspezifischer Bearbeitungszeiten lässt sich eine detaillierte Auftragsterminierung durchführen. Mit den aktuellen und hoch aufgelösten Daten ist das Unternehmen in der Lage, durch einen Soll-Ist-Abgleich steuernd in den Produktionsprozess einzugreifen. Dabei können auch kurzfristige Abweichungen vom Soll erkannt werden, um einerseits schnell zu reagieren, aber andererseits auch neue Möglichkeiten zur Analyse und Ableitung von Maßnahmen zu schaffen. Für die Produktionssteuerung ergibt sich der Mehrwert einerseits in der Darstellung der relevanten Informationen durch eine Aggregation, andererseits in einer detaillierteren Betrachtung einzelner Abweichungen. [2]

Bei der Erfassung der Daten zählt nicht nur der Umfang der vorhandenen Daten, zum Beispiel um Methoden der Künstlichen Intelligenz einsetzen zu können, sondern auch die Informationsqualität der Datensätze und dass die Daten zu dem benötigten Zeitpunkt in dem für das eingesetzte System lesbaren Format vorliegen. Eine automatisierte in den Prozess eingebundene Datenerfassung trägt zu den Datenqualitätskriterien ‚Hohes Ansehen‘ (reputation), ‚Objektivität‘ (objectivity), ‚Fehlerfreiheit‘ (free of error), ‚Glaubwürdigkeit‘ (believability), ‚Aktualität‘ (Timeliness) und ‚Vollständigkeit‘ (Completeness) bei [3]. Diese Verbesserung der Informationsqualität und Konnektivität war





**Bild 1.** Elemente innerhalb des Projektes. Bild: TU Chemnitz

Bestandteil eines Umsetzungsprojektes des „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Chemnitz“ und bildet wiederum die Basis etwa für den Einsatz eines Digitalen Zwilling, mass-customized Data-Analytics-Diensten oder anderen Technologien aus dem Umfeld von Industrie 4.0 für die Produktionsplanung und -steuerung [1, 4, 5].

Auch Jeske et al. zeigen, warum die Auseinandersetzung mit den grundlegenden Elementen eines PPS wichtig ist. Sie verglichen 122 Praxisbeispiele aus der Plattform Industrie 4.0, dem Innovationsnetzwerk Produktionsarbeit 4.0 und des Labs Network Industrie 4.0. Schwerpunkte der Analyse waren die Faktoren Art der Datenhandhabung, die jeweiligen Produktivitätsziele und die Arbeitsform. Die Datenhandhabung wurde in fünf Phasen gegliedert von der Datenerfassung bis hin zur Datennutzung. Die Auswertung der Praxisbeispiele ergab, dass die Projekte nahezu gleichverteilt sind in den jeweiligen Kategorien der Datenhandhabung. Themen der Datenerfassung und -weitergabe sind also ähnlich thematisch bedeutsam wie die Nutzung der Daten, um zum Beispiel Produktivitätsziele zu erreichen. [6]

Dies betont die aktuelle Relevanz aller Themen in der Kette der Datenhandhabung und die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Ansatzes. Letzterer reflektiert auf die Nutzung der Daten und versucht alle Bestandteile dieser Kette zu betrachten und diese auch mit anderen Kriterien, wie der Datenqualität zu verknüpfen, um die Basis für eine adäquate Datennutzung zu bilden. Diese Art der Datennutzung dient im Rahmen der PPS zur Verbesserung der innerbetrieblichen Abläufe und trägt so zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit bei.

Eine Möglichkeit, um auch ältere Maschinen und Anlagen aufzuwerten, ist die Modernisierung beziehungsweise das Retrofit mittels IoT (Internet of Things)-Gateways, um die Konnektivität zu PPS-Systemen herzustellen. Durch ein Retrofit an bestehenden Anlagen, begleitet durch eine geeignete Auswahl von Sensorik und weiterer Systemkomponenten, werden KMU befähigt, kosteneffektiv die Digitalisierung voranzutreiben. [7]

## 2 Vorgehensweise

Als Bestandteil der Datenhandhabung für die PPS konnte in einem Umsetzungsprojekt des Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Chemnitz gemeinsam mit einem regionalen KMU aus der Verpackungsindustrie ein Prototyp realisiert werden für eine nachrüstbare, modulare und kostengünstige BDE. Ziel war es, die Informationsqualität bei den Maschinenbelegungen und -zuständen bezogen auf die Kundenaufträge zu verbessern und Datensätze (teil-)automatisiert zu erzeugen.

Dazu wurde gemeinsam ein Prozessablauf entwickelt, der den Aufwand der Mitarbeiter zur manuellen Dateneingabe reduziert und die Interaktion mit den jeweiligen Schnittstellen zu den im Unternehmen eingesetzten Systemen abbildet. Dies wurde prototypisch in Hard- & Software implementiert und im Unternehmen

getestet. Darauf aufbauend wurden Dashboards zur Visualisierung entwickelt. Durch die modular gestaltete Datenverarbeitung wurde das Unternehmen befähigt, die prototypische Umsetzung selbst zu erweitern und die Daten für zukünftige Projekte, beispielsweise einem Digitalen Zwilling zu nutzen. Für die PPS im Unternehmen sollte der Mehrwert darin liegen, einerseits eine valide Datenbasis für die Planung zu generieren, bestehend etwa aus Auftragszeiten und Maschinenleistungen, aber auch eine erhöhte Transparenz über den aktuellen Auftragsstatus und die Produktionsgeschwindigkeit. Perspektivisch trägt dies zur weiteren Verbesserung der PPS bei, um so den Auslastungsgrad der Anlagen zu steigern beziehungsweise die Durchlaufzeiten einzelner Aufträge zu verringern. Bild 1 zeigt die jeweiligen Elemente, die innerhalb des Projektes bearbeitet wurden.

## 3 Umsetzung

Die Umsetzung ließ sich gemäß Bild 1 in einzelne Themen aufteilen, die im Projekt gemeinsam erarbeitet wurden. Nachfolgend erfolgt ein Einblick in die individuellen Aspekte.

### 3.1 Anforderungsanalyse

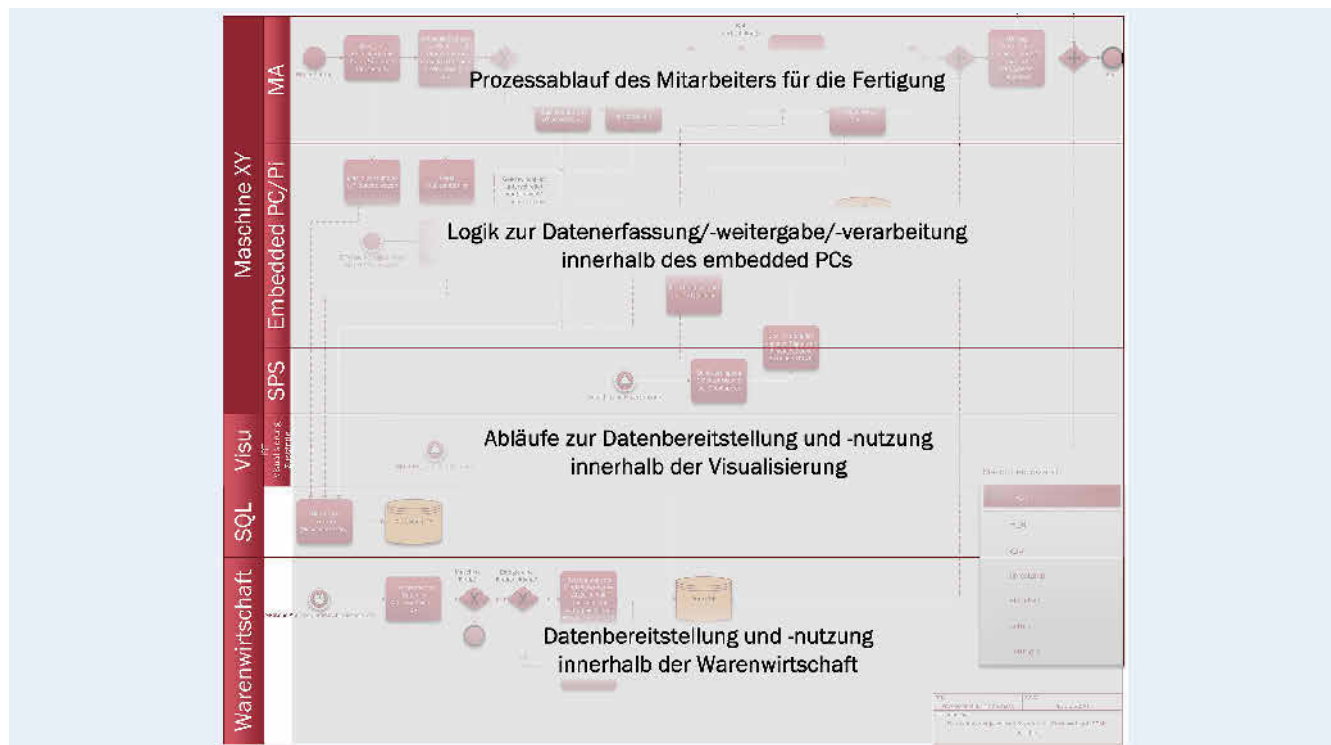
Die Anforderungsanalyse erfolgte in Form von Workshops bei dem beteiligten Unternehmen, in denen sowohl Produktionsleiter, IT-Leiter, Instandhaltung als auch Produktionsmitarbeiter involviert waren. Es ergaben sich folgende Projektziele:

- (teil-)automatisierte Erfassung der auftragsbezogenen Maschinenbelegungszeiten abhängig von den Maschinenzuständen
- Übertragung der Zeiten in das Warenwirtschaftssystem und Ermöglichung der Kategorisierung auftretender Stillstandszeiten
- Visualisierung der Produktionskennzahlen und der Maschinenzustände in einem Dashboard

Aus den allgemeinen Zielen konnten die spezifischen technischen Anforderungen abgeleitet werden. So sollte einerseits der Prozess zur Datenerfassung verschlankt und für den Anwender vereinfacht werden, um die Qualität der Daten zur Weiterverarbeitung zu steigern und diese Daten automatisiert in die vorhandenen Systeme einzuspielen. Ein weiterer Aspekt war die Reduktion möglicher Fehlerquellen bei der Dateneingabe. Dies erfolgte beispielsweise durch vordefinierte Störursachen, die der Mitarbeiter auswählt und so die Auswertung der Zustände vereinfacht, aber auch durch automatische Aufzeichnung des Wechsels des Maschinenzustandes, der von einer entwickelten Logik erkannt wird.

### 3.2 Prozessanalyse/-modellierung

Um ein gemeinsames Verständnis zu entwickeln, wurde eine an BPMN (Business Process Model and Notation) angelehnte



**Bild 2.** Zusammenwirken zwischen Mitarbeiter, embedded PC und vorhandenen Systemen. Bild: TU Chemnitz

Prozessmodellierung genutzt, die sich an den Abläufen des Mitarbeiters an der jeweiligen Maschine zur Wertschöpfung orientiert (**Bild 2**). Zusätzlich wurden die Aspekte der Datenerfassung über einen embedded PC und dessen Ankopplung an die SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) ergänzt, um spezifische Maschinensensoren, wie beispielsweise eine Lichtschranke zur Stückzahlfassung, abzugreifen.

Durch die gemeinsame Definition des Soll-Prozesses konnten unterschiedliche Varianten für die Informationsflüsse in die nachfolgenden Systeme untersucht werden. Es stellte sich heraus, dass eine Kommunikation zwischen den Systemen an der Maschine selbst und den übergeordneten Systemen, wie der Warenwirtschaft, nur im geringen Maß für die Funktionalität notwendig ist, sodass die Verbindungen und Interaktionen der Systeme auf ein Minimum begrenzt werden konnten. Dies reduziert mögliche Störquellen, die während des Betriebes auftreten können. Dieses Vorgehen ermöglicht gleichzeitig ein Verständnis der Abläufe zu entwickeln, sowohl für die in der Produktion notwendigen, als auch die daran anknüpfenden in der Datenerzeugung und -verarbeitung. Abschließend dient dieses Prozessmodell zur Vorbereitung eines Lastenheftes für die Ausschreibung der Entwicklung der gewünschten Funktionalitäten.

### 3.3 Prototypische Implementierung

Während der Prozessmodellierung wurde die technische Umsetzung jeweils iterativ detailliert. So sollte etwa die Datenerfassung und Interaktion mit dem embedded PC durch den Einsatz eines Barcodescanners vereinfacht werden. Gleichzeitig ließen sich hieraus die Anforderungen an die Technik des embedded PCs ableiten. Dieser sollte in der Lage sein auf der 24-V-Spannungsebene Signale von Sensoren zu verarbeiten, USB-Schnitt-

stellen für den Einsatz eines Barcodescanners enthalten und in der Lage sein über ein Touch Display mit dem Bediener zu interagieren. Mindestens eine Netzwerkschnittstelle zur Kommunikation mit externen Systemen war gefordert. Gleichzeitig sollte die Technik kostengünstig und modular sein, sodass deren Einsatz auf weitere Anlagen skaliert werden kann.

Im Projekt fiel die Wahl auf ein System, das auf einem Raspberry-Pi-Compute-Modul basiert, mit zusätzlichem Modul für digitale Datenein- und Ausgänge (DIO), wofür sich die Hardwarekosten auf circa 700 Euro pro Maschine beliefen. Ein Vorteil dieser Lösung war, dass keine zusätzlichen Software-Lizenzkosten anfielen, da zur Umsetzung der Logik und der Schnittstellen das Open-Source-Entwicklungswerkzeug „Node-RED“ für datenstromorientierte Programmierung zum Einsatz kam. Die Eingaben der Mitarbeiter wurden mit einer Webapplikation ermöglicht, die direkt an der jeweiligen Maschine über einen berührungsempfindlichen Monitor bedient wird. Für den Benutzer vor Ort wurde der Prozess zur Dateneingabe so vereinfacht, dass die Umschaltung der Maschine in den jeweiligen Betriebszustand durch einen Vor-Ort-Scan von vordefinierten QR-Codes ermöglicht wurde. Einzelne Zustandsübergänge werden von der entwickelten Logik auch automatisiert erkannt und gebucht. Der Mehrwert für Maschinenbediener ergibt sich daraus, dass keine weiteren Wege zu zentralen BDE-Terminals notwendig sind. Auch erfolgt die Kategorisierung von Störungen auf dem Touchscreen beziehungsweise die Datenerfassung etwa von Stückzahlen automatisiert, ebenso wie deren Verarbeitung und Ablage in eine zentrale SQL-Datenbank im Unternehmen (**Bild 3**).

Die eingangs angesprochenen Kriterien der Datenqualität nach Wang werden dahingehend verbessert, dass der Mitarbeiter durch den geschlossenen Prozess bei der Datenerfassung unterstützt wird. Somit steigt das Ansehen der erfassten Daten sowie deren

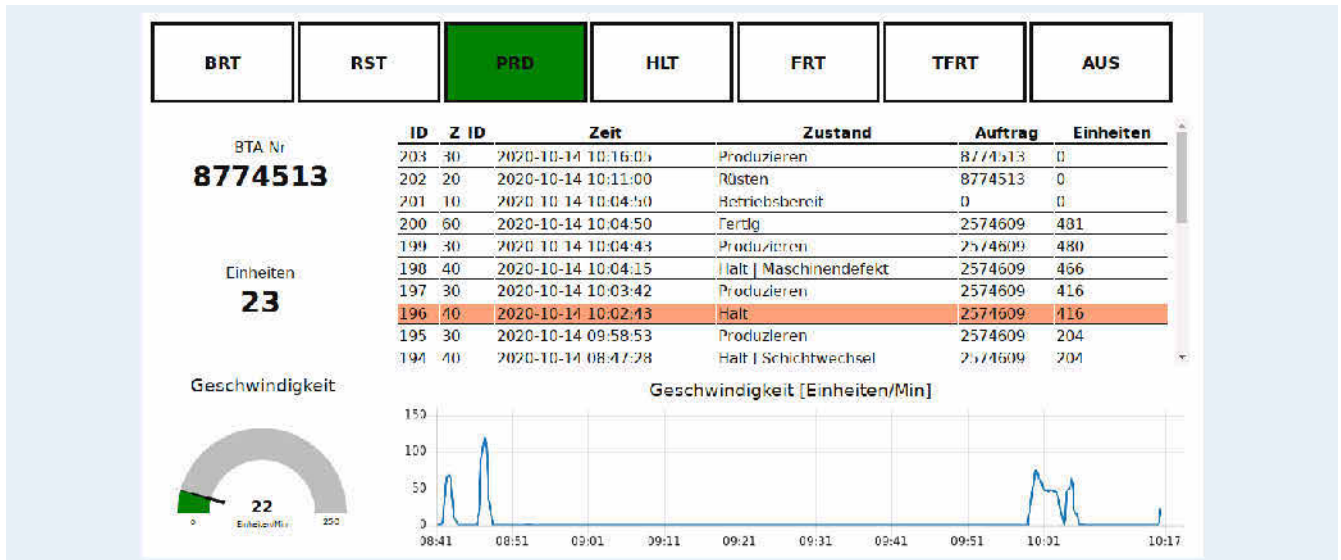


Bild 3. Weboberfläche am embedded PC an der Maschine. Bild: TU Chemnitz

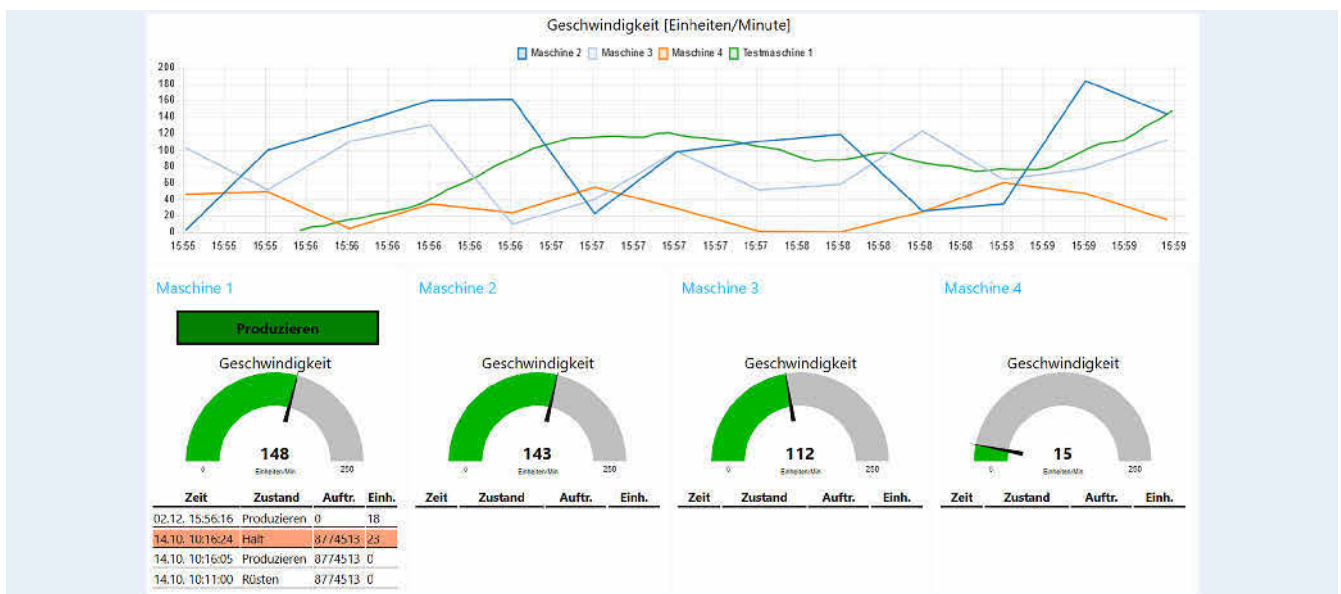


Bild 4. Dashboard der Produktionsleitung für die Produktionssteuerung. Bild: TU Chemnitz

Fehlerfreiheit, Glaubwürdigkeit, Aktualität und Vollständigkeit. Die Prozessmodellierung während der Konzeptionierungsphase setzte sich mit den benötigten Auftrags- und Stammdaten aus der Warenwirtschaft auseinander, um Redundanzen zu minimieren und die Objektivität der Daten zu steigern. [3]

Gleichzeitig kann dem Mitarbeiter der Mehrwert geboten werden, die Erfassung und Kategorisierung von Störungen direkt an seiner Anlage vorzunehmen, sodass nach Abschluss eines Auftrages eine weitere aufwendige Datenpflege entfällt. Für andere Mitarbeiter im Unternehmen besteht zusätzlich die Möglichkeit in Echtzeit auf die erfassten Daten zuzugreifen und sich einerseits über den Maschinenzustand zu informieren und gleichzeitig die wichtigsten Produktionskennzahlen zu sehen. Durch die Speicherung der Daten im Unternehmen können diese Daten für weitere Anwendungen, beispielsweise für die Optimierung von Durchlaufzeiten oder zur Schaffung von Transparenz, genutzt werden.

### 3.4 Begleitende Einführung und Evaluation

Das System zur Datenerfassung wurde in der Experimentier- und Digitalfabrik der Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb prototypisch aufgebaut, vorkonfiguriert und getestet. So konnten in einem halbtägigen Aufbau im Unternehmen alle Schnittstellen angeschlossen werden und das System in den produktiven Modus zur Datensammlung geschaltet werden. Das Unternehmen war anschließend in der Lage, die Auswertungsfunktionen in den Dashboards zu nutzen und so gezielt Potenziale in der Produktionsplanung zu erkennen und daraus Maßnahmen für die Optimierung des Produktionssystems abzuleiten, beispielsweise die Optimierung von Nebenprozessen, um die Maschinenauslastung und damit auch die Produktionsleistung zu steigern (Bild 4).

Erst die erfassten hochaufgelösten Rückmeldedaten für die auftragspezifische Produktionsgeschwindigkeit versetzten das

Unternehmen in die Lage, Abweichungen im Rahmen der Produktionssteuerung festzustellen und daraus Maßnahmen beispielsweise bei der Ver- und Entsorgung der jeweiligen Anlagen abzuleiten. Die Geschwindigkeitsprofile machten sichtbar, zu welchen Zeitpunkten die Maschinen mit einem geringeren Durchsatz betrieben wurden, um Nebentätigkeiten, wie etwa den Palettenwechsel durchzuführen.

Für die Steuerung der Produktion wurde aufbauend auf den generierten Daten ein Dashboardkonzept entwickelt, welches der Produktionsleitung zur Unterstützung bei operativen Entscheidungen dient. Als relevante Kriterien im Projekt sind die Geschwindigkeit der jeweiligen Anlagen, die gefertigten Einheiten und eventuelle Anlagenstörungen zu nennen. Basierend darauf können Entscheidungen getroffen werden, um operativ in den Produktionsprozess einzugreifen und eventuelle Auftragsfolgen zu verändern.

Durch die prototypische Umsetzung ergaben sich weitere Anknüpfungspunkte, die das Unternehmen mit einem regionalen IoT-Dienstleister umsetzen möchte. Dieser soll das System zum einen auf alle Maschinen im Unternehmen ausrollen, aber auch den Funktionsumfang erweitern, um die automatisierte Datenverarbeitung und digitale Informationsbereitstellung auch vertikal zu integrieren, mit dem Ziel noch weniger Papier für die Produktionssteuerung zu nutzen.

## 4 Fazit und Ausblick

Durch das Projekt konnte ein Beitrag zur fortschreitenden Digitalisierung im Mittelstand geleistet werden. Mit den klaren Zielen von allen Beteiligten und mit einem abgegrenzten und überschaubaren Funktionsumfang, konnte ein kosteneffizientes System zur Erfassung und Visualisierung von Daten für die PPS umgesetzt werden.

Dieser Impuls setzte wiederum Ideen und Potenziale für die weiterführende Digitalisierung frei. Die gespeicherten Produktionsgeschwindigkeiten können zukünftig auftragsspezifisch einen direkten Soll-Ist-Vergleich im Dashboard ermöglichen. So sind für die Produktionsleitung leichter Prozessabweichungen festzustellen. Diese Idee könnte bis hin zum Digitalen Zwilling für die Produktionsplanung erweitert werden, um im Vorfeld die Auftragsreihenfolge besser festzulegen oder aber auf Abweichungen noch besser und schneller reagieren zu können. Um qualitativ hochwertige Aussagen zu zukünftigen Produktionsreihenfolgen über einen digitalen Zwilling zu treffen, ist die entsprechende Datenbasis notwendig. Auftrags- und auch anlagenspezifische Bearbeitungszeiten ermöglichen es, ein zukünftiges Systemverhalten besser zu antizipieren und die Qualität der Auftragsterminierung zu steigern.

## DANKSAGUNG

Das Projekt wurde durchgeführt durch das Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Chemnitz im Rahmen von Mittelstand-Digital, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Weitere Informationen finden sich unter [www.betrieb-machen.de](http://www.betrieb-machen.de) und [www.mittelstand-digital.de](http://www.mittelstand-digital.de).

## Literatur

- [1] Seitz, M.; Härtel, L.; Hübner, M. et al.: PPS-Report 2017/2018. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 12, S. 840–844
- [2] Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Obermaier, R. et al.: Produktionsmanagement. Berlin: De Gruyter Oldenbourg Verlag 2017
- [3] Wang, R. Y.: A product perspective on total data quality management. Communications of the ACM 41 (1998) 2, pp. 58–65
- [4] Park, H.; Ji, B.; Lee, M. et al.: Conceptual Development Process of Mass-customizable Data Analytics Services for Manufacturing SMEs. In: Lödging, H.; Riedel, R.; Thoben, K.-D. et al. (Edit.): Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. IFIP WG 5.7 Proceedings of the International Conference APMS 2017, Hamburg, 2017, Part I. Cham: Springer International Publishing 2017, pp. 194–201
- [5] Ellwein, C.; Elser, A.; Riedel, O.: Production Planning and Control Systems: Breakage in Connectivity: Make them fit to fit altering conditions. Proceedings of the 2018 International Conference on Computers in Management and Business (ICCMB ,18). Association for Computing Machinery, New York, USA, 2018, pp. 54–58
- [6] Jeske, T.; Weber, M.-A.; Klues, J. et al.: Strukturierung und Analyse von Praxisbeispielen zur Nutzung der Digitalisierung für das Produktivitätsmanagement. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72 (2018) 3, S. 190–199
- [7] Löpelt, M.; Wilsky, P.; Ruffert, J. et al.: Sensorauswahl für Bestandsanlagen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 5, S. 273–276



Dipl.-Ing. **Pierre Grzona**  
Bild: TU Chemnitz

Dipl.-Inf. **Daniel Fischer**

Prof. Dr.-Ing. habil. **Ralph Riedel**  
Technische Universität Chemnitz  
Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb  
Erfenschlager Str. 73, 09125 Chemnitz  
Tel. +49 371 / 531-23220  
[fpl@tu-chemnitz.de](mailto:fpl@tu-chemnitz.de)  
[www.tu-chemnitz.de/mb/FabrPlan/](http://www.tu-chemnitz.de/mb/FabrPlan/)



## Wandlungsfähige Fabriken dimensionieren

# Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit

C. Cevirgen, J. Hook, P. Nyhuis

Die Fabrikplanung versucht, Veränderungen zu antizipieren und strukturelle Anpassungen durch die Dimensionierung vorzudenken. Inkrementelle Anpassungen über die ausgewiesene Fläche reichen dafür oft nicht aus, sodass Investitionen anfallen, die in einer frühen Planungsphase unter hoher Unsicherheit zu initiieren sind. Der Beitrag greift daran anknüpfende Herausforderungen auf und zeigt den Bedarf einer verbesserten Entscheidungsunterstützung zur zukunfts-sicheren Dimensionierung von Fabriken auf.

### STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Wandlungsfähigkeit, Risikobewertung

## Dimensioning changeable factories – Investment decisions under uncertainty

Factory planning tries anticipating changes that might occur in the future to consider structural adjustments through the correct factory dimensioning. Often incremental adjustments over the designated area are not sufficient, making investments necessary. In an early factory planning phase, such investments have to be planned and initiated under increasing uncertainty. This article addresses the related challenges and shows the need for improved decision support in case of factory dimensioning.

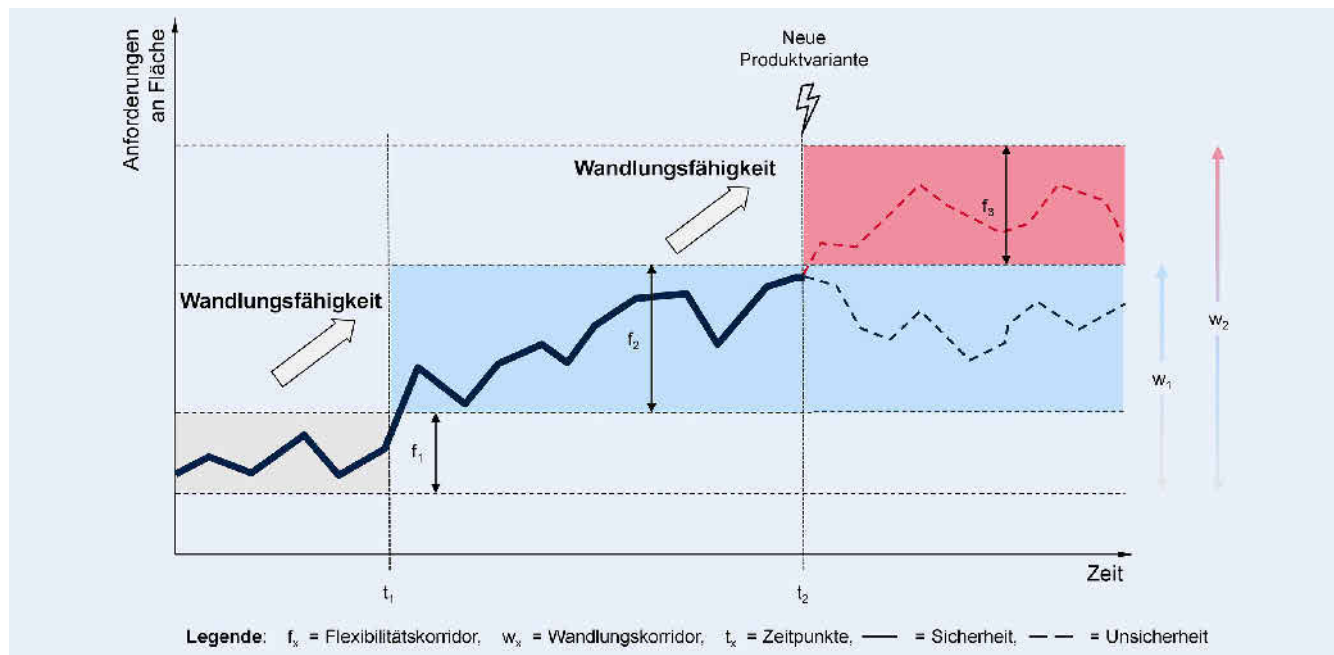
## 1 Einleitung

Unternehmen sind stark daran interessiert, die Entwicklungen interner sowie externer Einflüsse und die daraus resultierenden Veränderungen in ihren Fabriken zu antizipieren. Dies ist durch den Einfluss einer Vielzahl an Megatrends ein schwieriges Unterfangen. Megatrends sind Tiefenströmungen des Wandels. Sie prägen als globale Entwicklungskonstanten graduell, aber dafür grundlegende wirtschaftliche, soziale und politische Ebenen der Gesellschaft. Die sich daraus entwickelnden Marktturbulenzen sind Teil der Unternehmensumwelt, wodurch Fabriken einer immerwährenden Veränderung unterliegen [1–3]. Dabei stellt insbesondere die Individualisierung der Produktion, die durch eine ausgeprägte Variantenvielfalt und Verkürzung der Produktlebenszyklen geprägt ist, Unternehmen vor weitreichende Herausforderungen. Obendrein schwankt die Nachfrage nach Produkten zusätzlich wettbewerbs- und konjunkturbedingt [4,5]. Der Aufwand zur Bewältigung der Veränderungen in den Fabriken durch die Dynamik im Produktionsprogramm kann somit als hoch eingestuft werden [6–8]. Abhängig vom Projektumfang ist in der Fabrikplanung oftmals ein hoher Kapitaleinsatz erforderlich. In der Konzeptplanung, einer frühen Phase der Fabrikplanung (vgl. [9]), werden die Größen Betriebsmittel, Personal und Fläche dimensioniert [3,5,10,11]. Diese Größen gelten als wesentliche Treiber für die Investitionskosten einer Fabrik [5]. Neben knappen Ressourcen müssen Fabrikplaner in einer solch frühen Phase vor allem mit unvollständigen Informationen umgehen können [12]. Aufgrund der turbulenten Bedingungen mangelt es an verlässlichen Prognosen bezüglich der Märkte, Produkte und Technologien, sodass Fabriken insbesondere durch eine vorgedachte

Wandlungsfähigkeit ihre Wirtschaftlichkeit erhalten oder ausbauen können [10]. Die Wandlungsfähigkeit lässt sich durch ausgewiesene Flächen einzelner Funktionsbereiche einer Fabrik in einer frühen Fabrikplanungsphase berücksichtigen. Trotz aller Unsicherheiten im Planungsablauf müssen verlässliche quantitative Aussagen zu den Dimensionierungsgrößen (insbesondere der Fläche) gegeben und darauf aufbauend den Folgen der Investitionskosten gegenübergestellt werden. Erst dann lässt sich eine nachvollziehbare Positionierung zwischen der Wandlungsfähigkeit einer Fabrik und deren Investitionskosten vornehmen. Genau hier setzt dieser Beitrag an und möchte die Herausforderungen in Bezug auf eine wandlungsfähige Dimensionierung unter Unsicherheit mit Blick auf die Investitionskosten aufzeigen.

## 2 Auswirkungen der Unsicherheit in Bezug auf die Dimensionierung

Hauptaufgabe der Fabrikplanung ist die zukunftsfähige Auslegung und Gestaltung der Produktionsfaktoren einer Fabrik [5]. Nach Wöhe und Döring lässt sich der Begriff ‚Planung‘ als „die gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Handelns durch Abwägen verschiedener Handlungsalternativen und Entscheidung für den günstigsten Weg“ definieren [13]. In Planungstätigkeiten werden Entscheidungen getroffen, die in die Zukunft gerichtet und somit oftmals mit Unsicherheiten behaftet sind [14]. In der betriebswirtschaftlichen Entscheidungstheorie können je nach Form der vorliegenden Informationen Entscheidungen unter Sicherheit oder Unsicherheit getroffen werden [13, 15]. Können die Auswirkungen einer Entscheidung mit absoluter Sicherheit vorausgesagt werden, greifen deterministische Regeln. Sind die Auswir-



**Bild 1.** Flächenanforderungen im Zeitverlauf (in Anlehnung an [24]). Bild: IFA

kungen einer Entscheidung gänzlich oder zu Teilen mit Unsicherheit behaftet, müssen diese entweder unter einem Risiko (Wahrscheinlichkeiten des Auftretens eines Ereignisses sind bekannt) oder mit einer Ungewissheit (Wahrscheinlichkeiten des Auftretens eines Ereignisses sind unbekannt) getroffen werden [16]. Um Planungsentscheidungen unter Ungewissheit wohlüberlegt und quantifiziert zu treffen, müssen diese in ein Risiko überführt und damit probabilistisch behandelt werden. Im Planungsablauf sollte sich dieser Transfer in einer geeigneten Methodenwahl widerspiegeln. Durch die Dimensionierung müssen bereits in einer besonders frühen Fabrikplanungsphase zukunftsweisende Entscheidungen über langfristige Investitionen einer Fabrik getroffen werden, die maßgeblich durch mehrdimensionale Unsicherheiten beeinflusst werden. Die treibende Kraft der Fabrikdimensionierung stellt das Produktionsprogramm dar [11]. Durch dieses sind die Produktionstechnologien und -verfahren determiniert, die in der Kapazitätsbedarfsermittlung des Werks münden. Aufgrund der begrenzten Zeit und Informationsunschärfe bezüglich der Planungsrandbedingungen (unter anderem Produktionsprogramm, Technologieauswahl) müssen notgedrungen Vereinfachungen für den Transfer von Unsicherheiten in Risiken getroffen werden, die es im weiteren Planungsablauf und Betrieb kontinuierlich zu schärfen gilt [17]. Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass eine Zunahme der Unsicherheiten in Bezug auf die Planungsrahmenbedingungen existiert, je weiter die Zukunft der Fabrik vorausgeplant wird.

Eine Fabrik sollte in Anbetracht der übergeordneten Wirtschaftlichkeit stets ein optimales Verhältnis zwischen der Leistungserbringung und der eingesetzten Ressourcen (hier hauptsächlich Flächen) vorweisen. Aufgrund der Marktdynamik verändert sich dieses theoretische Optimum kontinuierlich [3, 18]. Klassische Fabrikplanungsansätze begegnen dieser Unsicherheit mit der Forderung nach einer erhöhten Flexibilität, die oftmals in einer unpräzisen und gelegentlich auch unüberlegten Überdimensionierung in Form von vorgehaltenen Reserveflächen endet, ohne dabei den resultierenden unwirtschaftlichen Überkapazi-

täten genügend Beachtung zu schenken [18]. Um derartigen Schwächen im Planungsablauf zu begegnen, konnte sich in den vergangenen Jahren die Betrachtung der Wandlungsfähigkeit zunehmend in der Fabrikplanung etablieren. Nach *Wiendahl* und *Hernandez* beschreibt die Wandlungsfähigkeit das Potenzial einer Fabrik, auf Veränderungen (zum Beispiel im Produktionsprogramm) in einer für den Markt angemessenen Geschwindigkeit und unter Einhaltung der Wirtschaftlichkeit einer Fabrik im Lebenszyklus zu reagieren [19, 20]. Zur Gestaltung einer wandlungsfähigen Fabrik hat *Hernandez* aufbauend auf verschiedenen Vorarbeiten die Wandlungsbefähiger entworfen (vgl. [19]), die in einem weiteren Schritt durch die Arbeit von *Heger* weiterentwickelt wurden [21]. Aus der Literatur lassen sich fünf Wandlungsbefähiger entnehmen: Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität [22, 23]. Insbesondere die Mobilität, Skalierbarkeit und Modularität stellen entscheidende Faktoren für die Nutzung der Fläche einer Fabrik dar. Die Mobilität bezieht sich hauptsächlich auf die Betriebsmittel und deren Eignung zur Beweglichkeit im Raum. Großanlagen wie Härteöfen oder Lackieranlagen bilden monumentale Elemente einer Fabrikstruktur, die durch ihre Unbeweglichkeit Flächen auf unbestimmte Zeit im Layout für sich beanspruchen und dieser somit die Wandlungsfähigkeit rauben [18]. Reserveflächen, die unter der Skalierbarkeit aufgegriffen werden, ermöglichen ein kurzfristiges räumliches Atmen in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Bedarfsorts [19]. Eine modulare Flächenzuweisung für Betriebsmittel oder Bereiche gestattet Fabrikplanern eine „reibungsfähige“ Planung und Anpassung im Falle einer Umstellung. Der Grund, warum der Wandlungsfähigkeit in der Fläche ein hoher Stellenwert ausgesprochen werden muss, lässt sich aus **Bild 1** entnehmen.

Zu sehen ist ein zeitlicher Verlauf der Flächenanforderungen (zum Beispiel in Quadratmeter) an eine Fabrik, die sich durch interne und externe Rahmenbedingungen ergeben. Innerhalb dieser Anforderungen lassen sich verschiedene Flexibilitäts- und Wandlungskorridore ablesen. Schwanken die Anforderungen innerhalb eines Flexibilitätskorridors ( $f_x$ ), kann die im Produkti-

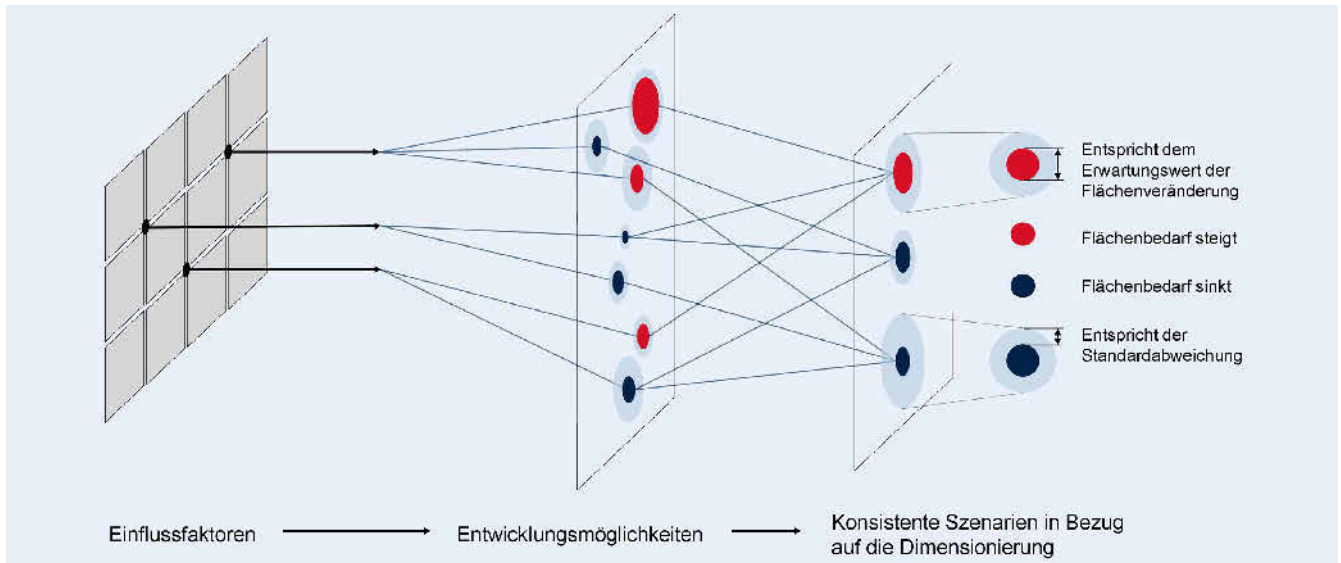


Bild 2. Entwicklung verschiedener Investitionskosten (in Anlehnung an [26, 27]). Bild: IFA

onssystem integrierte Flexibilität (zum Beispiel vorgehaltene Flächen in der Materialbereitstellung) darauf adäquat reagieren. Die damit notwendige Veränderung kann ohne einen Umbau oder Rückbau durch das System getragen werden. Sobald ein Veränderungsimpuls so groß ist (zum Beispiel Stückzahlanstieg), dass die Grenzen eines solchen Flexibilitätskorridors überschritten werden, bedarf es struktureller Anpassungen, die durch die Wandlungsbefähiger getragen werden. Diese bewirken ein Verlassen des Flexibilitätskorridors in den Grenzen des Lösungsraums des vorgedachten Wandlungskorridors ( $w_x$ ). Bereits zum Zeitpunkt  $t_1$  ist ersichtlich, dass das vorliegende Produktionssystem den Flexibilitätskorridor  $f_1$  überschreiten wird. Zum Zeitpunkt  $t_2$  (Einführung einer neuen Produktvariante) können die Anforderungen an die Fläche, wie angedeutet, zwei unsichere Verläufe (blau, rot) annehmen. Im blauen Verlauf wird von Stückzahlen ausgegangen, bei denen das Produktionssystem mit der im System enthaltenen Flexibilität weiterhin am Markt tätig sein kann. Der Wandlungskorridor  $w_1$  hat demnach weiterhin Bestand. Ein anderes Bild zeigt sich im roten Verlauf, da in diesem Fall lediglich ein vergrößerter Wandlungskorridor  $w_2$ , zum Beispiel durch eine Flächenerweiterung durch ein neues Hallenschiff, die vom Markt geforderten Stückzahlen bewältigen kann. Das mit diesen Unsicherheiten konfrontierte Unternehmen muss bereits frühzeitig zu diesen möglichen Entwicklungen fabrikplanerisch Stellung beziehen, indem durch Planungsentscheidungen entweder Investition vollständig getätigt (zum Beispiel Hallenerweiterung), vorbereitet (zum Beispiel Infrastruktur auf Grundstück) oder zurückgehalten werden.

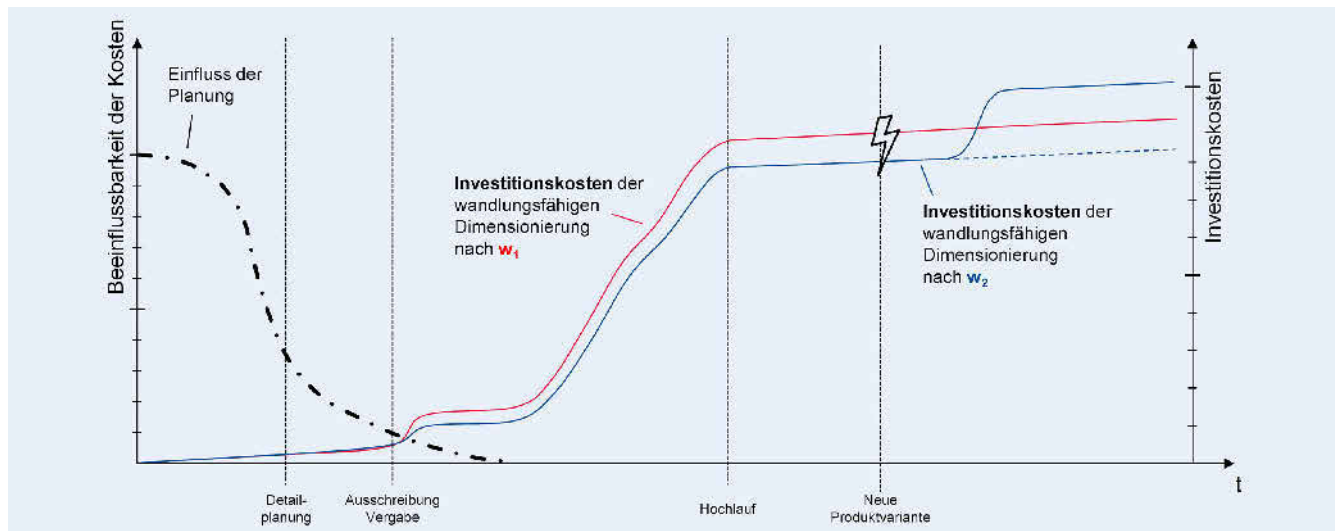
Bei der Betrachtung der Fabrik und deren Umfeld gilt es, Unsicherheiten für die Zukunft aufzuzeigen und für den Planungsprozess zu berücksichtigen. Mithilfe der Szenario-Technik lassen sich unterschiedliche Entwicklungen basierend auf der Ausprägung verschiedener Einflussfaktoren betrachten [19]. Aufbauend auf den Entwicklungsmöglichkeiten lassen sich Lösungsräume aufspannen, in deren Rahmen unterschiedliche Szenarien Berücksichtigung finden. Bild 2 visualisiert die beschriebene Herleitung der Szenarien.

Bild 2 verdeutlicht in abstrahierter Form, dass Einflussfaktoren jeweils unterschiedliche Entwicklungen aufweisen können.

Werden diese unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten zusammengeführt, ergeben sich Szenarien, die basierend auf denselben Einflussfaktoren unter Berücksichtigung unterschiedlicher Entwicklungen vollständig unterschiedliche Zukunftsbilder darstellen können. Diese grundsätzliche Systematik ist in Bild 2 ergänzt um Aussagen bezüglich der Flächenbedarfe unterschiedlicher Entwicklungsmöglichkeiten und Szenarien, die jeweils durch Kreise dargestellt werden. Farblich gekennzeichnet ist auf diese Weise schnell ersichtlich, ob eine Entwicklungsmöglichkeit (oder ein Szenario) sich positiv oder negativ auf den Flächenbedarf auswirkt. Der Durchmesser der entsprechenden Kreise gibt Aufschluss über den Erwartungswert der Flächenänderung und wird ergänzt um einen äußeren Ring, der entsprechend der Größe die zugehörige Standardabweichung angibt. Diese Ergänzungen der klassischen Darstellung der Szenariotechnik befähigen die Methodik dazu, Zukunftsbilder nicht nur aufzuzeigen, sondern darüber hinaus hinsichtlich ihrer Auswirkung (auf die Fläche) zu bewerten. Um die Wahrscheinlichkeit der Auswirkungen zu bestimmen, müssten die quantifizierten Unsicherheiten (Risiken) einzelner Entwicklungsmöglichkeiten für die Einflussfaktoren mittels einer geeigneten Methode (zum Beispiel Monte-Carlo-Simulation) aggregiert werden. Basierend darauf können die entwickelten Szenarien mit einem Risiko (Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen auf den Flächenbedarf) versehen werden und quantifizierte Entscheidungen hinsichtlich der Fabrikdimensionierung getroffen werden [17, 25]. Die Dimensionierung sollte möglichst präzise und unter Berücksichtigung des zukünftig maximal notwendigen Flächenbedarfs erfolgen. Die risikobasierte Szenariotechnik erlaubt dabei, unrealistische Entwicklungen bei der Planung auszublenden. Grundsätzlich ist eine Fabrik derart zukunftsrobust zu planen, dass nachhaltiges Wirtschaften für die Zukunft auch in einem dynamischen Umfeld möglich ist.

### 3 Investitionskalkulation bei wandlungsfähigen Fabriken

Der Grad der Wandlungsfähigkeit bei der Dimensionierung ist für Unternehmen insoweit erfolgskritisch, als dass dieser einen wesentlichen Handlungsspielraum für das Fortbestehen am Markt



**Bild 3.** Entwicklung konsistenter Flächenszenarien (in Anlehnung an [19]). Bild: IFA

festlegt und dabei gleichzeitig als Kostentreiber auftritt. Grenzenlose Überdimensionierungen sind für kein Unternehmen nachhaltig tragbar, da neben den Investitionskosten auch weitere Kosten entlang des Fabriklebenszyklus berücksichtigt werden müssen [26]. Als Schwierigkeit gilt im Allgemeinen, dass die Beeinflussbarkeit der anfallenden Kosten mit Projektfortschritt sinkt, während die Vorhersagegenauigkeit und die tatsächlichen Investitionen gleichzeitig steigen [26, 27]. Dies bedeutet für die Planung, dass in den ersten Projektphasen erforderliche Entscheidungen unter hoher Unsicherheit bezüglich der Investitionshöhe zu treffen sind. **Bild 3** zeigt, wie sich die Beeinflussbarkeit der Investitionskosten in einem Bauprojekt entlang des Projektfortschritts verhält.

Während anfänglich vor allem die Festlegung des Kostenrahmens von Bedeutung ist, tritt ab dem Zeitpunkt der Ausschreibung die Kostenüberwachung in den Vordergrund [27]. Bei Fabrikplanungsprojekten wird bereits in einer frühen Projektphase eine erste Abschätzung der Dimensionierung vorgenommen, sofern die grundsätzlichen Projektanforderungen geklärt sind [10]. Daraus ergibt sich die Schwierigkeit, die Dimensionierung unter hoher Unsicherheit durchführen zu müssen (vgl. Kapitel 2). Entlang des Projektfortschritts und einer sinkenden Beeinflussbarkeit der Kosten stellt Bild 3 beispielhaft die realen Investitionen kumuliert dar. Bis zur Ausschreibung und Vergabe der Gewerke steigen die Plan- und Baunebenkosten nahezu linear an. Im Anschluss beginnen die realen Investitionen zu steigen. Begründet ist dies durch Kosten für Grundstück, Erschließung und weitere einmalige hohe Investitionen [26]. Bild 3 zeigt zwei Verläufe für das gleiche Bauvorhaben (zum Beispiel für eine Neu- oder Erweiterungsplanung). Beide Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf an, weisen aber unterschiedlich hohe Kosten zum Zeitpunkt des Hochlaufs auf. Verantwortlich dafür ist eine unterschiedliche Flächendimensionierung der Projekte, die sich erstmalig durch Investitionen wie den Erwerb des Grundstücks bemerkbar machen kann und den weiteren Verlauf der Kurven beeinflusst. Diese Beeinflussung der Kurvenverläufe nach der Ausschreibung und Vergabe ist auf die Kosten des Gebäudes und dessen (wandlungsfähiger) Ausstattung entsprechend der zu bebauenden Fläche zurückzuführen. Nach dem Hochlauf bewegen sich die Kurven etwa parallel. Eine leichte Steigung ist begründet

durch fortwährende Investitionen im laufenden Fabrikbetrieb und der Notwendigkeit ständiger Anpassungen [11, 28]. Am Beispiel der Einführung einer neuen Produktvariante zeigt sich, warum eine Dimensionierung zu Gunsten eines größeren Wandlungskorridors nach  $w_2$  (vgl. Bild 1) sinnvoll sein kann. Während die Variante nach  $w_2$  ohne größere Investitionen in zum Beispiel Gebäude oder Grundstück auf diese Veränderung reagieren kann, fällt für die Dimensionierung nach  $w_1$ , die kostenseitig bislang vorteilhaft gewesen wäre, durch den Eintritt einer Veränderung (zum Beispiel Einführung einer neuen Produktvariante) eine hohe Investition an. Um den neuen Flächenbedarf decken zu können, müssen ausgehend von der Dimensionierung nach  $w_1$  Planungs- und Realisierungsprojekte in Form eines Immobilienkaufs, eines Anbaus oder sonstiger Maßnahmen zur Flächenerweiterung angestoßen werden, die erhebliche Mehrkosten mit sich bringen.

Wie ein Unternehmen sich hier systematisch positionieren kann, wurde in der Literatur noch nicht abschließend behandelt. Hernandez bediente sich in diesem Rahmen der Szenariotechnik, um zukünftige Ereignisse zu antizipieren [19]. Diese Herangehensweise ist später um eine finanzielle Sicht durch Klemke auf die Wandlungsfähigkeit ergänzt worden [29]. Der Fokus liegt bei den beschriebenen Ansätzen auf der Wandlungsfähigkeit im Allgemeinen und nicht etwa dem Zielkonflikt zwischen dem Grad der Wandlungsfähigkeit, der unmittelbar auf die Dimensionierung zurückzuführen ist und der damit verbundenen Investitionshöhe. Zudem lassen beide Ansätze keine Bewertung der Unsicherheiten und somit der Ergebnisse der Szenariotechnik zu (vgl. Bild 2). Weig [25] und Unzeitig [17] ergänzen in ihren Ansätzen diese Dimension, blenden jedoch den benötigten Grad der Wandlungsfähigkeit zur Positionierung aus. Zukünftig möglicherweise eintreffende Szenarien können jedoch auf diese Weise mit Wahrscheinlichkeiten hinterlegt werden. Bezogen auf die Frage nach der sinnvollen Dimensionierung einer Fabrik können daraus bereits wertvolle Rückschlüsse gezogen werden. Was in diesem Rahmen zusätzlich fehlt, ist die Betrachtung des finanziellen Aspekts einer Fabrikdimensionierung.

Um sich in dem Konflikt aus Wandlungsfähigkeit und Kosten zu positionieren, bedarf es daher neben konsistenter und bewerteter Szenarien einer Systematik, die es erlaubt unterschiedliche



Varianten der Fabrikdimensionierung unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen aus investitionstechnischer Sicht zu vergleichen. Unsicherheiten sind mit Wahrscheinlichkeiten und Kosten zu versehen, zum anderen sind Investitionsanstiege, ausgelöst durch zusätzliche Flächenbedarfe, vorherzusagen. Es bleibt festzuhalten, dass hier weitere Forschungsansätze benötigt werden, um zukünftig Dimensionierungs- und Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit in der Fabrikplanung richtungsweisend im Sinne der Wandlungsfähigkeit zu unterstützen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn eines Fabrikplanungsprojekts und somit dem Zeitpunkt der Flächendimensionierung ist die Beeinflussbarkeit der Investitionskosten sehr hoch. Der zukünftig benötigte Flächenbedarf ist allerdings nicht bekannt und muss antizipiert werden. Um im Bedarfsfall reaktionsfähig zu sein, lassen sich Fabriken wandlungsfähig dimensionieren. Die Schwierigkeit liegt hierbei in der unscharfen Informationslage zum Zeitpunkt der Dimensionierung im Fabrikplanungsprozess. Dabei ist neben dem Grad der Wandlungsfähigkeit auch die Höhe der Investitionen unter Unsicherheit zu berücksichtigen. Für diese Herausforderung gibt es noch keinen entscheidungsunterstützenden Ansatz, der Fabrikplanern bei einer Positionierung im Spannungsfeld von Investitionskosten und dem Grad der Wandlungsfähigkeit konkrete Abhilfe leistet.

Aufbauend auf der in diesem Beitrag beschriebenen Forschungslücke möchte das Institut für Fabrikanlagen und Logistik in künftigen Forschungsarbeiten einen aus wirtschaftlicher Sicht zu empfehlenden Positionierungsbereich aufzeigen, der unter Berücksichtigung zukünftiger Unsicherheiten und der Höhe der Investitionskosten einen umfassenderen Entscheidungsrahmen für die Dimensionierung einer Fabrik vorgibt.

### Literatur

- [1] Baum, B.: Technologietrends – eine Darlegung zu ausgewählten Aspekten. In: Burchardt, E. u. Lücke, B. (Hrsg.): Technologieorientierter Innovationsprozess – Ziele, Instrumente, Management für die Zukunft. Stuttgart: Steinbeis-Ed. 2004, S. 15–27
- [2] Wulf, S.: Bewertung des Einflusses von Produkt- und Technologieveränderungen auf die Fabrik, Leibniz Universität Hannover Dissertation. Hannover 2011
- [3] Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009
- [4] Gille, C.; Zwißler, F.: Bewertung von Wandlungstreibern. Voraussetzung einer wandlungsfähigen Unternehmensausrichtung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 5, S. 310–313
- [5] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014
- [6] Heinen, T.: Planung der soziotechnischen Wandlungsfähigkeit in Fabriken, Leibniz Universität Hannover Dissertation. Hannover 2011
- [7] Koch, S.: Methodik zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Fabriken im Maschinen- und Anlagenbau, Hochschule Aachen Dissertation. Aachen 2011
- [8] Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F.: Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für die Zukunftsrobustheit von Fabriken. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser 2005, S. 8–15
- [9] VDI-Richtlinie 5200: Fabrikplanung Planungsvorgehen / Factory Planning Procedures (2011)
- [10] Wiendahl, H.-H.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Hanser 2014
- [11] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. München: Hanser 2015
- [12] Unzeitig, W.; Rubesa, J.; Schafner, M.; Stocker, A.; Ramsauer, C.; Flasch, M.: Eine Methode zur Berücksichtigung von Unsicherheit im Zuge der frühen Fabrikplanung in der Auftragsfertigung von Gesamtfahrzeugen. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 131 (2014) 7, S. 212–218
- [13] Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München: Vahlen 2000
- [14] Schwaiger, W. S.: IFRS-Finanzmanagement: Kosten- und Leistungsrechnung. Wien: Institut für Managementwissenschaften 2013
- [15] Scholl, A.: Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen – Konzepte und Methoden – experimentelle Untersuchungen. Heidelberg: Physica-Verlag 2001
- [16] Knight, F. H.: Risk, uncertainty and profit. Boston: Houghton Mifflin 1921
- [17] Unzeitig, W.: Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten, TU Graz 2014
- [18] Erlach, K.; Foith-Förster, P.: Dimensionierung wandlungsfähiger Fabriken. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 3, S. 125–128
- [19] Hernández, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit, Leibniz Universität Hannover Dissertation. Hannover 2002
- [20] Wiendahl, H.-P.; Hernandez, R.: Wandlungsfähigkeit – neues Zielfeld in der Fabrikplanung. Industrie Management 16 (2000) 5, S. 37–41
- [21] Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten, Leibniz Universität Hannover Dissertation. Hannover 2006
- [22] ElMaraghy, H. A.; Wiendahl, H.-P.: Changeability. An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. Springer Series in Advanced Manufacturing. London: Springer London 2009, S. 3–24
- [23] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. CIRP Annals 56 (2007) 2, S. 783–809
- [24] Zäh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production. 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (2005)
- [25] Weig, S.: Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablaufund Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten, Technischen Universität München. München 2008
- [26] Girmscheid, G.: Projektentwicklung in der Bauwirtschaft – prozessorientiert. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016
- [27] Sommer, H.: Projektmanagement im Hochbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016
- [28] Lanza, G.; Nyhuis, P.; Fisel, J.; Jacob, A.; Nielsen, L.; Schmidt, M.; Stricker, N.: Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlage 2018
- [29] Klemke, T.: Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken [Dissertation]. Leibniz Universität Hannover. Garbsen: PZH Verlag 2014



**Cihan Cevirgen**, M. Sc.  
Bild: IFA

**Justin Hook**, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. habil. **Peter Nyhuis**  
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA)  
Leibniz Universität Hannover  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
Tel. +49 511 / 762-18182  
cevirgen@ifa.uni-hannover.de  
www.ifa.uni-hannover.de

Ein digitales Werkzeug zur Bewertung aller Flussbeziehungen in der Strukturplanung

# Positionierung von Funktionseinheiten in der Fabrik

C. Kaucher, S. Gessert, K. Erlach

Die Positionierung von Funktionseinheiten in der Fabrik stellt eine wesentliche Aufgabe der Fabrikplanung dar. Die neu entwickelte „flussorientierte Positionierungsmethode“ erlaubt es, alle relevanten Flussbeziehungen zwischen den Funktionseinheiten zu berücksichtigen. In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines digitalen Werkzeugs zur effizienten Anwendung dieser Methode vorgestellt. Dieses ermöglicht die Visualisierung von Strukturalternativen in der Fabrikplanung einschließlich eines schnellen quantitativen Vergleichs.

## STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Digitalisierung, Materialfluss

## A digital tool for the assessment of all flow relations in structure planning – Positioning of functional units in the factory

One of the main tasks of factory planning is the positioning of functional units in the factory. The now developed ‘flow-oriented positioning method’ considers all relevant flow relations between the functional entities. This article presents the development of a digital tool for an efficient application of this method. It allows the visualization of structural alternatives in factory planning including a rapid quantitative comparison.

## 1 Positionierung von Funktionseinheiten in der Fabrikplanung

Im Rahmen der Fabrikplanung wird unter dem Begriff ‚Layout‘ die Anordnung von betrieblichen Funktionseinheiten verstanden. Eine wesentliche Aufgabe der Anordnungsplanung ist die Ermittlung der relativen Positionierung der Funktionseinheiten zueinander. [1, 2] Diese soll eine effiziente Anordnung der Funktionseinheiten unter der Berücksichtigung aller Flussbeziehungen ermöglichen. In der Regel wird für eine „optimale“ Funktionsanordnung jedoch nur der Materialfluss betrachtet. [3] Eine Methode zur Berücksichtigung von mehreren Flussbeziehungen stellt die von *Muther & Hales* entwickelte Funktions-Beziehungs-Matrix (FBM) dar [4]. *Kaucher et al.* ergänzen diese Methode um die vollständige Berücksichtigung der für die Positionierung relevanten Flussbeziehungen sowie um ein Scoringverfahren auf Basis einer definierten Positionierungsstruktur. Mit dieser ‚flussorientierten Positionierungsmethode‘ (FOP) wird somit die quantitative Vergleichbarkeit von Strukturalternativen ermöglicht. [5] Zum effizienten Einsatz der FOP in der industriellen Praxis ist ein anwenderfreundliches digitales Werkzeug entwickelt worden.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die Anordnungsplanung gegeben und die FOP vorgestellt. Anschließend erfolgen die Herleitung der Anforderungen an das digitale Werkzeug und deren Umsetzung. Abschließend wird der Einsatz dieses digitalen Werkzeugs im Projekt „FoFeBat – Forschungsfertigung Batterie zelle Deutschland“ dargestellt.

## 2 Die flussorientierte Positionierungsmethode

Die in der Anordnungsplanung vorgenommene Positionierung von Funktionseinheiten (zum Beispiel Maschinengruppen, Meisterbereiche oder Werkstätten, vgl. [1]) hat einen dauerhaften Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Fabrik. Die relative Positionierung der Funktionseinheiten zueinander stellt daher eine entscheidende Aufgabe in der Anordnungsplanung dar. [2] Diese ist nach dem Fabrikplanungsvorgehen der VDI 5200 der Strukturplanung zuzuordnen und dient im weiteren Planungsverlauf als Grundlage für die Entwicklung des Layouts [6]. Von besonderer Bedeutung für die Fabrikplanungspraxis sind heuristische Positionierungsverfahren. Ein häufig verwendetes Verfahren dieser Klasse stellt das modifizierte Dreiecksverfahren nach *Schmigalla* dar. [7, 8] Dieses ordnet die Funktionseinheiten nach der Stärke ihrer jeweiligen Materialflussbeziehungen in einem Dreiecksraster an [9]. Wie bei den meisten Verfahren zur Positionierung von Funktionseinheiten werden dabei nur die Materialflussbeziehungen berücksichtigt [1, 2]. Eine ausschließlich materialflussorientierte Positionierung von Funktionseinheiten greift jedoch zu kurz, da zudem weitere Flussbeziehungen relevant sind [3]. Ein verbessertes Positionierungsverfahren sollte alle relevanten Flussbeziehungen berücksichtigen.

Die neu entwickelte FOP stellt ein entsprechendes Verfahren dar (vgl. [5]). Dabei handelt es sich um eine Erweiterung der von *Muther & Hales* im ‚Systematic Layout Planning‘ vorgestellten Methode (vgl. [4]). Zu Beginn des Ablaufs der erweiterten Methode erfolgt eine Aufstellung aller Funktionseinheiten im betrachteten Bereich (zum Beispiel Fabrik). Die Funktionseinheiten

ten werden in einer Matrix gegenübergestellt und es erfolgt eine Bewertung der jeweiligen Stärken der Flussbeziehungen zwischen den Funktionseinheiten von 4 (absolut notwendig) bis -1 (unerwünscht). Diese Bewertung wird im Rahmen von Workshops mit den betroffenen Prozessexperten durchgeführt. Zu bewerten sind dabei alle für die Anordnungsplanung relevanten Arten von Flussbeziehungen. Dabei können die sechs Kategorien Materialfluss, Betriebshilfsmittelfluss, Personenfluss, Informationsfluss, Energiefluss und Emissionsfluss unterschieden werden. Im Anschluss werden aus der FBM so genannte Funktions-Beziehungs-Diagramme (FBD) entwickelt. Diese stellen graphische Repräsentationen der Funktionseinheiten sowie der zugehörigen Flussbeziehungen dar. Im Gegensatz zum Vorgehen nach *Muther & Hales* (vgl. [4]) erfolgt die Erstellung der FBD in der erweiterten Methode auf einem Dreiecksraster, welches beispielsweise im modifizierten Dreiecksverfahren nach *Schmigalla* eingesetzt wird (vgl. [9]). Die FBD erhalten so eine klare Struktur mit definierten, gleichmäßig verteilten Positionen der Funktionseinheiten. Diese Struktur der Darstellung ermöglicht einen vereinfachten optischen Vergleich von Lösungsalternativen. Zudem stellt das Raster in Referenzmaßen die Basis für das in die FOP integrierte Scoringverfahren dar, das eine quantitative Bewertung der erzeugten Lösungen ermöglicht. Dabei wird je Lösungsalternative nach Formel (1) eine gewichtete Gesamtdistanz der Lösung berechnet. Die gewichtete Gesamtdistanz ist ein dimensionsloses Maß für die Güte einer Lösungsalternative. Dabei ist jeweils die Alternative mit dem geringsten Wert zu bevorzugen. [5]

$$GD = \sum_{i=1}^n g_i * \overline{FE1_i FE2_i} \quad (1)$$

GD: Gesamtdistanz einer Lösung, gewichtet nach Beziehungsstärke  
i: Nummer der betrachteten Beziehung  
n: Gesamtanzahl betrachteter Beziehungen  
g<sub>i</sub>: Gewichtung der Beziehung  
 $\overline{FE1_i FE2_i}$ : Abstand zwischen den beiden Funktionseinheiten der Beziehung in Referenzmaßen (Seitenlängen der Dreiecke im Raster)

Um einen Überblick möglicher Lösungsalternativen zu erhalten, folgt die Strukturplanung dem „Prinzip der Variantenbildung“ (vgl. [10]). Dazu werden zunächst unterschiedliche Strukturalternativen gestaltet und bewertet. Aus den betrachteten Alternativen wird schließlich eine Struktur entwickelt, die weiterverfolgt wird. [6] Es handelt sich bei der Strukturplanung somit um einen Prozess, der ein hohes Maß an Kreativität erfordert und die Leistungsfähigkeit der Fabrik entscheidend beeinflusst. *Wiendahl et al.* bezeichnen diesen sogar als den „kreativsten und wichtigsten Schritt einer Fabrikplanung“ [11]. In der Praxis ist der Schritt von einem kreativen Ausprobieren einer hohen Zahl an Lösungsalternativen mit jeweils unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften geprägt. Eine manuelle Berechnung aller gewichteten Gesamtdistanzen ist mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden und führt jeweils zu Unterbrechungen des kreativen Prozesses. Daher ist ein digitales Werkzeug zur grafikbasierten Erstellung und automatisierten quantitativen Bewertung von FBD in der industriellen Anwendung von großem Nutzen.

### 3 Anforderungen an ein digitales Werkzeug zur Positionierungsplanung

Das digitale Werkzeug soll den Prozess der Strukturplanung optimal unterstützen. Dazu sind vom Werkzeug zwei Basisanforderungen zu erfüllen. Zum einen soll dieses in der Lage sein, automatisiert aus einer ausgefüllten FBM eine graphische Darstellung der Funktionseinheiten und ihrer Beziehungsqualitäten zu erzeugen. Dieser automatisch generierte Vorentwurf dient als Ausgangspunkt für die kreative Entwicklung von flussorientierten FBD durch den Anwender. Zum anderen soll das Werkzeug für die entwickelten FBD automatisiert die jeweilige gewichtete Gesamtdistanz berechnen können. Durch die Automatisierung dieser beiden Schritte lassen sich schnell und aufwandsarm Strukturalternativen entwickeln und bewerten.

Mit einer automatisierten Berechnung der gewichteten Gesamtdistanz wird auch die Integration von Spiel-Design-Elementen in Workshops zur Entwicklung von Strukturalternativen möglich. Die Spiel-Design-Elemente ‚Punkte‘ sowie ‚Bestenlisten‘ lassen sich direkt auf Basis der gewichteten Gesamtdistanz integrieren. In Ergänzung sind zudem individuelle ‚Leistungsgraphen‘ der Workshopsteilnehmer umsetzbar. Spiel-Design-Elemente wirken motivationssteigernd und sorgen zudem in quantitativer und qualitativer Hinsicht für eine Leistungsverbesserung. [12, 13]

Neben den beiden oben genannten Basisanforderungen lassen sich weitere Zusatzanforderungen identifizieren, welche zu einer Verbesserung der praktischen Anwendbarkeit des Werkzeugs führen. Das Werkzeug sollte

- zur besseren Übersichtlichkeit eine optische Zuordenbarkeit von Funktionseinheiten zu Funktionsarten wie Produktion oder Logistik gewährleisten,
- zur Verbesserung der Beurteilbarkeit der Lösungsqualität neben der gewichteten Gesamtdistanz auch das theoretische Minimum (vgl. [5]) ausgeben,
- zur schnellen Ausprobierbarkeit von Alternativen ein einfaches Abspeichern und Laden von Zwischenlösungen ermöglichen und
- zur Vereinfachung der Positionierung der Funktionseinheiten eine Fokussierung auf bestimmte Beziehungen, beispielsweise der Stärken „4“ und „3“, ermöglichen.

Im folgenden Abschnitt wird dargestellt, wie sich die identifizierten Anforderungen in einem digitalen Werkzeug umsetzen lassen.

### 4 Digitales Werkzeug zur flussorientierten Positionierung von Funktionseinheiten

Aufgrund der weiten Verbreitung und der intuitiven Bedienbarkeit wird für das Werkzeug auf die Microsoft Software Excel und Visio zurückgegriffen. Microsoft Excel wird dabei für die Erstellung der FBM sowie für die Berechnungen verwendet, während mittels Microsoft Visio die graphische Darstellung der FBD erzeugt wird. Die Programmierung des Werkzeuges erfolgt auf Basis der Microsoft-Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA).

Das digitale Werkzeug gliedert den Methodenablauf in sieben Schritte. Die Schritte sowie die Art ihrer Implementierung sind in **Bild 1** dargestellt. Die ersten vier Schritte dienen der Erstellung der FBM sowie der Beziehungstabelle und werden in Microsoft Excel durchgeführt. Zunächst erstellt der Anwender im ersten



Schritt eine Liste der zu betrachtenden Funktionseinheiten, einschließlich deren jeweiliger Zuordnung zu den Funktionsarten, beispielsweise zu Produktion oder Logistik. Aus der Auflistung baut sich im zweiten Schritt automatisiert eine leere FBM auf, die der Anwender im dritten Schritt zusammen mit den Mitarbeitern der Funktionseinheiten befüllt. Nach dem Befüllen der FBM startet der Anwender im vierten Schritt ein Makro, welches für jede befüllte Zelle der Matrix eine Zeile in der Beziehungstabelle erzeugt. Diese gibt jeweils Auskunft über die beiden an der Beziehung beteiligten Funktionseinheiten sowie die jeweilige Beziehungsstärke.

Nach Abschluss der Erstellung von FBM und Beziehungstabelle folgt im fünften Schritt die Erzeugung der graphischen Ausgangslösung. Diese wird automatisiert in Microsoft Visio durchgeführt und erfüllt somit die erste der beiden Basisanforderungen an die digitale Methodenumsetzung. Dazu greift ein Makro auf die in Schritt 1 erzeugte Auflistung der Funktionseinheiten zu. Für jede zu betrachtende Funktionseinheit wird ein Knoten erzeugt, der jeweils durch ein ‚Shape‘ (Bezeichnung für ein Element in Visio) repräsentiert wird. Diese Knoten werden auf den Kreuzungspunkten eines im Microsoft-Visio-Teil der Anwendung zur Verfügung stehenden Dreiecksrasters platziert. Die Farbe des Shapes gibt dabei Aufschluss über die jeweilige Zuordnung zu den Funktionsarten und erfüllt so die erste Zusatzanforderung. Im Anschluss werden die Knoten schrittweise auf Basis der Beziehungstabelle entsprechend ihrer jeweiligen Beziehungen durch Kanten verbunden. In Abhängigkeit der Stärke der Beziehung kommen dabei Kanten unterschiedlicher Farbe und Dicke zum Einsatz. Nach dem Durchgang durch die Beziehungstabelle liegt eine graphische Ausgangslösung vor.

Im nun folgenden sechsten Schritt werden aus der graphischen Ausgangslösung flussorientierte FBD in Alternativen entwickelt. Dabei handelt es sich um eine kreative Tätigkeit, die vom Planungsteam manuell durchgeführt wird. Die Shapes der Funktionseinheiten werden dabei auf den Kreuzungspunkten des Dreiecksrasters umsortiert. Wenn eine aus Sicht des Planers grundsätzlich geeignete Lösung erzeugt wurde oder eine Zwischenauswertung gewünscht ist, wird im siebten Schritt eine Berechnung der gewichteten Gesamtdistanz durchgeführt. Diese erfolgt automatisiert und erfüllt so die zweite Basisanforderung. Dazu wird die Koordinatenposition der Shapes in Microsoft Visio ermittelt und nach Microsoft Excel übertragen. Dort wird aus den Koordinaten der Funktionseinheiten für jede Beziehung die Distanz zwischen den beteiligten Funktionseinheiten berechnet und mit dem jeweiligen Bewertungsfaktor der Beziehungsstärke multipliziert. Die Summe aller gewichteten Distanzen wird in Microsoft Visio als gewichtete Gesamtdistanz der Lösung ausgegeben. Zusammen mit der gewichteten Gesamtdistanz wird auch das theoretische Minimum des Positionierungsproblems ermittelt und ausgegeben, um so die zweite Zusatzanforderung zu erfüllen. Da die Strukturplanung durch ein kreatives Ausprobieren geprägt ist, werden die Schritte 6 und 7 in der Regel mehrfach durchlaufen.

Zur Erfüllung der dritten und vierten Zusatzanforderung wurden weitere Funktionen für den Anwender implementiert, die ergänzend zum methodischen Planungsvorgehen (vgl. Bild 1) angeboten werden. Die Anforderung des Speicherns und Ladens von Zwischenlösungen wird durch eine Export-Funktion erfüllt. Diese erzeugt eine Excel-Datei, in die Bezeichnungen und Positionen der Shapes der Funktionseinheiten geschrieben werden. Die Datei kann bei Bedarf zur Wiederherstellung einer exportier-



Bild 1. Methodenablauf in der digitalen Umsetzung. Bild: Fraunhofer IPA

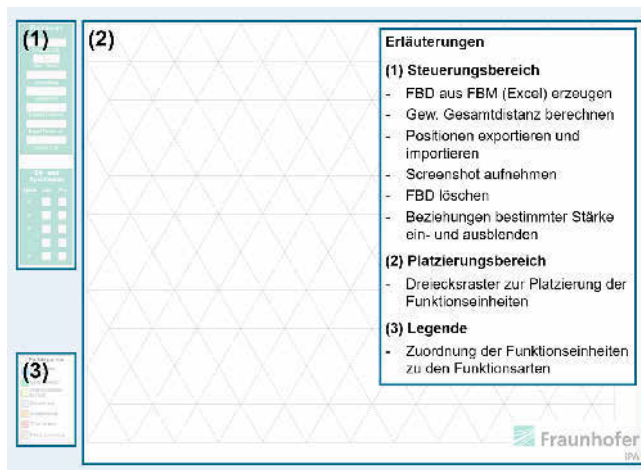


Bild 2. Benutzeroberfläche des Werkzeugs in Microsoft Visio.

Bild: Fraunhofer IPA

ten Lösungsalternative wieder importiert werden. So bleibt bei einem Optimierungsversuch die ursprüngliche Lösung erhalten und eine einfache Dokumentation unterschiedlicher Strukturvarianten wird ermöglicht.

Um eine Fokussierung auf bestimmte Beziehungsarten zu ermöglichen, werden diese bereits bei Erzeugung je Beziehungsstärke auf einem eigenen Layer (Ansichtsebene) angelegt. Je Beziehungsstärke steht eine Schaltfläche zur Verfügung, die den entsprechenden Layer sichtbar beziehungsweise unsichtbar schaltet. So wird es beispielsweise bei großen Positionierungsproblemen möglich, zunächst eine fokussierte Optimierung der stärksten Beziehungen vorzunehmen.

Die Benutzeroberfläche des Werkzeugs in Microsoft Visio zeigt Bild 2. Im links angeordneten Funktionsbereich stehen dem Anwender Schaltflächen für die bereits beschriebenen Funktionen zur Verfügung (1). Rechts davon befindet sich der Platzierungsbereich mit dem Dreiecksraster (2). Durch Aufruf der entsprechenden Funktion werden auf den Kreuzungspunkten des Drei-



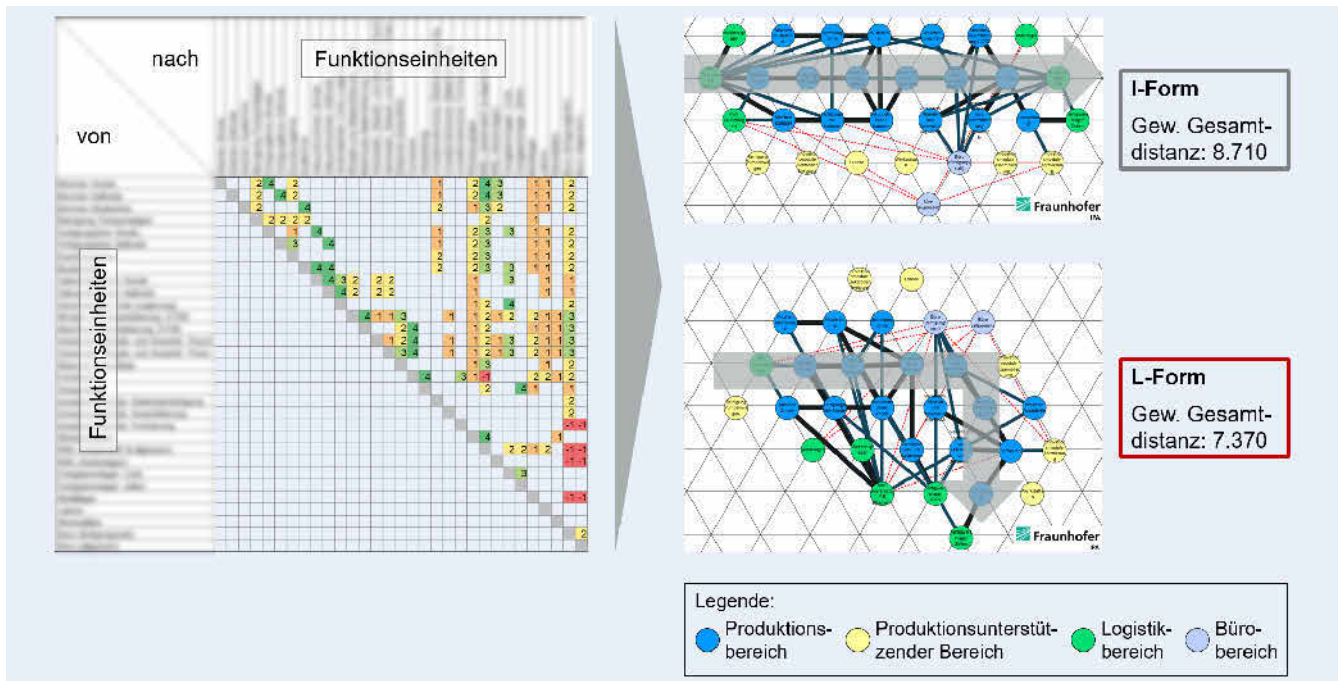


Bild 3. FBM und FBD (Auszug) des Anwendungsbeispiels. Bild: Fraunhofer IPA

ecksraster die Shapes der Funktionseinheiten erzeugt und entsprechend der in der FBM dokumentierten Beziehungen miteinander verbunden. Zur Gewährleistung einer guten Übersichtlichkeit sind die Shapes entsprechend ihrer funktionalen Zuordnung (zum Beispiel Produktion) farblich markiert. Aus der Legende im linken unteren Bereich geht diese Zuordnung zu den Funktionsarten hervor (3).

## 5 Anwendung in der Fabrikstrukturplanung einer Batteriezellfertigung

Das im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Werkzeug wurde in der Fabrikstrukturplanung des Projekts „FoFeBat – Forschungsfertigung Batterie zelle Deutschland“ erfolgreich eingesetzt. Im Rahmen des Projekts erfolgt in Münster der Aufbau einer Forschungsfertigung für Batterie zellen (FFB). In dieser soll zukünftig Produktionsforschung in industriellem Maßstab betrieben werden, während gleichzeitig an neuen Fertigungstechnologien und Digitalisierungslösungen geforscht wird. Diese Konstellation sorgt dafür, dass in der FFB neben dem Materialfluss auch weitere Flussbeziehungen wie der Personal- und Betriebshilfsmittelfluss von besonderer Wichtigkeit sind. In Bezug auf den Personalfluss muss die Fabrikstruktur eine enge Verzahnung der Forscher mit den Mitarbeitern der Produktion ermöglichen und darüber hinaus die Möglichkeit bieten, Besuchergruppen effizient durch die FFB zu leiten. Im Forschungsbetrieb wird es zudem häufig notwendig sein Betriebshilfsmittel wie Prüfeinrichtungen oder neue Werkzeuge in die Produktion ein- und auszubringen. Dies ist bei der Gestaltung der Fabrikstruktur ebenfalls zu beachten. Die flussorientierte Positionierungsmethode (FOP) ermöglicht ein konsolidiertes Erfassen verschiedener Flussbeziehungen und stellt somit eine geeignete Methode zur Unterstützung der Strukturplanung im Projekt dar.

Zunächst wurde entsprechend des Vorgehens in Bild 1 eine Liste aller Funktionseinheiten erstellt. Die Befüllung der sich er-

gebenden FBM erfolgt im Regelfall in einem Workshop mit den betroffenen Prozessexperten. Aufgrund der Covid-19-Pandemie war es jedoch nicht möglich einen Präsenzworkshop mit allen Prozessexperten zur Befüllung der FBM durchzuführen. Stattdessen erfolgte die Diskussion der Beziehungen der Funktionseinheiten und die Befüllung der FBM in Online-Workshops. Bereits in diesem Schritt erwies sich die FBM als ein effektives Werkzeug um die Einschätzungen einer Vielzahl an Prozessexperten auch ohne Präsenzmeetings zentral zu konsolidieren und zu kommunizieren.

Die automatisch erzeugte graphische Ausgangslösung diente als Grundlage für die Entwicklung einer Vielzahl alternativen FBD durch Experten im kreativen Wettbewerb. Die erzeugten Alternativen wurden dabei immer wieder in Workshops mit Expertenteam und Nutzern vorgestellt und nachjustiert. Während der Entwicklungsphase wurde auf das Spiel-Design-Element der Bestenliste auf Basis der erzielten gewichteten Gesamtdistanzen zurückgegriffen. Diese wurde fortwährend aktualisiert und stachelte aufgrund des Wettbewerbscharakters den Ehrgeiz der Experten an.

Die entwickelten Alternativen richten sich nach grundsätzlichen Layout-Typen wie der I-, L- oder U-Form [3]. Insbesondere die nicht direkt am Produktionsprozess beteiligten Funktionseinheiten wurden vielfach in ihrer Position variiert, um die weiteren Flussbeziehungen neben dem Materialfluss ebenfalls optimal abzubilden. Bild 3 zeigt die FBM des Projekts sowie zwei auf Basis der FBM entwickelte FBD einschließlich der jeweiligen gewichteten Gesamtdistanz. In der Darstellung sind zur besseren Übersichtlichkeit mittlere und schwache Beziehungen ausgeblendet.

Im Ergebnis erzielt eine Struktur auf Basis der L-Form die niedrigste gewichtete Gesamtdistanz und stellt daher nach der Methode die beste Alternative dar. Die Entscheidung für eine Strukturalternative sollte jedoch nicht ausschließlich auf Basis der FOP getroffen werden [5]. Weitere Überlegungen in Bezug auf die Wandlungsfähigkeit und den Hauptmaterialfluss bestätigen

jedoch die Wahl einer L-Form als bevorzugte Struktur. Ähnlich gute Ergebnisse lassen sich auf Basis einer U-Form erzielen, während beispielsweise eine I-Form zu deutlich schlechteren Ergebnissen geführt hat. Dieses Ergebnis ist insofern überraschend, da rein industrielle Batteriezellfabriken aufgrund des gerichteten Materialflusses und des hohen Materialumschlags in der Regel als I-Form geplant werden (vgl. [14]).

## 6 Potenziale zur Weiterentwicklung des digitalen Werkzeugs

Die flussorientierte Positionierungsmethode stellt ein gutes Verfahren dar, um alle Flussbeziehungen in die sonst stark materiaflussdominierte Strukturplanung einzubeziehen. Durch die Umsetzung der Methode in einem digitalen Werkzeug können zeitaufwendige Operationen automatisiert und die praktische Anwendbarkeit gefördert werden. Daneben erlaubt das Werkzeug ein einfaches Ausprobieren von Alternativen und unterstützt den kreativen Prozess der Strukturplanung optimal. Als Grundlage für den weiteren Prozess der Konzeptplanung soll das Werkzeug in Zukunft um eine automatisierte Übertragung in eine flächenmaßstäbliche Darstellung ergänzt werden.

Die Anwendung von Gamification-Ansätzen mit Spiel-Design-Elementen wie ‚Punkten‘ und ‚Bestenlisten‘ zeigt vielversprechende Effekte auf die Motivation der Anwender des Werkzeugs. Diese Ansätze sollten in Zukunft beispielsweise in Form individueller ‚Leistungsgraphen‘ (vgl. [12]) zur Darstellung der erzielten Ergebnisse des jeweiligen Anwenders im Zeitverlauf weiter ausgebaut und zudem empirisch untersucht werden. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang, ob neben einer Steigerung der Motivation auch eine Verbesserung der Ergebnisqualität durch Gamification nachgewiesen werden kann.

### DANKSAGUNG

Die Anwendung des digitalen Werkzeuges in diesem Beitrag erfolgte im Rahmen des Projekts „FoFeBat – Forschungsförderung Batteriezelle Deutschland“. Für die Förderung dieses Projekts (Förderkennzeichen: 03XP0256) bedanken die Autoren sich herzlich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

### Literatur

- [1] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Wien: Hanser 1984
- [2] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. München: Hanser 2018
- [3] Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020
- [4] Muther, R.; Hales, L.: Systematic Layout Planning. Marietta (GA): Management & Industrial Research Publications 2015
- [5] Kaucher, C.; Gessert, S.; Erlach, K.: Flussorientierte Positionierungsmethode für die Fabrikplanung. Positionierung von Funktionseinheiten basierend auf der Funktions-Beziehungs-Matrix. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (2021) 3
- [6] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 5200 Blatt 1. Fabrikplanung. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2011
- [7] Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2001
- [8] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg 2014
- [9] Schmigalla, H.: Methoden zur optimalen Maschinenanordnung. Berlin: Verlag Technik 1970
- [10] Haberfellner, R.; Weck, O. de; Fricke, E. et al.: Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. Zürich: Orell Füssli 2015
- [11] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Hanser 2014
- [12] Sailer, M.: Die Wirkung von Gamification auf Motivation und Leistung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
- [13] Sailer, M.; Hense, J.; Mandl, H. et al.: Psychological Perspectives on Motivation through Gamification. Interaction Design and Architecture(s) Journal 19 (2013), S. 18–37
- [14] Exyte AG: Giga-LIB – Erforschung von Fertigungsmethoden für eine modular aufgebaute Lithium-Ionen-Zellen-Produktion zur Integration in Elektrofahrzeuge. Teilvorhaben: Erforschung eines ressourceneffizienten Fabrikkonzeptes bzgl. Material, Energie, Umwelt, Personal und Investition. Öffentlicher Schlussbericht für die technische Informationsbibliothek, Stuttgart, 2019



**Christian Kaucher, M. Sc.**  
Bild: Fraunhofer IPA

**Stephan Gessert, M. Sc.**

Dr. phil. Dipl.-Ing. **Klaus Erlach**  
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
 und Automatisierung IPA  
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
 Tel. +49 711 / 970-1865  
 christian.kaucher@ipa.fraunhofer.de  
 www.ipa.fraunhofer.de

## Methode zur Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie

# Digitalisierung in Großkonzernen

P. Kübler, M. Volkwein, O. Schöllhammer, T. Bauernhansl

Die digitale Transformation stellt für Unternehmen einen radikalen Wandel dar. In der Theorie weisen digitale Technologien große wirtschaftliche Potenziale auf. In der Praxis erzielen gerade Großkonzerne jedoch nicht die erhofften Erfolge. Eine dezidierte Digitalisierungsstrategie ist der Erfolgsfaktor für eine gelungene Transformation. Großkonzerne haben aufgrund ihrer Komplexität andere Herausforderungen zu bewältigen als kleine- und mittelständische Unternehmen. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe sich eine Digitalisierungsstrategie für Großkonzerne in fünf Phasen entwickeln lässt.

### STICHWÖRTER

Digitalisierung, Strategie, Management

## Method for developing a digital transformation strategy in large corporations

Digital transformation marks a radical change for many companies. In theory, digital technologies have enormous economic potential. In practice, however, large corporations in particular do not achieve the hoped-for success in the full range of applications. A dedicated digital transformation strategy is the key success factor for a successful digital transformation. Due to their complexity, large corporations face different challenges than small and medium-sized enterprises. This article presents a method that can be used to develop a digital transformation strategy for large corporations in five phases.

## 1 Einleitung

Die digitale Transformation steht für eine tiefgreifende Zäsur, die für viele Unternehmen einen radikalen Wandel bedeutet. Experten prognostizieren einen globalen wirtschaftlichen Mehrwert durch die Digitalisierung von bis zu 11 Billionen US-Dollar bis 2025. Dies entspricht einem Zehntel der geschätzten globalen Wirtschaftsleistung [1]. Die Digitalisierung beschränkt sich nicht nur auf die Konvertierung von analogen in digitale Informationen (englisch: Digitization), sondern umfasst zudem alle Veränderungen, die durch die Nutzung digitaler Technologien in allen Bereichen der Gesellschaft entstehen (englisch: Digitalization) [2].

Die Digitalisierung bietet Unternehmen enorme Potenziale. Durch die Digitalisierung informationsintensiver Prozesse können Prozesskosten um bis zu 90 % gesenkt werden [3]. Unternehmen, welche die digitale Transformation erfolgreich gestalten, nennen als Erfolgsfaktoren eine klar formulierte Digitalisierungsstrategie, eine kollaborative Unternehmens- und Führungskultur sowie die Förderung von Risikobereitschaft. Viele Unternehmen scheitern aber daran eine Unternehmenskultur zu etablieren, die den Wandel begünstigt. Große Herausforderungen sehen Unternehmen in einer fehlenden Digitalisierungsstrategie, anderen Prioritäten, Sicherheitsbedenken und mangelhaften technischen Fähigkeiten [4]. Eine dezidierte Digitalisierungsstrategie, welche eine Antwort auf diese Herausforderungen gibt, ist eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche digitale Transformation.

Bei der Entwicklung von Digitalisierungsstrategien für Großkonzerne müssen deren spezifische Herausforderungen berücksich-

tigt werden. Gemäß einer Befragung von etventure [5] ist das Fehlen qualifizierter Mitarbeiter mit „Digital Know-how“ die größte Herausforderung in Großunternehmen. Weiterhin werden die Unternehmen durch fehlende Zeit und mangelnde Erfahrung beim nutzerzentrierten Vorgehen zur digitalen Umsetzung von Produkten und Prozessen ausgebremst. Auch das Bestreben bestehende Strukturen zu verteidigen ebenso wie hohe Sicherheitsanforderungen werden von vielen als Hemmnis empfunden [5]. Hinzu kommt der Umstand, dass viele Unternehmen bereits erste Digitalisierungsinitiativen gestartet haben [6]. Erfahrungsgemäß folgen diese aber nur in wenigen Fällen einer übergeordneten Strategie und sollten daher bei der zukünftigen strategischen Ausrichtung explizit berücksichtigt werden.

In diesem Beitrag wird aufgezeigt, welche spezifischen Herausforderungen bei der Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie in einem Großkonzern entstehen und wie dabei vorgegangen werden sollte.

## 2 Stand der Technik

Strategische Ansätze werden durch ihren Bezugspunkt unterschieden, der sich auf das eigene Unternehmen, Kunden, Lieferanten, Wettbewerber oder auf das gesamte Ökosystem beziehen kann [7]. Ein bekannter Ansatz mit Bezug auf das eigene Unternehmen ist der „Resource-based View“ [8]. Der Theorie folgend, gewinnen Organisationen an Wert, indem sie ihre materiellen und immateriellen Ressourcen zielführend bündeln [8]. Unter Ressourcen werden wertvolle, seltene, schwer imitierbare und

nicht substituierbare strategische Vorteile verstanden, welche es Unternehmen ermöglichen, Markteintrittsbarrieren für andere Unternehmen zu schaffen [9]. Kundenorientierte Ansätze betonen die Notwendigkeit, die internen und externen Kompetenzen fortlaufend an die sich verändernden Marktbedingungen und Kundenanforderungen anzupassen [10]. Wettbewerbsvorteile können sich auch durch eine enge Zusammenarbeit mit den Zulieferern ergeben, wenn etwa bestimmte Vermögenswerte oder Wissen geteilt werden [11]. Während die vorgenannten Ansätze jeweils einen spezifischen Aspekt in den Fokus stellen, entwickelt Porter [12] einen ganzheitlicheren Ansatz, bei dem der Wettbewerb, potenzielle neue Wettbewerber, die Lieferanten und Kunden sowie mögliche Ersatzprodukte bei der Strategieentwicklung berücksichtigt werden. Darüber hinaus gibt es Ansätze, welche die Rolle des Unternehmens im Ökosystem als Ausgangspunkt für die Strategieentwicklung nutzen [7].

In der internationalen Literatur wird zwischen digitalen Unternehmensstrategien und digitalen Transformationsstrategien unterschieden [13]. Digitale Unternehmensstrategien integrieren Unternehmens- und IT-Strategien [13] und bauen mithilfe von digitalen Technologien spezifische Fähigkeiten auf, um schnell auf sich verändernde Marktbedingungen reagieren zu können [14]. Sie sind Teil von digitalen Transformationsstrategien. Diese gehen weiter, weil sie auch die Governance und entsprechende Richtlinien vorgeben, die erforderlich sind, um das Unternehmen erfolgreich digital zu transformieren [15].

Im Fokus dieses Beitrags stehen digitale Transformationsstrategien, die im Folgenden vereinfacht als Digitalisierungsstrategien bezeichnet werden. In der Literatur sind bereits Vorgehensweisen zur Entwicklung solcher Strategien beschrieben:

- Volkwein, Böhm und Bauernhansl [7] beschreiben eine Methode zur Entwicklung von Digitalisierungsstrategien für kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs). Die Methode besteht aus vier Schritten: Im ersten Schritt werden Mission und Vision entwickelt. Danach erfolgt eine Analyse der internen und externen Gegebenheiten. Im dritten Schritt wird die Digitalisierungsstrategie entwickelt. Diese umfasst die fünf Bereiche Produktion, Produkt, Prozesse, Geschäftsmodelle sowie Organisation. Im letzten Schritt erfolgt die Implementierung der Digitalisierungsstrategie [7].
- Lipsmeier et al. [16] beschreiben die Entwicklung von Digitalisierungsstrategien entlang der Elemente Vision, Leitprinzipien, Ziele und Fokusthemen, die anhand vorgefertigter Frameworks jeweils mit digitalisierungsspezifischen Inhalten gefüllt werden. Der Ansatz ist ganzheitlich und verfolgt die Bereiche Kultur, Kompetenzen, Produkte und Services, Wertschöpfung, IT/OT-Architektur und Wertschöpfungsnetzwerk.
- Becker et al. [17] nutzen zur Erarbeitung von Digitalisierungsstrategien das Werkzeug der Balanced Scorecard. Mit einem Readiness-Check werden die Elemente der Sachperspektive (Vision, Strategie, Ziele und Indikatoren) sowie der Verhaltensperspektive (etwa Bereitschaft zur Investition) entwickelt.

Diese Methoden verfolgen einen ganzheitlichen Ansatz, der neben der Leistungserstellung auch wichtige Erfolgsfaktoren in der Organisation und in der IT-Architektur berücksichtigt. Sie sind jedoch nicht auf die spezifischen Erfordernisse von Großunternehmen zugeschnitten, sondern richten sich entweder an KMU [7] oder sind generisch formuliert [16, 17]. Vor allem die Heterogenität der verschiedenen Geschäftseinheiten in Großkonzernen, die große Anzahl bereits verfügbarer Best Practices, die hohe

Vielzahl und Komplexität der Führungsgremien sowie die Vielfalt unterschiedlicher Produktionssysteme finden in den vorhandenen Methoden kaum Berücksichtigung. Es bedarf daher einer erweiterten Methode zur Strategieentwicklung speziell für Großkonzerne, welche einen großen Teil der gesamten Wertschöpfung in Deutschland repräsentieren [18].

Neben strategischen Vorgehensweisen existieren zahlreiche Reifegrad- und Bewertungsmodelle, welche den Einsatz digitaler Technologien in verschiedenen Unternehmensbereichen bewerten und die Implementierung digitaler Lösungen unterstützen. Beispielshaft sind hier zu nennen:

- Liebrecht et al. [19] beschreiben ein Modell, das 60 Methoden von Industrie 4.0 strategisch und monetär bewertet und damit eine Potenzialabschätzung für deren Einsatz ermöglicht.
- Liebrecht [20] stellt ebenfalls eine Methodik zur Entscheidungsunterstützung für den Einsatz von Industrie-4.0-Technologien in drei Schritten vor: Nach der Auswahl geeigneter Methodenstränge erfolgt deren Bewertung nach strategischen und monetären Gesichtspunkten. Mit einer „System Dynamics Simulation“ wird die optimale Implementierungsreihenfolge ermittelt.
- Der VDMA [21] stellt einen Werkzeugkasten Industrie 4.0 zur Verfügung, mit dessen Hilfe Unternehmen in den Bereichen Produkte und Produktion ihren digitalen Reifegrad bestimmen und eine Vorgehensweise zur weiteren Implementierung von Industrie-4.0-Technologien ableiten können. Basis sind ausformulierte Kriterien und dazugehörige Ausprägungsstufen von Technologien.
- Mittal et al. [22] entwickeln ein Reifegradmodell für digitale Technologien, das sich explizit an KMU richtet. In den Kategorien Finanzen, Mitarbeitende, Strategie, Prozess und Produkt können Einordnungen in Reifegradstufen vorgenommen und der Digitalisierungsprozess durch verschiedene Werkzeugbaukasten unterstützt werden.
- Schuh et al. [23] definieren sechs Stufen für Industrie-4.0-Entwicklungspfade, in die sich Unternehmen einordnen und damit ihren digitalen Reifegrad evaluieren können. Die sechs Stufen werden anhand verschiedener Unternehmensbereiche konkretisiert, sodass auch der strategische Weiterentwicklungsprozess hin zu Industrie 4.0 unterstützt wird.
- Schöllhammer et al. [24] stellen ein digitales Assessment bereit, das die Bereiche Strategie, smarte Produktion sowie smartes Produkt und ergänzend Lean Management als Voraussetzung berücksichtigt. Auch hier ist über die Einordnung in Reifegrade die Ableitung spezifischer Entwicklungspfade möglich.

Die bestehenden Reifegrad- und Bewertungsmodelle sind für den Bereich der Produktion bereits gut ausgearbeitet. Deshalb können sie für die zu erarbeitende Methode zur Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie in Großkonzernen übernommen werden. Für die Bereiche Produkte, Prozesse, IT und Organisation bedürfen sie jedoch einer Weiterentwicklung.

### 3 Methode zur Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie in Großkonzernen

Großkonzerne weisen spezifische Eigenschaften auf, die bei der Strategieentwicklung zu berücksichtigen sind. Dazu zählen unter anderem:



- Komplexer Organisationsaufbau aus Geschäftseinheiten mit unterschiedlichem Autonomiegrad sowie zahlreichen Hierarchiestufen
- Zahlreiche Stakeholder, Entscheidungsträger und informelle Meinungsmacher
- Diversifiziertes Produktportfolio mit unterschiedlichem Branchen-, Kunden- und Marktfokus
- Stark verschiedene Produktionssysteme, verteilt in einem globalen Wertschöpfungsnetzwerk

Bei der Entwicklung der Digitalisierungsstrategie ist eine Vielzahl unterschiedlicher Personengruppen zu involvieren. Auch sind die operativen, zwischen den einzelnen Geschäftseinheiten oft divergierenden, Rahmenbedingungen und die spezifischen Charakteristika verfügbarer Digitalisierungstechnologien zu berücksichtigen. Die Grundlage für die Methode zur Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie in Großkonzernen bildet der von Volkwein, Böhm und Bauernhansl [7] beschriebene Strategieansatz.

**Bild 1** zeigt die angepasste Methode.

In Phase 1 werden Leitbilder für die Bereiche Produktion, Produkte, Prozesse, IT und Organisation erstellt. Sie dienen der Organisation als Orientierungshilfe, etwa bei der Entwicklung und Auswahl geeigneter Digitalisierungsinitiativen und ermöglichen eine Festlegung der strategischen Eckpfeiler. **Bild 2** zeigt den strukturellen Aufbau der Leitbilder [25]:

Sie bestehen aus den Strukturelementen Reifegradmodell, Ziele, Visualisierung und Voraussetzungen. Das „Reifegradmodell“ beschreibt, welchen Zielreifegrad das Unternehmen erreichen möchte und wo es sich aktuell befindet. Als Grundlage hierfür kann das von Acatech entwickelte Reifegradmodell [23] dienen. Innerhalb der Reifegrade werden wesentliche Aspekte (Technologien oder Organisationsprinzipien) zur Erreichung der jeweiligen Reifegradstufe festgehalten. In den „Zielen“ ist festzuhalten, was in dem jeweiligen Bereich zu einem definierten Zeitpunkt erreicht werden soll. Dies können klassische, quantitative Ziele wie etwa Zeit, Kosten und Qualität aber auch qualitative Ziele wie Flexibilität sein. Hierzu werden zunächst die allgemeinen Unternehmensziele analysiert, um die Konsistenz der Digitalisierungsziele mit dem allgemeinen Zielsystem sicherzustellen. Basierend auf diesen Analysen wird ein erster Entwurf für die Digitalisierungsziele entwickelt. Dieser wird in Einzelinterviews mit den verantwortlichen Entscheidungsträgern diskutiert und abschließend in einem gemeinsamen Workshop finalisiert. Die Ziele sollten spezifisch und messbar sein: Im Bereich Organisation könnte dies etwa das Erreichen eines bestimmten Anteils der Beschäftigten sein, die Weiterbildungen zu digitalisierungsrelevanten Themen erhalten haben. Vor allem im Bereich Produkte empfiehlt es sich bei volatilen Marktbedingungen in Szenarien zu planen, um für unterschiedliche Marktentwicklungen, realistische Ziele setzen zu können. Methodisch kann hier auf die Szenario-Technik aus der strategischen Unternehmensplanung [26] zurückgegriffen werden. Die „Visualisierung“ dient dazu, den Führungskräften und Mitarbeitern eine Vorstellung zu geben, auf was das Unternehmen in den nächsten Jahren hinarbeitet. Um die Ziele erreichen zu können sind häufig „Voraussetzungen“ aus den Bereichen Budget, Mitarbeiter und Infrastruktur zu schaffen.

Die inhaltliche Ausgestaltung hängt stark vom Produktportfolio, den Produktionssystemen und anderen unternehmensspezifischen Eigenschaften ab. Dabei kommen Best Practices zum Einsatz, die auch branchenfremd sein können. Ergänzt werden sie durch branchenindividuelle Benchmarks, um so auch das Wett-



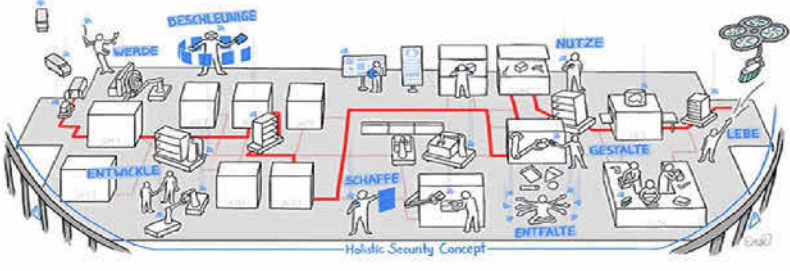
**Bild 1.** Methode zur Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie bei Großkonzernen. Bild: Fraunhofer IPA

bewerbsumfeld zu berücksichtigen. Anhand der Leitbilder können nicht nur die strategischen Grundausrichtungen innerhalb der Bereiche festgelegt, sondern auch die Relevanz der Bereiche priorisiert werden.

In Phase 2 wird der strategische Rahmen für die Digitalisierung entwickelt. Hierzu werden zunächst Interviews mit den relevanten Führungskräften durchgeführt, um die in Phase 1 festgelegten Eckpfeiler auszuarbeiten. Es wird unter anderem entschieden, welche Digitalisierungsziele das Gesamtunternehmen verfolgen wird, ob und welche Standorte interne Best Practices zuerst entwickeln und umsetzen und wie digitale Technologien im Produktportfolio genutzt werden. In dieser Phase werden die Leitbilder genutzt, um die einzelnen Unternehmensbereiche anhand der Reifegradmodelle zu bewerten und daran die zukünftige Ausrichtung zu diskutieren. Weitere Rahmenbedingungen für die Digitalisierung ergeben sich aus einer Analyse der Unternehmensstrategie beziehungsweise -mission.

In Phase 3 werden die Fähigkeiten bestimmt, die das Unternehmen haben muss, um den strategischen Rahmen umsetzen zu können. Hierzu werden zunächst die strategischen Soll-Fähigkeiten abgeleitet. Diese Fähigkeiten sind zentral für den zukünftigen Unternehmenswert und bedeuten einen Wettbewerbsvorteil. Methodisch wird bei der Definition der Fähigkeiten auf die von

## Leitbild für Produktion

	<b>Sichtbarkeit</b>	<b>Transparenz</b>	<b>Prognosefähigkeit</b>	<b>Adaptierbarkeit</b>
<b>Reifegradmodell</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspekt 1</li> <li>Aspekt ..</li> <li>Aspekt n</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspekt 1</li> <li>Aspekt ..</li> <li>Aspekt n</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspekt 1</li> <li>Aspekt ..</li> <li>Aspekt n</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspekt 1</li> <li>Aspekt ..</li> <li>Aspekt n</li> </ul>
<b>Ziele</b>	<b>Zeit</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ziel 1</li> <li>Ziel 2</li> <li>...</li> </ul>	<b>Kosten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ziel 1</li> <li>Ziel 2</li> <li>...</li> </ul>	<b>Qualität</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ziel 1</li> <li>Ziel 2</li> <li>...</li> </ul>	<b>...</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ziel 1</li> <li>Ziel 2</li> <li>...</li> </ul>
<b>Leitbild</b>				
<b>Voraussetzungen</b>	<b>Budget</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Voraussetzung 1</li> <li>Voraussetzung 2</li> <li>...</li> </ul>	<b>Mitarbeiter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Voraussetzung 1</li> <li>Voraussetzung 2</li> <li>...</li> </ul>	<b>Infrastruktur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Voraussetzung 1</li> <li>Voraussetzung 2</li> <li>...</li> </ul>	<b>...</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Voraussetzung 1</li> <li>Voraussetzung 2</li> <li>...</li> </ul>

**Bild 2.** Leitbilder für verschiedene Bereiche. Bild: Fraunhofer IPA, Reifegradmodell nach [23], Visualisierung [25]

Barney entwickelte „Vrio“-Analyse zurückgegriffen [9, 27]. Vrio steht dabei für Value, Rarity, Imitability und Organization. Mit der Vrio-Analyse werden demnach Fähigkeiten identifiziert, die wertvoll, selten, schwer imitierbar und von der Organisation umsetzbar sind. Erste Implikationen zu den Ist-Fähigkeiten liegen aus Phase 2 bereits vor. Wo erforderlich, können ergänzende Analysen durchgeführt werden, um die Ist-Fähigkeiten weiter zu detaillieren und Probleme und Chancen in den Prozessen und dem Produktportfolio zu identifizieren. Anschließend werden die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Fähigkeiten anhand einer Gap-Analyse und der Vrio-Analyse bestimmt, um so den Handlungsbedarf festlegen zu können. Beispielhafte Fähigkeiten in den fünf Bereichen können sein:

- Produktion: Dem Kunden jederzeit und auf Knopfdruck den aktuellen Produktionsstatus seines Auftrags mitteilen.
- Produkte: Neue Märkte für digitale Services erkennen und erschließen.
- Prozesse: Felddaten aus der Nutzung der Produkte durch die Kunden direkt in den Produktentwicklungsprozess einfließen lassen.
- IT: Eine durchgehende Entwicklungs-Toolchain zur Verfügung stellen.
- Organisation: Synergien zwischen unterschiedlichen Geschäftsfeldern umsetzen, aber gleichzeitig die notwendige Freiheit bei der Marktbearbeitung gewährleisten.

Phase 4 orientiert sich eng am Element „Strategieentwicklung“ von Sternad [28]. Alle in den Phasen 1 bis 3 gesammelten Erkenntnisse, Entscheidungen und Zielsetzungen werden zu bereichsindividuellen strategischen Optionen für die Digitalisierung zusammengefasst. Dabei sind strategische Optionen potenzielle

Entwicklungsrichtungen und damit Vorläufer der weiter unten beschriebenen strategischen Initiativen. Die strategischen Optionen sollten mit zuvor festgelegten Kriterien bewertet werden, um sie zunächst priorisieren und anschließend die Optionen mit dem höchsten Nutzen auswählen zu können. Sind die strategischen Optionen ausgewählt, folgt die Entwicklung einer übergeordneten Vision und die Formulierung strategischer Ziele. Die Vision ist eine Leitidee, die den angestrebten zukünftigen Zustand des Unternehmens darstellt und damit das Ziel der Transformation vermittelt. Sie beschreibt die grundsätzliche Motivation der Digitalisierung und die grundsätzlichen Ausrichtungen in den in Phase 1 definierten Bereichen. Die Ziele decken einen mittel- bis langfristigen Zeitraum von etwa 5 Jahren ab. Beide Elemente dienen einerseits dazu die Digitalisierungsstrategie in der Organisation kommunizieren und andererseits den Erfolg der Transformation messen zu können.

In Phase 5, der Strategieumsetzung, werden angelehnt an Sternad [28], strategische Initiativen mit den entsprechenden Projekten definiert und zu einem strategischen Programm zusammengefasst. Die strategischen Initiativen werden priorisiert und zeitlich sequenziert. Die Beschreibung der strategischen Initiativen umfasst die Potenziale, die notwendigen Investitionen, Umsetzungszeiträume sowie eine grobe Vorgehensweise. Aufgrund der hohen Veränderungsdynamik digitaler Technologien sollte zunächst ein strategisches Startprogramm mit einem Zeithorizont von etwa zwei bis drei Jahren definiert werden. Dieses Programm sollte in einem Reviewprozess regelmäßig überprüft werden. Langfristige Detailpläne können durch sprunghafte Verbesserungen in der Leistungsfähigkeit digitaler Lösungen, rapide sinkende Kosten oder dem Aufkommen neuer Technologien schnell überholt sein.

Mit der beschriebenen Methode kann innerhalb von vier bis sechs Monaten eine ganzheitliche Digitalisierungsstrategie entwickelt werden. Die Methode wurde in mehreren Projekten mit Konzernen, etwa aus der Haushaltstechnik oder der Automobilindustrie validiert. Dabei wurden folgende Erfolgsfaktoren festgestellt:

- Transparente und regelmäßige Kommunikation mit allen relevanten Entscheidungsträgern (wie Aufsichtsrat, Vorstand)
- Klare Aufgabenteilung innerhalb des Projektteams: Projektkommunikation (Stakeholder Management), Projektleitung (Leitung des Teams), Projektbearbeitung (inhaltliche Arbeit) und Projektsupport (Beschaffung aller notwendigen Daten und Informationen)
- Einbindung von Schlüsselkunden, um Anforderungen des Marktes an die Leistungserstellung beziehungsweise an die erwarteten digitalen Produkte und Services einfließen zu lassen
- Detaillierte Branchenanalyse relevanter Digitalisierungsaktivitäten, idealerweise schon vor Beginn des Projekts
- Potenzialabschätzungen basierend auf fundierten Benchmarks, um so die Akzeptanz der strategischen Initiativen zu erhöhen
- Aufbau einer geeigneten Organisationsstruktur zur Umsetzung der Digitalisierungsstrategie und Festlegung der Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Kompetenzen schon während der Entwicklung der Digitalisierungsstrategie

## 4 Fazit

Die Methode wurde in mehreren Projekten angewendet, validiert und fortlaufend weiterentwickelt. Ein großer Vorteil ist die hohe Geschwindigkeit, mit der die Strategie ohne relevante Vorarbeiten entwickelt werden kann. Die Umsetzung der Digitalisierungsstrategie erfolgt reibungslos, da die strategischen Initiativen klare Vorgaben für konkrete Umsetzungsprojekte machen und die relevanten Entscheidungsträger in die Entwicklung der Strategie eingebunden werden. Im Rahmen der Projekte ergab sich folgender Forschungsbedarf:

- Wie kann die IT so organisiert werden, dass einerseits durch eine Zentralisierung Synergien realisiert werden können, andererseits aber das notwendige Problemverständnis für die Prozesse und die Produktion erhalten bleibt?
- Wie sollte die Digitalisierung der Produktion organisiert werden? Sollte es ein Leitwerk oder mehrere Leitwerke für unterschiedliche Technologien geben?
- Wie können bewährte Best Practices auf andere Werke übertragen werden? Wie lassen sich Erfahrungen und Technologie-Know-how effizient austauschen?
- Wie können die Potenziale digitaler Services oder digitaler Technologien ex ante präziser bestimmt werden?
- Welche Transformationsoptionen vom Hardware- zum Serviceanbieter gibt es und wie sollte die Transformation gestaltet werden?

## Literatur

- [1] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Digitalisierung 2020. Stand: 2016. Internet: [www.vde.com/resource/blob/981146/df07b354f52736c1e0b1de891a6d1836/studie-digitalisierung-2020-data.pdf](http://www.vde.com/resource/blob/981146/df07b354f52736c1e0b1de891a6d1836/studie-digitalisierung-2020-data.pdf). Zugriff am 23.03.2021

- [2] Stolterman E.; Fors A. C.: Information Technology and the Good Life. In: Kaplan B.; Truex D. P.; Wastell D.; et al. (eds): Information Systems Research. IFIP International Federation for Information Processing. Boston, MA: Springer-Verlag 2004, pp. 687–692
- [3] Markovitch, S.; Willmott, P.: Accelerating the digitization of business processes. McKinsey&Company. Stand: 2014. Internet: [www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/accelerating-the-digitization-of-business-processes](http://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/accelerating-the-digitization-of-business-processes). Zugriff am 23.03.2021
- [4] Kane, G. C.; Palmer, D.; Phillips, A. N. et al.: Strategy, not technology, drives digital transformation. MIT Sloan Management Review and Deloitte University Press 14 (2015), pp. 1–25
- [5] etventure: Studie digitale Transformation. Die Zukunftsfähigkeit der deutschen Unternehmen. Stand: 2019. Internet: [service.etventure.de/digitale-transformation-2019-registrierung?\\_ga=2.48810534.1643180260.1608557595-2098552626.1608557595](http://service.etventure.de/digitale-transformation-2019-registrierung?_ga=2.48810534.1643180260.1608557595-2098552626.1608557595). Zugriff am 23.03.2021
- [6] IDG Business Media GmbH (Hrsg.): 4 Digital. Die vier Disziplinen der Digitalisierung. Studie zu den Hamburger IT-Strategietagen. Stand: 2018. Internet: [www.oliverwyman.de/content/dam/oliver-wyman/v2-de/publications/2018/Feb/4Digital-2018.pdf](http://www.oliverwyman.de/content/dam/oliver-wyman/v2-de/publications/2018/Feb/4Digital-2018.pdf). Zugriff am 23.03.2021
- [7] Volkwein M.; Böhm M.; Bauernhansl T.: Method and Application-Oriented Approach to Develop a Digitisation Strategy for Small and Medium-Sized Enterprises. In: Schmitt R.; Schuh G. (eds): Advances in Production Research. WGP 2018. Cham: Springer-Verlag 2019, pp. 776–785
- [8] Penrose, E.: The Theory of the Growth of the Firm. Oxford: OUP Oxford 1959
- [9] Barney, J.: Firm resources and sustained competitive advantage. Journal of Management 17 (1991) 1, pp. 99–120
- [10] Teece, D. J.; Pisano, G.; Shuen, A.: Dynamic capabilities and strategic management. Strategic Management Journal 18 (1997) 7, pp. 509–533
- [11] Dyer, J. H.; Singh, H.: The relational view: Cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage. Academy of management review 23 (1998) 4, pp. 660–679
- [12] Porter, M. E.: The five competitive forces that shape strategy. Harvard business review 86 (2008) 1, pp. 25–40
- [13] Brown, N.; Brown, I.: From Digital Business Strategy to Digital Transformation-How: A Systematic Literature Review. Proceedings of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists (2019), pp. 1–8
- [14] Sebastian, I. M.; Ross, J. W.; Beath, C.; et al.: How big old companies navigate digital transformation. MIS Quarterly Executive 16 (2017) 3, pp. 197–213
- [15] Matt, C.; Hess, T.; Benlian, A.: Digital transformation strategies. Business & Information Systems Engineering 57 (2015) 5, pp. 339–343
- [16] Lipsmeier, A.; Kühn, A.; Joppen, R.; et al.: Process for the development of a digital strategy. Procedia CIRP 88 (2020), pp. 173–178
- [17] Becker, W.; Schuhknecht, F.; Botzkowski, T.: Die Balanced Scorecard als Instrument zur Entwicklung und Implementierung von Digitalisierungsstrategien. In: Becker, W.; Eierle, B.; Fliaster, A.; et al. (Hrsg.): Geschäftsmodelle in der digitalen Welt. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2019, pp. 37–56
- [18] Statista: Bruttowertschöpfung zu Faktorkosten in Deutschland nach Unternehmensgröße im Jahr 2018. Stand: 2020. Internet: [de.statista.com/statistik/daten/studie/1087566/umfrage/bruttowertschoepfung-in-deutschland-nach-unternehmensgroesse/](http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1087566/umfrage/bruttowertschoepfung-in-deutschland-nach-unternehmensgroesse/). Zugriff am 23.03.2021
- [19] Liebrecht, C.; Kandler, M.; Lang, M.; et al.: Decision support for the implementation of Industry 4.0 methods: Toolbox, Assessment and Implementation Sequences for Industry 4.0. Journal of Manufacturing Systems 58, Part A (2021), pp. 412–430
- [20] Liebrecht, C.: Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz – Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie KIT, 2020
- [21] VDMA (Hrsg.): Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Stand: 2015. Internet: [www.vdmashop.de/refs/VDMA\\_Leitfaden\\_I40\\_neu.pdf](http://www.vdmashop.de/refs/VDMA_Leitfaden_I40_neu.pdf). Zugriff am 23.03.2021
- [22] Mittal, S.; Romero, D.; Wuest, T.: Towards a Smart Manufacturing Maturity Model for SMEs (SM3E). In: Moon, I.; Lee, G.; Park, J.; et al. (eds): Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0. APMS 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer-Verlag 2018, pp. 155–163
- [23] Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 Maturity Index: Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten. Stand: 2017. Internet: [www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech\\_STUDIE\\_Maturity\\_Index\\_WEB.pdf](http://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_Maturity_Index_WEB.pdf). Zugriff am 23.03.2021
- [24] Schöllhammer, O.; Volkwein, M.; Hespings, S.; et al.: Digitalisierung im Mittelstand – Entscheidungsgrundlagen und Handlungsempfehlungen. Stuttgart: Fraunhofer IPA 2017

- [25] Cuk, E.: Visionsbild der Matrixproduktion. Stand: 2021. Internet: [www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/matrixproduktion-im-fluss-am-standort-karlsruhe-der-siemens-ag.html](http://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/matrixproduktion-im-fluss-am-standort-karlsruhe-der-siemens-ag.html). Zugriff am 23.03.2021
- [26] Geschka, H.; Hammer, R.: Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. In: Hahn D., Taylor B. (Hrsg.): Strategische Unternehmensplanung / Strategische Unternehmensführung. Heidelberg: Physica 1990, S. 311–336
- [27] Mata, F. J.; Fuerst, W. L.; Barney, J. B.: Information technology and sustained competitive advantage: A resource-based analysis. MIS quarterly 19 (1995) 4, pp. 487–505
- [28] Sternad, D.: Strategieentwicklung kompakt. Eine praxisorientierte Einführung. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag 2015



Dr.-Ing. **Patrick Kübler**

*Bild: Autor*

**Malte Volkwein**, M.Sc.

Dipl.-Betriebswirt **Oliver Schöllhammer**

Prof. Dr.-Ing. **Thomas Bauernhansl**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
Tel. +49 711 / 970-1931  
[patrick.kuebler@ipa.fraunhofer.de](mailto:patrick.kuebler@ipa.fraunhofer.de)  
[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)





## Effiziente Gestaltung dynamischer und kollaborativer Wertschöpfungsprozesse

# Netzwerkunterstützung durch Digitale Zwillinge

B. Dinter, H. Wache, S. Ramm, E. Wittstock, F. Otto, A. Maasch

Bisherige Ansätze des Digitalen Zwillings beschränken sich auf die digitale Nachbildung einer Maschine insbesondere in deren Betriebsphase. Im Projekt „Co-TWIN“ wird dieses Konzept zum kollaborativen Digitalen Zwilling erweitert, der die Zusammenarbeit nicht nur lebenszyklus- sondern auch wertschöpfungspartnerübergreifend unterstützt. Dieser Beitrag zeigt die Grundidee des kollaborativen Digitalen Zwillings auf und präsentiert den aktuellen Stand der technischen Umsetzung der Co-TWIN-Plattform.

## STICHWÖRTER

Anlagenbau, Industrie 4.0, Informationsmanagement

## Efficient design of dynamic and collaborative value creation processes – Network support through Digital Twins

Current concepts of the digital twin are limited to a digital replication of a machine, especially in its operating phase. In the project „Co-TWIN“, this concept is extended to a collaborative digital twin that supports cooperation not only across the lifecycle but also across the value-added partners. The paper presents the basic idea of the collaborative digital twin and the current state of the technical implementation of the Co-TWIN platform.

## 1 Ausgangssituation und Motivation

Der Maschinen- und Anlagenbau unterzieht sich, wie andere Industriezweige, aktuell einem fundamentalen Wandel. Auslöser und Förderer dieses Wandels in der Industrie sind verschiedene Phänomene der digitalen Transformation, die weitläufig unter dem Begriff Industrie 4.0 zusammengefasst werden [1]. Zugehörige Technologien und Konzepte können zu Wettbewerbsvorteilen beitragen, indem sie die Zusammenarbeit in den Wertschöpfungsnetzwerken des Maschinen- und Anlagenbaus effizient gestalten. Denn dieser zeichnet sich in Deutschland durch eine Vielzahl dezentral organisierter, mittelständisch geprägter Produktions- und Zulieferernetzwerke aus.

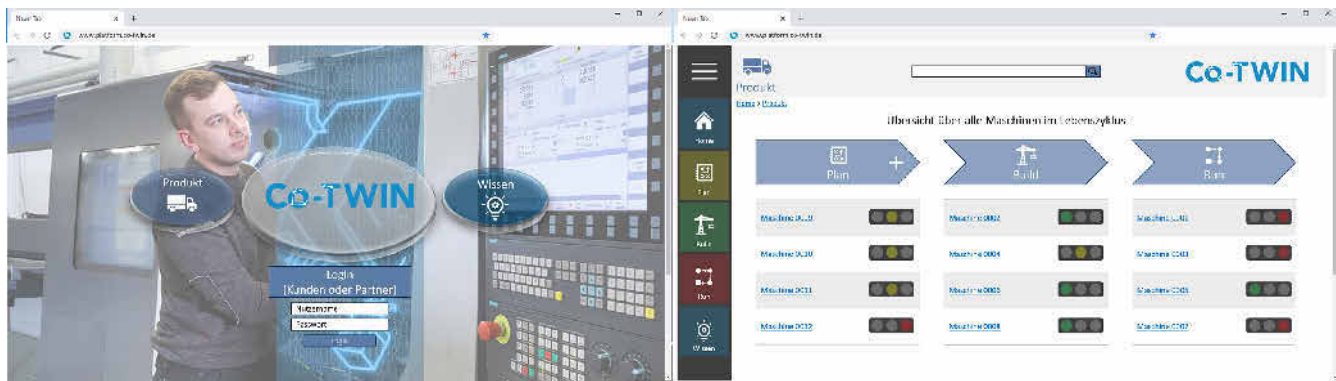
Ein Grundpfeiler für Industrie 4.0 ist das Konzept der Digitalen Zwillinge, welche eine Verbindung zwischen physischen Gegenständen in der Realwelt und virtuellen Gegenständen in der digitalen Welt herstellen [2]. Dabei bildet die virtuelle Seite stets den aktuellen Zustand des physischen Gegenstandes (Asset) ab. Ein Regelkreis gewährleistet, dass Daten in Echtzeit ausgetauscht und ausgewertet werden, wodurch eine Steuerung ermöglicht wird. Neben den Echtzeitdaten stehen ebenfalls historische Daten zum automatisierten Weiterentwickeln von virtuellen Modellen zur Verfügung. Der Digitale Zwilling kann Daten aus allen Lebenszyklusphasen des Assets enthalten. So können Dienstleis-

tungen wie Analysen, Vorhersagen oder Empfehlungen auf der Basis von erhobenen Daten und Analysemodellen angeboten werden. Das aktuelle Verständnis und der Entwicklungsstand Digitaler Zwillinge in der Industrie realisiert die umfangreichen Potenziale des Konzeptes jedoch noch nicht vollständig [3].

## 2 Der Kollaborative Digitale Zwilling

Neben diesem Einsatzzweck im Rahmen von Analysen und Optimierungen erlauben Digitale Zwillinge weitere Mehrwerte für Unternehmen, speziell im Bereich des Produktlebenszyklusmanagements (PLM). Die Grundidee des PLM, der Integration aller Informationen, die im Lebenszyklus eines Produktes entstehen, lassen sich mit einem Digitalen Zwilling umsetzen [3]. Statt wie bisher die Anwendungsbereiche der Produktentwicklung, Fertigungsplanung, Steuerung der Fertigungsanlagen und der Produktionsaufträge getrennt zu betrachten, kann mit Digitalen Zwillingen eine Integration der Systeme und Datenbasis inklusive Kontext- und Produktnutzungsdaten erfolgen.

Da der deutsche Maschinen- und Anlagenbau, wie bereits eingangs erwähnt, durch die dezentrale Organisation von vielen kleinen und mittleren Unternehmen, die sich auf einzelne Schritte in der Wertschöpfungskette spezialisiert haben, geprägt ist, wird eine unternehmensübergreifende Zusammenarbeit notwendig, um



**Bild 1.** Prototypische User Interfaces der Co-TWIN-Plattform. Bild: BAM GmbH; TU Chemnitz, PSPWI, René Apitzsch

ihren Kunden Mehrwerte liefern zu können. Hier unterstützt ein Digitaler Zwilling umfassend, indem er die unterschiedlichen Wertschöpfungspartner digital verbindet und die Daten eines Produktes unternehmensübergreifend in sich vereint. So wird durch die Abstraktion von spezifischen Unternehmensgegebenheiten wie IT-Schnittstellen und Datenformaten zu einem einheitlichen, abgestimmten Standard eine reibungslose Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen einzelnen Wertschöpfungspartnern gewährleistet. Eine partner- und lebenszyklusübergreifende Integration von Daten bietet speziell für kleine und mittlere Unternehmen mit begrenzten Ressourcen weitreichenden Nutzen [4].

### 3 Die Co-Twin-Plattform

Die Ziele des Forschungsprojektes Co-TWIN sind die Konzeption und prototypische Entwicklung einer Plattform, die auf die Aspekte der lebenszyklusphasenübergreifenden Integration von Daten speziell im Kontext von Wertschöpfungsketten eingeht und dadurch die integrierende Rolle von Digitalen Zwillingen von Einzelunternehmensebene auf interorganisationale Zusammenarbeit erweitert. Die Co-TWIN-Plattform ist ein IT-System, mit dem geplante und reale Maschinen in untereinander verknüpften, digitalen Sichten abgebildet werden können. Dadurch wird es unternehmensinternen und/oder -externen Stakeholdern ermöglicht, kollaborativ in verschiedenen Phasen des Maschinenlebenszyklus zusammenzuarbeiten [4]. **Bild 1** zeigt exemplarisch die im Projekt entwickelten grafischen Benutzeroberflächen der Plattform.

In Kooperation von zwei Universitäten mit vier Sondermaschinenbauunternehmen realisieren im Projekt zwei IT-Unternehmen konkrete betriebliche Anwendungsfälle. Im weiteren Verlauf gibt der Beitrag einen Einblick in die aktuelle Entwicklung der Co-TWIN-Plattform. Dabei wird zum einen auf die Konfiguration von Sondermaschinen mit dem Kunden unter Einsatz von moderner Virtual Reality (VR) Technologie eingegangen. Zum anderen wird eine Microservice-Architektur beschrieben, die durch ihre Modularität die Co-TWIN-Plattform als zwischen den Wertschöpfungspartnern verteiltes Informationssystem realisiert. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie die Verwaltungsschale als etablierter Kommunikationsstandard für Industrie 4.0 in der Co-TWIN-Plattform genutzt wird, um die Systemkomponenten zu einem zusammenhängenden Gesamtsystem zu vernetzen.

## 4 Technische Realisierung der Co-TWIN-Plattform

### 4.1 Virtual Reality Technologie für geführte Konfiguration von Sondermaschinen

Zur Unterstützung der Kundenkommunikation entwickelt die Technische Universität Chemnitz mit der Schmale Maschinenbau GmbH einen VR-basierten Konfigurator, der auf eine interaktive Konfiguration von Maschinen aus Standardkomponenten abzielt. Dabei können einzelne Funktionskomponenten an Arbeitswänden entsprechend dem Bearbeitungsprozess virtuell zusammengestellt und montiert werden (**Bild 2**).

Eine Anforderung an die Umsetzung ist die interaktive Nutzung wahlweise an einem Mobilgerät oder mithilfe eines Head-Mounted Display in VR. Um die Anwendung möglichst universell verwendbar zu machen, wird der Demonstrator auf Basis der WebXR-Schnittstelle umgesetzt. Dies erlaubt den Zugriff auf VR-Geräte und grafische Ressourcen aus kompatiblen Webbrowsern. Hierfür können sowohl autarke VR-Brillen als auch Laptops als Endgeräte verwendet werden. Die Darstellung von Modellen innerhalb solcher WebXR-Anwendungen erfolgt auf Basis des Dateiformates GLTF/GLB. Um die für die Bibliothek der möglichen (Standard-)Komponenten notwendigen Modelle zu erzeugen, wurde ein möglichst einfacher Workflow entwickelt, der diese auf Basis vorhandener CAD-Daten generiert. Die hierfür genutzten Standardexportschnittstellen des verwendeten CAD-Systems gewährleisten in Verbindung mit dem 3D-Modellierungswerkzeug Blender, dass der Workflow prinzipiell automatisierbar ist. Dabei stellt das Aussehen der Materialoberflächen bei den einzelnen Komponenten eine Herausforderung dar, da zum einen durch den Export beziehungsweise die Wandlung des Dateiformates Materialinformationen verlorengehen und zum anderen WebXR nicht alle Darstellungsmöglichkeiten unterstützt. Hierfür wurde eine Bibliothek von Standardmaterialien definiert, die per Skript in die Modelle integriert werden können. Gleichzeitig sorgt dieses Vorgehen für ein gleichartiges Aussehen der verwendeten Funktionsgruppen. Die Co-TWIN-Plattform stellt in diesem Zusammenhang die Bibliothek der möglichen Komponenten und deren 3D-Modelle zur Verfügung. Die entstehende Konfiguration wird als Bestandteil des Digitalen Zwillings einer möglichen Maschine erfasst, ein von der Plattform zur Verfügung gestellter Service soll die Erzeugung eines 3D-PDFs für die erleichterte Kommunikation ermöglichen.

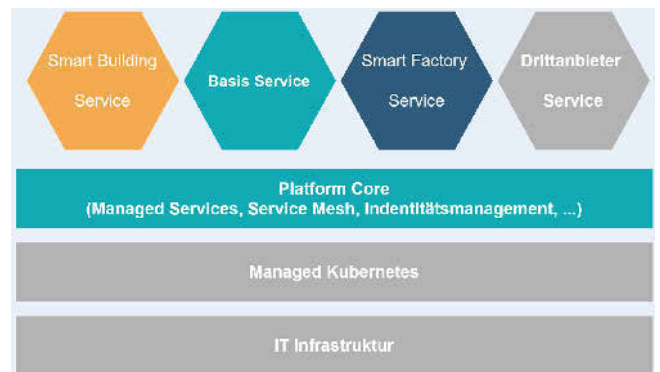


**Bild 2.** Drahtbiegeanlage und deren Konfiguration in Virtual Reality. Bild: Schmale Maschinenbau GmbH; TU Chemnitz, PSP

#### 4.2 Microservices als Architekturmuster der Co-TWIN-Plattform

Im Rahmen des Projektes wird, angeführt durch die N+P Informationssysteme GmbH, eine Plattform zur Bereitstellung von Services des Digitalen Zwillinges entlang des gesamten Lebenszyklus eines physischen Assets (eine Anlage, ein Ersatzteil oder sogar ein Gebäude) entwickelt. Die dabei entstehende Co-TWIN-Plattform, deren Grundstruktur in **Bild 3** dargestellt wird, ist keine klassische Client-/Server-Anwendung mit einer zentralen Datenbank, sondern eine Cloud-Anwendung mit Microservice-Architektur. Die jeweiligen Services werden dabei durch einzelne Microservices umgesetzt. Jeder Microservice besitzt eine eigene Datenhaltung mit nur den Daten, die er für seinen Prozess benötigt. Die Kapselung von In- und Output eines Microservices ist standardisiert, damit die Services sinnvoll miteinander interagieren können. Die Orchestrierung aller Services, also die Verwaltung des Zusammenspiels, übernimmt Kubernetes. Dabei werden die Microservices als Container (zum Beispiel Docker) deployed und entsprechend der Lastanforderung skaliert. Damit die Services sich auf ihren Prozess fokussieren können, gibt es zwischen ihnen und Kubernetes noch eine Zwischenschicht, welche zum Beispiel die Anbindung von Datenbanken realisiert sowie die Authentifizierung übernimmt. Mit dem Aufbau der Plattform wird die Integration von Drittanbieter-Services unterstützt, um zusätzlich die Kompetenzen von Partnern und Kunden in die Plattform zu integrieren.

Ziel des Digitalen Zwillinges innerhalb der Plattform ist jedoch das Zusammenbringen aller Informationen, die während des Lebenszyklus des Assets entstanden sind. Das heißt, es müssen die über die Microservices verteilten Daten wieder aggregiert werden. Zu diesem Zweck bietet sich die Verwendung der Verwaltungsschale an. Durch deren flexible Struktur (Details nachfolgend) können die Informationen für zum Beispiel Konstruktion, Fertigung und Service in einem „Dokument“ zusammengefasst, anderen Unternehmen (Kunden, Lieferanten) zur Verfügung gestellt und für Kollaborationen verwendet werden. Die Plattform liefert hierfür die Grundlage, entsprechende Informationen flexibel zu verarbeiten.



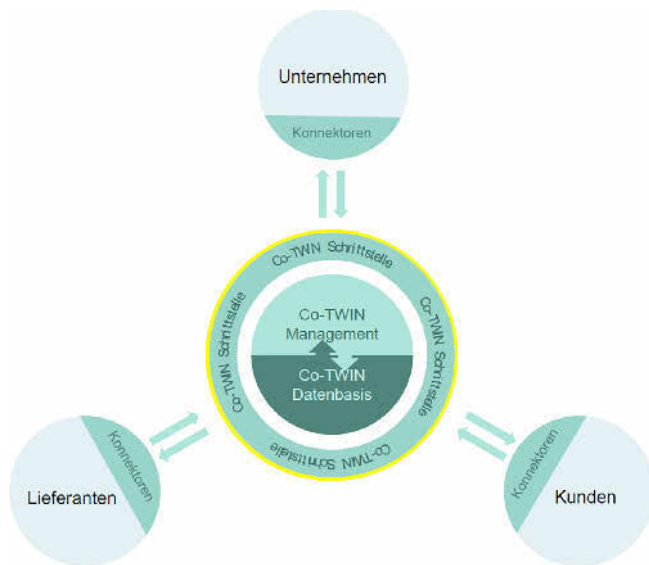
**Bild 3.** Grundstruktur der Co-TWIN-Plattform.  
Bild: N+P Informationssysteme GmbH

#### 4.3 Verwaltungsschale als Kommunikationsstandard der Industrie 4.0

Für den essentiellen Austausch von Informationen zwischen den Netzwerkpartnern und damit zur Unterstützung digitaler Wertschöpfungsnetzwerke benötigt die Co-TWIN-Plattform einen Service, der maßgeblich von der chemmedia AG entwickelt und umgesetzt wird. Die im Maschinen- und Anlagenbau verwendeten Digitalen Zwillinge beschreiben vielfältige Objekte, wie Bauteile, Baugruppen, Maschinen und Anlagen. Für eine maschinenlesbare Beschreibung von Digitalen Zwillingen wurde mit der bereits genannten Verwaltungsschale von der Plattform Industrie 4.0 ein Standard entwickelt, der als „Asset Administration Shell“ veröffentlicht wurde [5]. Er definiert eine gemeinsame Sprache für die Beschreibung eines Industrieguts (Asset). Die digitale Hülle (Shell) enthält dessen Identifikation, Eigenschaften in Form von wiederverwendbaren Submodellen, Zugriffsberechtigungen und Schnittstellen (Commands).

Dieser Service nutzt Asset Administration Shells als standardisierte Datenstruktur für den Austausch zwischen der Co-TWIN-Plattform und den Microservices / IT-Systemen der Anwendungspartner. Somit können Daten unterschiedlicher Struktur und Herkunft (Stammdaten, 3D-Modelle, Sensordaten, Meldungen) von Produkten, Bauteilen oder Anlagen in die Co-TWIN Datenbasis importiert werden. Mithilfe eines eindeutigen Schlüs-



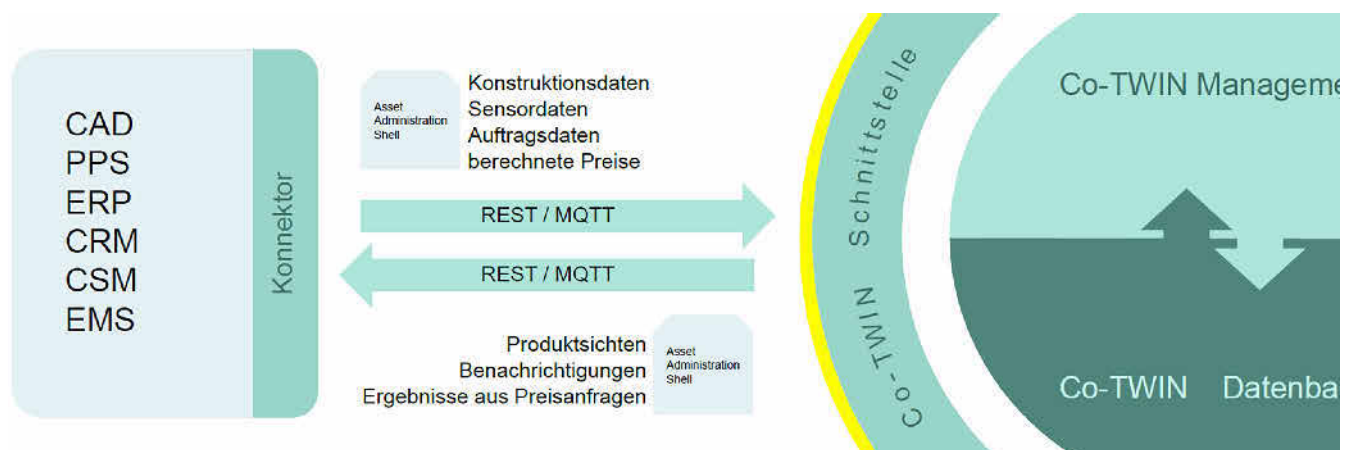


**Bild 4.** Schematische Darstellung der Co-TWIN-Schnittstelle und Konnektoren. Bild: chemmedia AG

sels werden Daten aus verschiedenen Quellsystemen identifiziert, miteinander verknüpft und zu einem ganzheitlichen Modell aggregiert. Die Anreicherung dieses Datenmodells kann dabei durch alle am Prozess beteiligten Akteure, zum Beispiel Zulieferer, eigene Fertigung oder Kunden erfolgen. Somit wird eine intensivere Kollaboration möglich, wobei jeder dieser Akteure stets seine eigene Sicht auf den gemeinsam genutzten Digitalen Zwilling wählt (**Bild 4**).

Um diese Möglichkeiten bereitstellen zu können, verfügt die Co-TWIN-Schnittstelle über eine Reihe von Methoden, um Assets in verschiedenen Granularitätsstufen in der Plattform zu verwalten. So können entweder gesamte Assets erstellt, bearbeitet und wieder entfernt oder auch nur auf deren Teilkomponenten zugegriffen werden, um sie zu aktualisieren oder mit anderen Assets zu verknüpfen. Erstellte Asset Shells können Betriebs- und Sensordaten senden und empfangen. Außerdem ist es möglich, Zugriffsrechte und Sichten für andere Akteure zu definieren.

Je nach Anwendungsfall und Zielvorgaben können „Rest“-Webservicemethoden oder „MQTT“-Subscriptions eingesetzt werden (**Bild 5**).



**Bild 5.** Kommunikation zwischen Softwaresystemen einer Organisation und kollaborativen Digitalen Zwillingen in der Co-TWIN-Plattform.

Bild: chemmedia AG

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird der aktuelle Entwicklungsstand der Co-TWIN-Plattform mit den drei Technologieschwerpunkten Virtual Reality, modulare Microservice-Architektur und Verwaltungsschale aufgezeigt. Die Zusammenführung der drei Schwerpunkte zeigt zum einen auf, wie moderne Anwendungsfälle auf der Co-TWIN-Plattform realisiert werden können und zum anderen, wie die Plattform hierfür strukturell aufgebaut werden muss und wie die Kommunikation der Bestandteile gelöst werden kann.

Der lebenszyklus- und wertschöpfungspartnerübergreifende Ansatz der Co-TWIN-Plattform, bei dem moderne digitale Technologien zum Einsatz kommen, hilft dabei, die Vision der Industrie 4.0 im deutschen Mittelstand zu realisieren und damit die Zukunftsfähigkeit des Industriezweigs des Maschinen- und Anlagenbaus am Produktionsstandort Deutschland nachhaltig zu stärken.

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt Co-TWIN wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen 02P17D140 bis 02P17D147) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

### Literatur

- [1] Lasi, H.; Fettke, P.; Feld, T.; Hoffmann, M.: Industry 4.0, Bus. Inf. Syst. Eng., 6 (2014) 4, pp. 239–242
- [2] Tao, F.; Zhang, M.; Nee, A. Y. C.: Digital Twin Driven Smart Manufacturing. London: Academic Press, 2019
- [3] Wache H.; Dinter, B.: The Digital Twin – Birth of an Integrated System in the Digital Age. In: 53rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2020
- [4] Ramm, S.; Wache, H.; Dinter, B. C.; Schmidt, L. S.: Der Kollaborative Digitale Zwilling Herzstück eines integrierten Gesamtkonzepts. ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115 (2020) April, pp. 94–96
- [5] Bedenbender, H. et al.: Verwaltungsschale in der Praxis. Berlin, 2019





Prof. Dr. **Barbara Dinter**

*Bild: TU Chemnitz*

**Hendrik Wache**, M. Sc.

**Saskia Ramm**, M. Sc.

Professur Wirtschaftsinformatik – Geschäftsprozess-  
und Informationsmanagement

Dipl.-Wirt.-Ing. **Eckhart Wittstock**

Professur Produktionssysteme und -prozesse

Technische Universität Chemnitz

09107 Chemnitz

Tel. +49 371 / 531-39228

[barbara.dinter@wirtschaft.tu-chemnitz.de](mailto:barbara.dinter@wirtschaft.tu-chemnitz.de)

[www.tu-chemnitz.de/wirtschaft/wi1/](http://www.tu-chemnitz.de/wirtschaft/wi1/)

Dipl.-Wirtsch.-Inf. (BA) **Frank Otto**

N+P Informationssysteme GmbH

An der Hohen Str. 1, 08393 Meerane

Tel. +49 3764 / 4000-622

[otto@nupis.de](mailto:otto@nupis.de)

[www.nupis.de](http://www.nupis.de)

Dipl.-Wirt.-Inf. **Alexander Maasch**

chemmedia AG

Parkstr., 35, 09120 Chemnitz

Tel. +49 371 / 49370-170

[maasch@chemmedia.de](mailto:maasch@chemmedia.de)

[www.chemmedia.de](http://www.chemmedia.de)

Entscheidungen bei gegenläufigen Kriterien besser treffen und kommunizieren

# Interaktive Visualisierung: Durchblick beim Produktdesign

L. Cibulski, H. Mitterhofer

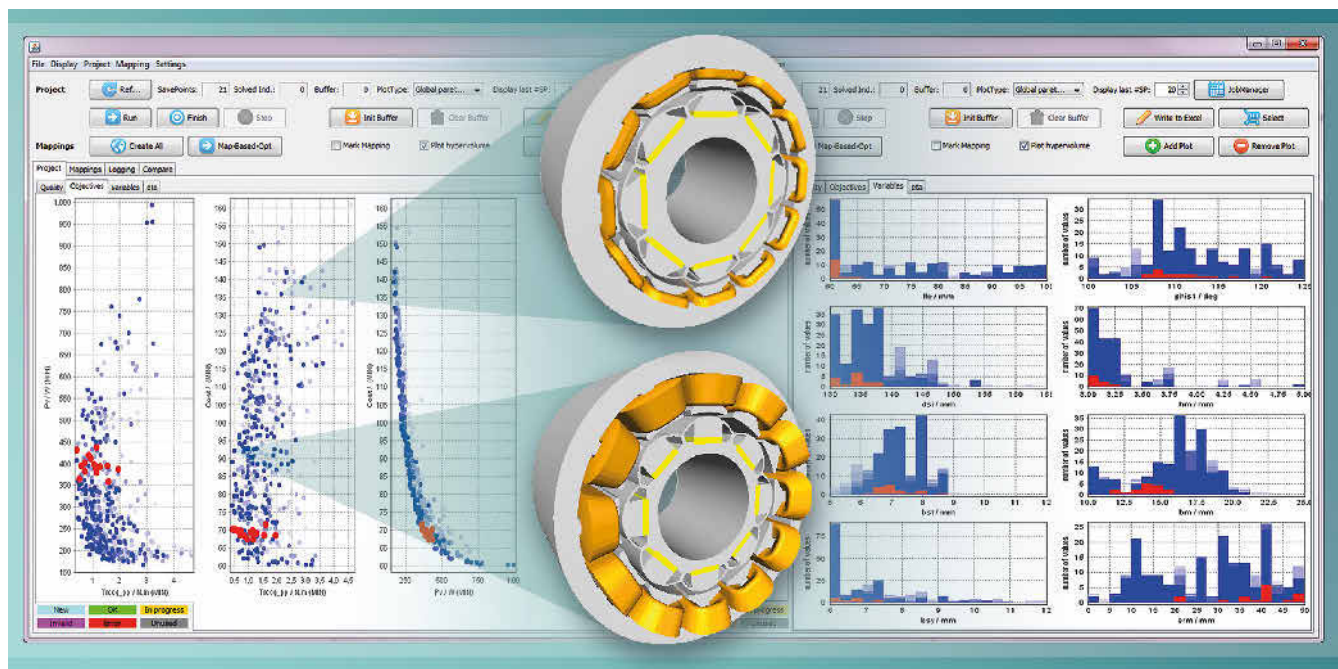
In der Produktentwicklung und Produktionsplanung treten häufig Konflikte zwischen verschiedenen Zielgrößen auf. So lassen sich manche Zielgrößen nicht optimieren, ohne bei anderen Kompromisse eingehen zu müssen. Das Visualisierungs-Tool „Paved“ (Pareto Front Visualization for Engineering Design) hilft, Unterschiede zwischen Alternativen besser zu verstehen und so tragfähigere Entscheidungen zu treffen.

## STICHWÖRTER

Produktentwicklung, Software, Forschung

**Decisions can be made and communicated more effectively in the case of conflicting criteria – Interactive visualization: A clear view of product design**

In product development and production planning, conflicts often arise between different objectives. Some targets cannot be optimized without compromising others. The visualization tool „Paved“ (Pareto Front Visualization for Engineering Design) helps to better understand differences between alternatives, thus allowing for more sustainable decisions.

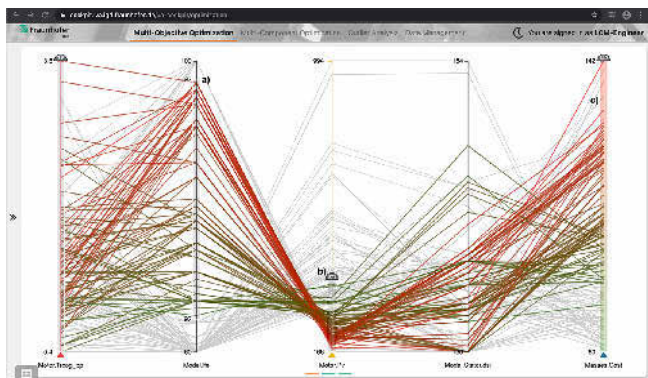


**Bild 1.** „SyMSpace“ ermöglicht die Darstellung von Pareto-optimalen Elektromotor-Designs in Form einer interaktiven Streudiagramm-Matrix.

Bild: Fraunhofer IGD/Linz Center of Mechatronics GmbH

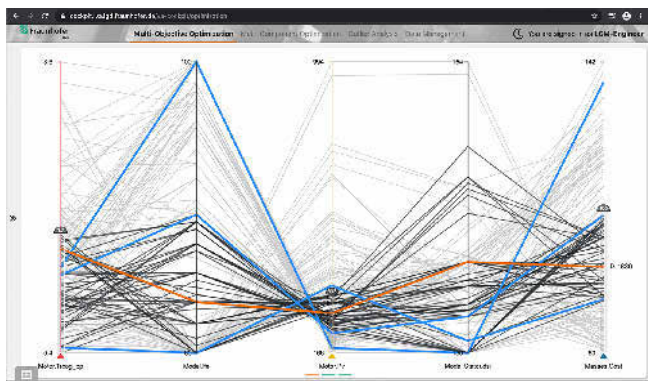
Das Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD hat in Zusammenarbeit mit dem Linz Center of Mechatronics (LCM) das Tool Paved (Pareto Front Visualization for Engineering Design) entwickelt. Es unterstützt Ingenieurinnen und Ingenieure durch eine effektive Visualisierung von Pareto-optimalen Alternativen bei der Entscheidungsfindung und

erleichtert die Abstimmung mit Kunden durch transparente sowie leicht verständliche Vergleiche. Bei der Entwicklung stand die Optimierung von Elektromotoren im Mittelpunkt. Die interaktive Visualisierung lässt sich aber auf andere multidimensionale Problemstellungen mit gegenläufigen Kriterien anpassen, wie sie auch in der Fabrik- und Produktionsplanung häufig vorkommen. Die



**Bild 2.** „Paved“ bietet eine kompakte Übersicht über alle Designoptionen mit den zugehörigen Eingangsparametern und Zielgrößen. Mit dem Bereichswerkzeug (a) lassen sich Eingangsparameter filtern, das Präferenzwerkzeug (b) dient zur Einschränkung von Zielgrößen. Es kann als Farbverlaufswerkzeug (c) farblich kodiert werden, um die Identifizierung von Kriterienkonflikten zu erleichtern.

Bild: Fraunhofer IGD/Linz Center of Mechatronics GmbH



**Bild 3.** Favorisierte Kompromisslösungen (blau) lassen sich für einen späteren detaillierten Vergleich zwischenspeichern und sind unabhängig von der Filterkombination permanent sichtbar. Die hier bevorzugte Kompromisslösung ist die markierte Designoption (orange).

Bild: Fraunhofer IGD/Linz Center of Mechatronics GmbH

Forschungsarbeit wurde durch das EU-Projekt „CloudiFacturing“ und das K2-Zentrum für Symbiotische Mechatronik gefördert.

## 1 Visualisierung macht Zusammenhänge sichtbar

Bei der Simulation von Elektromotoren gibt es sehr viele Stellschrauben, deren Auswirkungen auf Zielgrößen wie Effizienz, Leistung, Maximaltemperatur oder Kosten nicht ohne Weiteres intuitiv erfassbar sind. Zur Berechnung des Betriebsverhaltens eines Motors setzt man am LCM auf cloud-basierte Simulation und das Workflowmanagement- und Optimierungswerkzeug „SyMSpace“. Dieses errechnet automatisiert aus tausenden Konfigurationen variiertter Eingangsparameter die Menge der Pareto-optimalen Lösungen mit einigen zehn bis mehreren hundert Optionen. Deren visuelle Inspektion erfolgt in einer interaktiven Streudiagramm-Matrix, in der die Zielgrößen paarweise gegenübergestellt werden. Gleichzeitiges Hervorheben der ausgewählten Lösungen in allen Diagrammen der Zielgrößenmatrix sowie

in verknüpften Histogrammen, welche die zugehörigen Eingangsparameter zeigen, verdeutlicht dabei den Zusammenhang von Ursache und Wirkung (**Bild 1**). Dennoch beschränkt sich die Analyse in SyMSpace bisher auf diese zweidimensionalen Projektionen der Pareto-Front. Die Herausforderung, alle Streudiagramme gleichzeitig im Auge zu behalten, wächst dabei stark mit der Zahl der gewählten Optimierungskriterien.

Paved erlaubt es, Lösungen so zu visualisieren, dass Zusammenhänge zwischen mehreren Kriterien besser erkannt werden und als Informationsgrundlage für eine zielgerichtete Entscheidung dienen können. Ziel ist es, die einfachste Visualisierungslösung anzubieten, die für ein gegebenes Mehrkriterien-Optimierungsproblem gut funktioniert. Die Visualisierung ist so gestaltet, dass sie intuitiv und leicht zu erlernen ist, und sich nahtlos in den Arbeitsablauf der Ingenieurinnen und Ingenieure einfügt.

Wie in **Bild 2** dargestellt, bilden sogenannte Parallele Koordinaten die Grundlage der Visualisierung in Paved. Die Eingangsparameter und Zielgrößen werden auf vertikale Achsen abgebildet, die durch Polylinien verbunden sind. Jeder dieser Linienzüge entspricht einem Designkandidaten. Ein dreieckiger Indikator am oberen oder unteren Ende einer Zielgrößenachse markiert das jeweils angestrebte Optimum. Durch die Anwendung von Filtern und Selektionsmethoden lassen sich einzelne Polylinien, das heißt Designkandidaten, farblich hervorheben. Der Übergang von erwünschten zu weniger erwünschten Werten einer Zielgröße kann außerdem durch einen rot-grünen Farbverlauf visualisiert werden, wobei das grün eingefärbte Ende der Achse das angestrebte Optimum und das rote Ende die weniger erwünschten Werte kodiert. So können Zusammenhänge und Konflikte über mehrere Zielgrößen hinweg erkannt und abgewogen werden. Einzelne Varianten lassen sich für eine spätere eingehende Analyse als Favoriten markieren und farblich hervorheben (**Bild 3**). Dadurch bleiben diese Varianten in der Darstellung immer sichtbar, was einen direkten Vergleich in Bezug auf jeden ihrer Dimensionswerte ermöglicht.

## 2 Entscheidungen schneller treffen und besser kommunizieren

Eine automatisierte Optimierung ist für komplexe Systementwicklungen unumgänglich. Nur durch eine gute Visualisierung werden die generierten Daten wertvoll. Eine interaktive Visualisierung in Form paralleler Koordinaten in Paved unterstützt Entscheidungsträger effektiv dabei, den Lösungsraum zu explorieren, Trade-Offs zu erkennen und die bevorzugte Lösung auszuwählen. Die Auswirkung von Entscheidungen bezüglich einzelner Zielgrößen auf das Gesamtsystem wird direkt sichtbar, was zu besseren Kompromissen und zu mehr Transparenz führt. Die Vor- und Nachteile bestimmter Optionen lassen sich auf einen Blick erkennen, ohne vertiefte Fachkenntnisse zu erfordern. So lassen sich tragfähige Entscheidungen nicht nur schneller treffen, sondern auch besser gegenüber Kunden oder dem Management kommunizieren. Obwohl Paved für die Ingenieursarbeit entwickelt wurde, kann eine solche Visualisierung auch anderen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern in Wirtschaft, Gesellschaft und Politik helfen, Konsequenzen abzuwägen und bessere Entscheidungen zu treffen.

Interessierte haben die Möglichkeit das interaktive Visualisierungstool Paved mit einem Beispiel-Datensatz unter <https://paved.iva.igd.fraunhofer.de> selbst auszuprobieren. Wer ebenfalls vor der Herausforderung einer komplexen Entscheidungsfindung mit gegenläufigen Kriterien steht, wird gerne von den Autoren mit einer auf diesen Anwendungsfall zugeschnittenen Lösung unterstützt. Interessierte können das Fraunhofer IGD für ein erstes Beratungsgespräch kontaktieren.



**Lena Cibulski**, M. Sc.

*Bild: Fraunhofer IGD*

Fraunhofer-Institut für Graphische  
Datenverarbeitung IGD  
Information Visualization and Visual Analytics (IVA)  
Fraunhoferstr. 5, 64283 Darmstadt  
Tel. +49 6151 / 155-639  
[lena.cibulski@igd.fraunhofer.de](mailto:lena.cibulski@igd.fraunhofer.de)  
[www.igd.fraunhofer.de](http://www.igd.fraunhofer.de)



**Dr. Hubert Mitterhofer**

*Bild: Linz Center of Mechatronics GmbH*

Linz Center of Mechatronics GmbH  
Altenbergerstr. 69, 4040 Linz/A  
Tel. +43 732 / 2468-6085  
[hubert.mitterhofer@lcm.at](mailto:hubert.mitterhofer@lcm.at)  
[www.lcm.at](http://www.lcm.at)



## Intelligente Produktionssysteme durch semantische Interoperabilität aller Komponenten

# Linked Data für die selbst-optimierende Produktion

C. W. Mehling, K. Wenzel, A. Hellmich, S. Ihlenfeldt

Interoperabilität ist der Kern von Industrie 4.0. Mit Standards wie der Verwaltungsschale und OPC UA lassen sich bereits Komponenten semantisch beschreiben und einheitlich steuern. Für selbstoptimierende Produktionssysteme muss zusätzliches Wissen aus weiteren Datenquellen maschinenlesbar abgebildet und flexibel durch intelligente, autonome Systeme abgefragt werden. Die Linked Factory liefert dafür eine passende Technologie und schafft semantische Interoperabilität auf dem Shopfloor.

### STICHWÖRTER

Flexible Fertigungssysteme,  
Informationsmanagement, Industrie 4.0

### Intelligent production systems through semantic interoperability of all assets – Linked Data for self-optimizing manufacturing

Interoperability is a core idea of Industry 4.0. For this purpose, components can already be semantically described and uniformly controlled via standards such as the Asset Administration Shell and OPC UA. To enable self-optimizing production systems, more knowledge from further data sources must be attached in a machine-readable form, and queried flexibly by intelligent, autonomous systems. The Linked Factory provides a suitable technology for this and establishes semantic interoperability on the shopfloor.

## 1 Einleitung

Die Interoperabilität ist einer der Schlüsselkomponenten der Industrie 4.0 (I4.0) und soll den Weg zu agilen Wertschöpfungsnetzwerken ebnen, deren Teilnehmer unternehmens- und branchenübergreifend flexibel kooperieren. Hierfür werden in der Plattform I4.0 gemeinsame Standards und Referenzarchitekturen entwickelt, um neue, digitale Wertschöpfungsketten zu erschließen. [1]

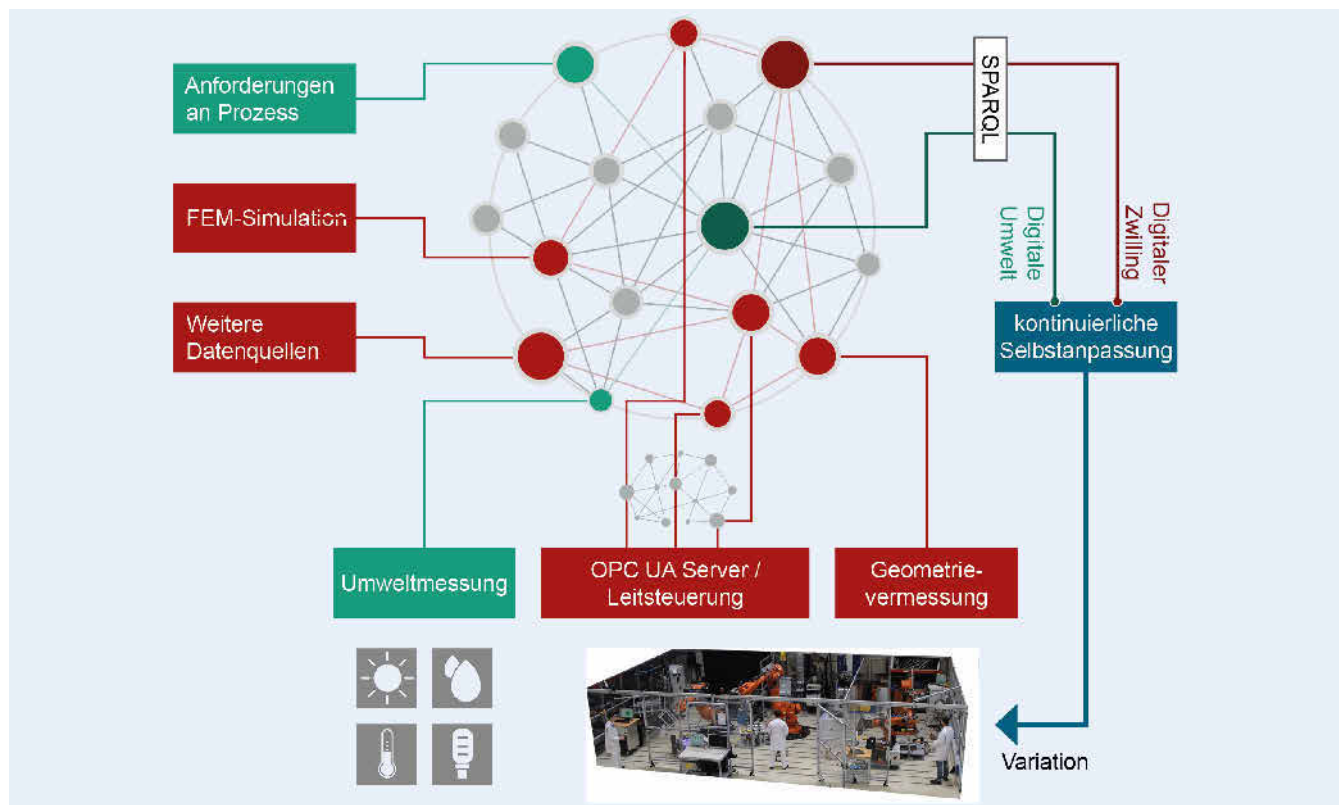
Enormes Wertschöpfungspotenzial liegt dabei in der unternehmensübergreifenden Vernetzung und Zusammenarbeit, im Besonderen durch dezentrale Systeme, welche mit eingebetteter Intelligenz autonom und flexibel auf neue Anforderungen reagieren können. Für eine solch tiefgreifende Kooperation müssen unterschiedlichste Maschinen- und Nutzerdaten verknüpft sowie geteilt werden. Für die Verwertung der Daten, zum Beispiel durch künstliche Intelligenz, müssen diese Daten zusammen mit ihrer Bedeutung als semantisch eindeutige Informationseinheiten abgelegt und flexibel zur Verfügung gestellt werden. Diese semantische Interoperabilität ist Voraussetzung für die Zusammenarbeit intelligenter Systeme und die erklärte Zielstellung der im Folgenden vorgestellten Linked Factory. Hierfür wird die zugrundeliegende Technologie beschrieben, die Anwendung als digitaler Zwilling am Beispiel Karosseriebau erläutert und abschließend die Integration von OPC-UA-Daten für semantische Abfragen demonstriert.

## 2 Semantische Interoperabilität

Intelligente Produktionssysteme benötigen Informationen über den aktuellen und historischen Zustand der Betriebsmittel, der Werkstücke und der Produktionsprozesse, um darauf aufbauend eigenständige Entscheidungen zu treffen. Semantische Interoperabilität kann diesen Prozess maßgeblich vereinfachen, indem ein standardisiertes Vokabular in Kombination mit einem entsprechenden Technologie-Stack verwandt wird. Datenquellen werden zu Informationsquellen indem alle Daten mit ihrer Bedeutung (Semantik) verknüpft und untereinander in Beziehung gesetzt werden. Diese semantische Beschreibung wird genutzt, um Datenquellen bedeutungsgesteuert abzufragen, Informationen variabel zu kombinieren und letztlich darauf aufbauend Wissen zu generieren. [2]

Als digitale Repräsentation von Produktionskomponenten wird von der Plattform I4.0 die Verwaltungsschale vorgeschlagen. Über standardisiertes Vokabular werden über den Lebenszyklus der Komponente Informationen angereichert, stetig mitgeführt und über verschiedene Datenformate und Schnittstellen bereitgestellt. [3, 4]

Für die Bereitstellung von Maschinen- und Prozessdaten etabliert sich zunehmend die OPC Unified Architecture (UA) als Interoperabilitätsstandard. OPC UA bietet plattformunabhängige Schnittstellen und Protokolle sowie eine kontinuierlich wachsende Sammlung von branchenspezifischen Standardvokabularen, den sogenannten Companion Specifications (CS). OPC UA eignet sich auch zur Umsetzung der Verwaltungsschale, wofür auch eine CS erarbeitet wird [5].



**Bild 1.** Integration heterogener Datenquellen zu einem digitalen Zwilling am Beispiel einer Fertigungszelle für Karosseriebauteile. Bild: Fraunhofer IWU

Ein OPC-UA-Informationsmodell spiegelt hierarchische und topologische Strukturen wider und dient zur Bereitstellung von aktuellen und historischen Daten einzelner Komponenten sowie zum Zugriff auf Methoden, die ihren Zustand verändern können. Ebenso unterstützt OPC UA dynamische Informationsmodelle mit veränderlichen Elementen, um beispielsweise Werkstücke als eigenständige Objekte mit ihren Attributen abzubilden [6]. In den OPC UA Standards wurden auch Programmierschnittstellen zum Filtern der Objekte in einem Server vorgesehen [7]. Diese unterstützen jedoch keine textuelle Abfragesprache und sind bisher auch nicht in Produkten umgesetzt worden [8]. Weiterhin sind Möglichkeiten für komplexe Abfrage- und Filteroperationen begrenzt, was zur Untersuchung von Kombinationsmöglichkeiten mit semantischen Technologien für die Wissensrepräsentation geführt hat [8, 9].

### 3 Industrial Knowledge Graph für die Produktion

Die genannten Standards nutzt und erweitert die vom Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen- und Umformtechnik IWU entwickelte Linked Factory um semantische Beschreibungen von Produktionssystemen mit effizienten Speichertechnologien für Maschinen- und Prozessdaten zu kombinieren und dadurch leistungsfähige Wissensgraphen für die Produktion, sogenannte Industrial Knowledge Graphs, zu realisieren. Diese ermöglichen es, Zustandsdaten der Betriebsmittel, der Werkstücke und der Produktionsprozesse direkt mit semantischen Strukturmodellen zu verknüpfen. [10, 11]

Die Repräsentation dieser Strukturmodelle kann auf Basis des sogenannten Resource Description Frameworks (RDF) parallel zum Aufbau eines OPC-UA-Informationsmodells erfolgen und eröffnet die Möglichkeit weiteren Datenquellen zu verknüpfen. Die so hinterlegten Modelle können mit SPARQL, der standardisierten Abfragesprache für RDF, traversiert und zum Zugriff auf die damit verknüpften Daten genutzt werden. Diese Art der Datenrepräsentation und -verknüpfung wird auch als Linked Data bezeichnet, speziell, wenn Daten auf verteilten Systemen miteinander verknüpft werden [12].

Die dezentrale Natur von RDF und SPARQL erlaubt den Aufbau flexibler Wissensgraphen, die Daten bei Bedarf auch erst zum Zeitpunkt der Abfrage aus mehreren Quellen zusammenführen. Die Abfrage bedient sich der SPARQL Technologie für Federated Queries [13], bildet interne Datenstrukturen der Quellen auf ein äquivalentes RDF-Format ab und gibt Abfrageparameter über synthetische RDF-Eigenschaften, sogenannte Magic Properties, an darunterliegende Datenbanken weiter.

In der Produktion sind häufig zeitabhängige Daten, wie zum Beispiel Kraft-, Leistungs- und Temperaturverläufe relevant, welche mit hoher Erzeugungsgeschwindigkeit entstehen aber ähnlich strukturiert sind. Aufgrund ihrer Natur sind gebräuchliche RDF-Datenbanken zur effizienten Speicherung dieser Daten nicht geeignet. Für das Linked-Factory-Konzept werden daher explizit unterschiedliche, auf die jeweiligen Daten optimierte, Datenbanksysteme verwendet werden und zu einem virtuellen RDF-Graphen kombiniert. Dadurch ist die Linked Factory in der Lage, Zeitreihendaten mit einer Geschwindigkeit von über 100 000 Datenpunkten pro Sekunde bei Verwendung gebräuchlicher Hardware aufzunehmen.

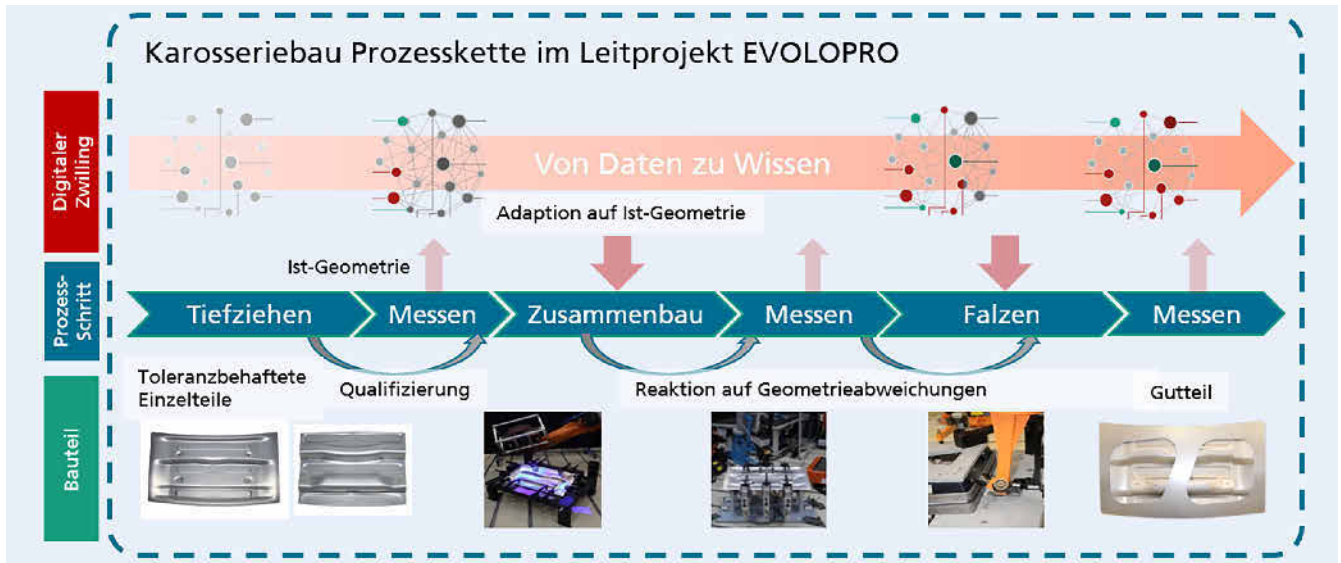


Bild 2. Prozesskette für den Zusammenbau einer Motorhaube. Bild: Fraunhofer IWU

## 4 Linked Factory als Digitaler Zwilling für kognitive Produktionssysteme

Die Technologie ist maßgeblicher Befähiger für kognitive Produktionssysteme, welche autonom auf neue Anforderungen reagieren und sich flexibel anpassen können. Im Fraunhofer Leitprojekt „Evolopro“ wird die beschriebene Selbstanpassung durch biologisch-inspirierte Ansätze erforscht und am Fraunhofer IWU für die Fertigung von Karosseriebauteilen mithilfe der Linked Factory praktisch umgesetzt. [14, 15]

### 4.1 Selbstanpassung komplexer Produktionsprozesse erforscht in EvoloPRO

Zielstellung des Handlungsstrangs am Fraunhofer IWU ist eine Produktionsanlage, welche den Ist-Zustand toleranzbehafteter Karosseriebauteile erfasst und in Folgeprozessschritten autonom, mit dem Ziel von Gutteilen reagiert. Aus jedem gefertigten Bauteil und den Variationen zwischen den einzelnen Bauteilen werden Informationen extrahiert, welche durch autonome, intelligente Systeme als Optimierungsvielfalt zur kontinuierlichen Verbesserung des Produkts und der Fertigungskette genutzt werden sollen.

Dabei werden, ähnlich wie in der Biologie Variationen, zum Beispiel in Form von Geometrieabweichungen und variante Materialparameter, nicht länger als Ausschusskriterium betrachtet, sondern dienen als Anstoßpunkte für potentiell besser angepasste Produkte.

Als Fertigungsstätte dient eine auf Fügetechnologien spezialisierte Roboterzelle (Bild 1 unten) am Fraunhofer IWU [16], für welche in der Linked Factory ein digitaler Zwilling (DZ) zur kontinuierlichen Informationsbereitstellung aufgebaut wird. Im Projekt wird als Beispielbauteil eine Motorhaube in fünf Prozessschritten gefertigt. Die Fertigung, schematisch dargestellt in Bild 2, umfasst die Schritte Tiefziehen, Fügen und Falzen sowie Vermessungen zwischen jedem Schritt.

### 4.2 Konzept des digitalen Zwillings

Für die Entwicklung von Strategien zur Anlaufzeitenverkürzung und kontinuierlichen Selbstanpassung in der Fertigungsanlage müssen Informationen aller beteiligten Produktionsmittel konsolidiert werden. Die Herausforderung besteht dabei in der Verknüpfung unterschiedlichster Datenressourcen aus dem Lebenszyklus des Produkts in einem gemeinsamen DZ, welcher als Wissensgraph die flexible Abfrage- und Filterung der Informationen unter verschiedenen Gesichtspunkten ermöglicht.

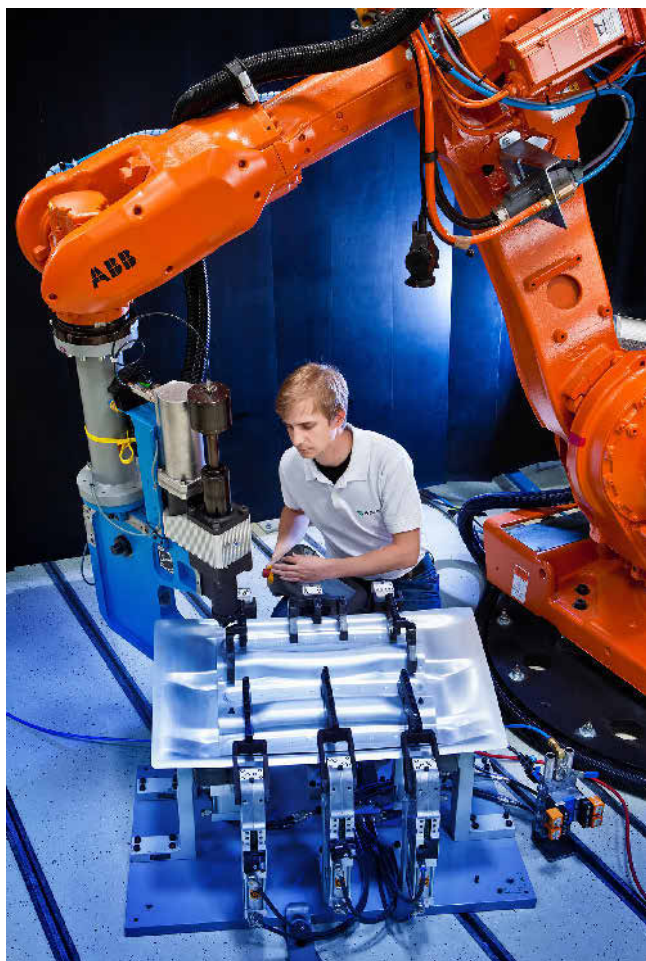
Kern des Graphen ist ein DZ der Fertigungsanlage, welcher Maschinen- und Prozessdaten verarbeiten kann und die Fertigungsanlage mit den darauf gefertigten Bauteilen semantisch verbindet. Jedes Bauteil besitzt einen Bauteilzwilling mit eindeutigem Identifikator, über den die Verknüpfung zur Maschine geschieht. Der Bauteilzwilling wird sukzessive in jedem Prozessschritt um die Fertigungsdaten der Maschine und der erfassten Momentangeometrie erweitert und bildet den Input für die automatisierte Adaption der Folgeprozesse auf den Ist-Zustand des Bauteils. Des Weiteren werden Materialdaten, verwendete Betriebsmittel sowie Simulations- und Metadaten im Graphen verknüpft. Eine zielgerichtete Kombination von Werkzeuginformationen mit Bauteil- und Maschinendaten ermöglicht beispielsweise die Ableitung von nicht direkt messbaren Größen, wie dem Verschleißzustand der einzelnen Betriebsmittel.

Zentrale Datenquelle des DZ, dargestellt in Rot in Bild 1, bildet der OPC UA Server der Leitsteuerung, welcher die Maschinen- und Prozessdaten bereitstellt. Um die vorhandene Anlagentechnik semantisch zu erfassen, wurde die gesamte Produktionsanlage in einem OPC UA Informationsmodell abgebildet. Das Informationsmodell wurde in eine RDF-Beschreibung überführt (siehe Abschnitt 5) und mit den dazugehörigen Datenquellen in der Linked Factory als DZ angelegt, um die Verknüpfung mit weiteren Datenressourcen zu ermöglichen.

### 4.3 Digitale Umwelt

Für die automatisierte, maschinengesteuerte Reaktion auf neue Anforderungen müssen alle Anforderungen in maschinenlesbarer





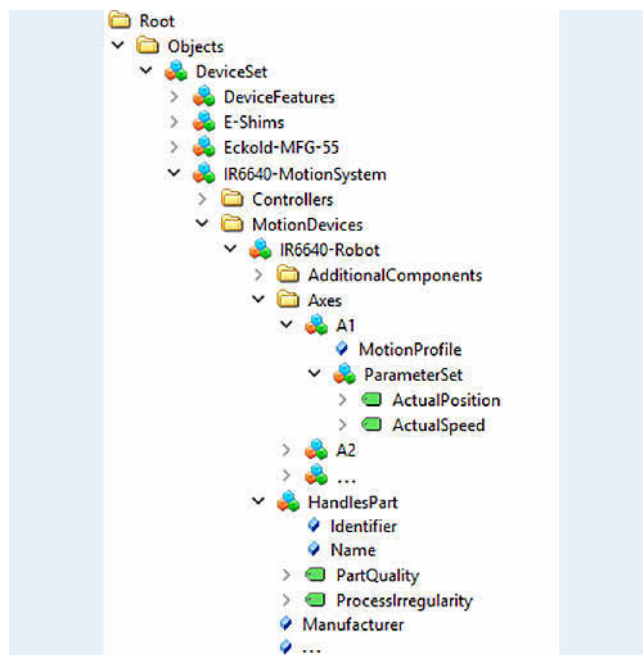
**Bild 3.** Robotergeführte Clinchversuche mit dem modellierten Roboter.  
Bild: Fraunhofer IWU

Form zur Auswertung durch den DZ vorliegen. Im Leitprojekt EvoloPRO werden Anforderungen an das Produkt sowie nicht veränderbare Randbedingungen an den Prozess als „digitale Umwelt“ bezeichnet und durch Ontologien maschinenlesbar beschrieben (grün in Bild 1). In der vorgestellten Fertigungszelle werden für die Randbedingungen Umwelteinflüsse aufgezeichnet und über eine Ontologie an den Wissensgraphen angebunden. Im nächsten Schritt werden Anforderungen an das Bauteil ebenso standardisiert erfasst und zusammen mit dem DZ als Input für die kontinuierliche Selbstanpassung der Roboterzelle verwendet.

## 5 Flexible Abfrage von OPC-UA-Modellen und -Daten durch die Linked Factory

Im Folgenden wird an Hand eines Industrieroboters aus der Fertigungszelle illustriert, wie durch die Linked Factory die semantische Abfrage- und Filterung von OPC-UA-Datenquellen ermöglicht wird.

Der 6-Achs-Roboter, eingesetzt zum Clinchen von Karosseriebauteilen (**Bild 3**), wurde zunächst in OPC UA entsprechend der Robotics CS [17] modelliert (**Bild 4**). Einzelne Achsen sind dabei als Komponenten des Roboters angelegt, wobei jede Achse



**Bild 4.** OPC-UA-Struktur des Roboters und des Clinchwerkzeugs (gekürzter Ausschnitt). Bild: Fraunhofer IWU

```
@prefix ua: <http://opcfoundation.org/UA/>
@prefix di: <http://opcfoundation.org/UA/DI/>
@prefix robotics: <http://opcfoundation.org/UA/Robotics/>

<robot> ua:HasComponent <Axes> .
<Axes> ua:HasComponent <A1>, <A2>, <A3>, <A4>, <A5>, <A6> .
<A1> ua:HasComponent <ParameterSet> .
<ParameterSet> ua:HasComponent <ActualSpeed> ;
    ua:HasComponent <ActualPosition> .

<Axes> ua:BrowseName robotics:Axes .
<A1> ua:HasTypeDefinition robotics:AxisType ;
    ua:BrowseName robotics:A1 .
```

**Bild 5.** RDF-Repräsentation eines Roboters im Turtle-Format (Ausschnitt).  
Bild: Fraunhofer IWU

die Variablen ActualPosition und ActualSpeed definiert, die jeweils ihre aktuelle Position und Geschwindigkeit repräsentieren.

Zur Überführung dieser Struktur von OPC UA in RDF ist eine direkte Abbildung möglich, wobei Knoten als RDF-Ressourcen und Referenzen als RDF-Eigenschaften repräsentiert werden (**Bild 5**).

Alternativ könnte auch der Ansatz von Schiekofner et al. [18] verwendet werden, wobei statt ua:HasComponent spezifische RDF-Eigenschaften entsprechend der BrowseNames verwendet werden. Ein auf die hier gezeigte Art in RDF repräsentiertes Modell kann mit SPARQL, der standardisierten Abfragesprache für RDF-Daten, traversiert werden. Beispielsweise würde die Abfrage in **Bild 6** in einem System alle Achsen vom Typ robotics:Axis-Type finden.

Für die performante Abfrage von zeitabhängigen Daten über den Graphen, wie zum Beispiel der Achspositionen und -geschwindigkeiten, wird eine kombinierte Anfrage erstellt (**Bild 7**). Die SPARQL-Anfrage nutzt die UA Datentypen um alle verfügbaren Datenquellen dieses Typs zu ermitteln (orange) und extrahiert anschließend die dazugehörigen Zeitreihen aus der dedizierten Datenbank (blau).



Ein weiteres Einsatzbeispiel ist in [11] gegeben, wo Zeitreihen aus Umformprozessen mit Anlagenstrukturen und Bauteilen verknüpft wurden.

## 6 Fazit

Mit der vorgestellten Architektur können heterogene Betriebsmittel im Industriefeld miteinander verknüpft werden und ihre Daten als Informationsquellen für die automatisierte Auswertung durch künstliche Intelligenz flexibel bereitstellen. Die Komponenten und ihre Datenquellen können dabei mit Industriestandards wie der Verwaltungsschale und OPC UA beschrieben und über SPARQL flexibel und performant abgefragt und gefiltert werden.

Ergänzend zu diesem selbstbeschreibenden digitalen Zwilling werden im Projekt EvoloPRO Ontologien entwickelt, um Anforderungen und Randbedingungen an den Prozess ebenfalls maschinenlesbar darzustellen. Mithilfe dieses „digitalen Lastenhefts“ und den flexiblen Abfragemöglichkeiten der Linked Factory können kognitive Produktionssysteme realisiert werden, welche kontinuierlich die Produktionsanlage anpassen und auf neue Anforderungen autonom reagieren.

Das Fraunhofer IWU entwickelt die Technologie stetig weiter und bietet diese interessierten Partnern zur gemeinsamen Realisierung von Anwendungsprojekten an.

## DANKSAGUNG

Gefördert durch das interne Fraunhofer-Programm der Leitprojekte.

## Literatur

- [1] Plattform Industrie 4.0: Leitbild 2030 für Industrie 4.0. Digitale Ökosysteme global gestalten, 2019
- [2] Nilsson, J.; Sandin, F.: Semantic Interoperability in Industry 4.0: Survey of Recent Developments and Outlook. 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Porto, 2018, pp. 127–132
- [3] Plattform Industrie 4.0: Details of the Asset Administration Shell – Part 1. 23.11.2020
- [4] Plattform Industrie 4.0: Details of the Asset Administration Shell – Part 2. 23.11.2020
- [5] OPC Foundation: OPC 30270. UA CS for AAS (Release Candidate). 30.10.2020
- [6] OPC Foundation: OPC 40501. UA CS for Machine Tools. 25.09.2020
- [7] OPC Foundation: OPC 10000–4. OPC Unified Architecture. Part 4: Services. 22.11.2017
- [8] Schiekofner, R.; Weyrich, M.: Querying OPC UA information models with SPARQL. 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Zaragoza, Spain, 2019, S. 208–215
- [9] Steindl, G.; Fruhwirth, T.; Kastner, W.: Ontology-Based OPC UA Data Access via Custom Property Functions. 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Zaragoza, Spain, 2019, S. 95–101
- [10] Drossel, W.-G.; Ihlenfeldt, S.; Langer, T. et al.: Cyber-Physische Systeme. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Digitalisierung. Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Berlin: Springer Vieweg 2018, S. 197–222

```
select ?axis {
  ?system ua:HasComponent+ ?axis .
  ?axis ua:HasTypeDefinition robotics:AxisType .
}
```

Bild 6. Abfrage der Achsen eines Roboters mit SPARQL. Bild: Fraunhofer IWU

```
select ?axis ?time ?speedValue ?posValue {
  ?system ua:HasComponent+ ?axis .
  ?axis ua:HasTypeDefinition robotics:AxisType ;
  ua:HasComponent+ ?c1; ua:HasComponent+ ?c2 .
  ?c1 ua:BrowseName robotics:ActualSpeed . bind (?c1 as ?speed)
  ?c2 ua:BrowseName robotics:ActualPosition . bind (?c2 as ?pos)

  service ts: {
    ?speed ua:Value [ ts:time ?time ; ts:value ?speedValue ] .
    ?pos ua:Value [ ts:time ?time ; ts:value ?posValue ] .
  }
}
```

Bild 7. Anfrage der Positions- und Geschwindigkeitsdaten der Achsen eines Roboters mit SPARQL. Bild: Fraunhofer IWU

- [11] Friedemann, M.; Wenzel, K.; Singer, A.: Linked Data Architecture for Assistance and Traceability in Smart Manufacturing. Matec Web of Conferences 304 (2019), S. 4006
- [12] Graube, M.; Pfeffer, J.; Ziegler, J. et al.: Linked Data as Integrating Technology for Industrial Data. International Journal of Distributed Systems and Technologies 3 (2012) 3, S. 40–52
- [13] W3C: SPARQL 1.1 Federated Query. 21.03.2013
- [14] Neugebauer, R.; Ihlenfeldt, S.; Schließmann, U. et al.: A new generation of production with cyber-physical systems – Enabling the biological transformation in manufacturing. Journal of Machine Engineering 19 (2019) 1, S. 5–15
- [15] Fraunhofer-Gesellschaft: EVOLOPRO. Evolutionäre Selbstanpassung komplexer Produktionsprozesse und Produkte. Internet: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-initiativen/fraunhofer-leitprojekte/evolopro.html>. Zugriff am 17.12.2020
- [16] Landgrebe, D.; Ackert, P.; Grützner, R. et al.: Improving the Ramp-Up Process of a Body-Construction Line by Numerical Supported Design of Clamping Devices and FEM Based Tolerance Prognosis. Material Forming ESAFORM 2015 651–653 (2015), pp. 932–937
- [17] OPC Foundation: OPC 40010. UA CS for Robotics. 13.05.2019
- [18] Schiekofner, R.; Grimm, S.; Brandt, M. M. et al.: A formal mapping between OPC UA and the Semantic Web. 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki, Finland, 2019, S. 33–40



Dipl.-Ing. Carl Willy Mehling  
Bild: Crispin-Iven Mokry

Dipl.-Inf. Ken Wenzel

Dr.-Ing. Arvid Hellmich

Prof. Steffen Ihlenfeldt

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen- und Umformtechnik IWU  
Nöthnitzer Str. 44, 01187 Dresden  
Tel. +49 351 / 4772-2633  
[carl.willy.mehling@iwu.fraunhofer.de](mailto:carl.willy.mehling@iwu.fraunhofer.de)  
[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)

## Motion Capture ermöglicht effiziente und realitätsnahe Laufwegplanung

# Virtuelle Montageplanung mit Motion Capture Systemen

M. Jonek, M. Manns, T. Tuli

In der Planung von teilautomatisierten Montageprozessen ist ein wichtiges Ziel, nicht wertschöpfende Tätigkeiten wie Laufbewegungen zu vermeiden. Studien haben gezeigt, dass die tatsächlichen Laufbewegungen in Montageprozessen von den geplanten Bewegungen abweichen. Dieser Beitrag stellt eine Methode vor, tatsächliche Laufbewegungen mit Motion Capture zu erfassen und in die Laufwegsplanung einzubeziehen, so dass sich Prozess- und Arbeitsplatzgestaltung bereits frühzeitig optimieren lassen.

### STICHWÖRTER

Digitalisierung, Fertigungsplanung, Mensch und Technik

### Virtual assembly planning with motion capture systems

In planning of semi-automated assembly processes, an important aspect is to avoid non-value-adding activities such as walking movements. Studies have shown that the actual walking movements in assembly processes differ from the planned movements. This paper presents a method of capturing actual walking movements with motion capture and integrating them into walking path planning so that process and workplace design can be optimized at an early stage.

## 1 Einleitung

Bei der Planung von teilautomatisierten Montageprozessen müssen Unternehmen strenge Zeit-, Kosten- und Qualitätsziele beachten, um wettbewerbsfähig produzieren zu können. Insbesondere bei Montageprozessen mit manuellen Arbeitsschritten gibt es ein hohes Optimierungspotenzial [1]. Planungsaufgaben werden in industriellen Unternehmen oftmals mit manuellen, auf Erfahrung basierenden Vorgehensweisen oder rechnerunterstützt mit Simulationsprogrammen durchgeführt. Die Laufwegsplanung erfolgt bei vielen kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) noch manuell mit Stift und Papier oder analog dazu in Zeichnungsumgebungen wie PowerPoint. Eine genauere Planung kann rechnerunterstützt mit Planungs- und Simulationsprogrammen durchgeführt werden. Die Planung und Simulation von menschlichen Bewegungen erweist sich aufgrund der humanmotorischen Komplexität als Herausforderung [2]. Zum einen fehlen häufig Simulationsexperten, zum anderen ist der manuelle Aufwand bei der Verhaltensmodellierung der Produktionsumgebung beträchtlich.

Die in der Planung festgelegten menschlichen Bewegungen weichen in der Realität ab [3]. Durch Motion-Capture-Systeme ist es möglich, die realen Bewegungen der Montaguearbeiter zu erfassen und in die Planung einfließen zu lassen. Auf diese Weise kann die Planung bereits in einer frühen Phase des Planungs- und Entwicklungsprozesses verbessert werden.

„Motion Capture“ bezeichnet die Aufzeichnung von menschlichen Bewegungen. Die Technik ist in der Entertainment- und Spielebranche weit verbreitet, um menschliche Bewegungen auf computergenerierte Charaktere zu übertragen. In der Forschung

findet Motion Capture im Bereich Sportwissenschaften und Arbeitswissenschaften eine steigende Anwendung [4].

Die Motion-Capture-Technologie bietet bei der Montageplanung Vorteile. Obwohl es zur Planung von teilautomatisierten Montageprozessen Planungs- und Simulationsprogramme gibt, die Motion Capture bei der Planung unterstützen, findet diese Methode bei KMU kaum Anwendung. Neben den hohen Anschaffungskosten des Systems sind der hohe Aufwand und die Unterschätzung des Potenzials mögliche Gründe.

Es gibt unterschiedliche Arten von Motion-Capture-Systemen. Eine Möglichkeit zur Bewegungsaufzeichnung sind markerbasierte Motion-Capture-Systeme. Mit einer Reihe von Videokameras werden Bilder von an einer Person angebrachten Markern gemacht und mit einer Software zu einem digitalen Bewegungsmodell verarbeitet. Ein Nachteil der Systeme ist, dass sie anfällig für Verdeckung zwischen Signalquelle und Empfänger sind [5].

Eine weitere Methode ist die Bewegungserfassung mithilfe von Inertialsensoren. Die Sensoren übertragen jeweils in Echtzeit und kabellos die linearen Beschleunigungswerte in drei Achsen und die Winkelgeschwindigkeiten um die drei Drehachsen. Mithilfe der Daten und den Körpermaßen kann eine Software das digitale Abbild des Körpers erstellen und die Orientierung und die Position errechnen [6].

In diesem Beitrag soll eine Methode vorgestellt werden, die es ermöglicht, mit geringem Aufwand die realen Bewegungen mit den geplanten Bewegungen zu vergleichen und diese in die Laufwegsplanung einzubeziehen. Des Weiteren soll anhand der Abweichung zwischen geplanter und realer Bewegung das Verbesserungspotenzial gezeigt werden, dass durch Motion Capture

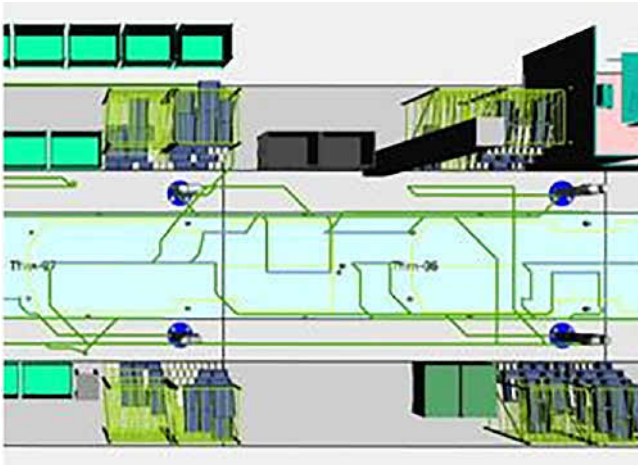


Bild 1. 2D-Laufwegsplanung in einer 3D-Planungsumgebung. Bild: [9]

in einer frühen Phase des Planungs- und Entwicklungsprojektes bei der Bewegungsplanung erreicht werden kann.

Die Methode kann bei Fertigungen mit einem großen Anteil an Laufbewegungen effektiv eingesetzt werden. Vorgestellt wird die Methode am Beispiel einer U-förmigen Fließfertigung. Für dieses Layout wird zunächst eine konventionelle manuelle Planung erstellt. In der Fertigung wird die Bewegung des Werkers zwischen fünf Stationen aufgenommen. Eine Analyse der Daten und ein Vergleich mit der Planung mit den realen Bewegungen soll Aufschluss über die Diskrepanz bei den Bewegungen geben. Das Ziel soll sein, die Motion-Capture-Daten in die Planungsumgebung einzubringen und das Potenzial dieser Methode aufzuzeigen.

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Planungssysteme

Die Laufwegsplanung erfolgt heutzutage überwiegend in graphischen Planungssystemen. Ein immer noch häufiger Ansatz bei der 2D-orientierten Laufwegsplanung ist die Stift-und-Papier-Methode. Der Planer nimmt dafür ein vorhandenes Layout der Fertigung oder erstellt das Layout auf Papier, in einer Visualisierungssoftware (unter anderem PowerPoint) oder CAD und zeichnet die Laufwege zwischen den Stationen manuell ein. Es entsteht ein zweidimensionales Spaghetti-Diagramm, bei dem

die Abstände in der Fertigung händisch gemessen werden können. Aus der Distanz kann die Zeit abgeleitet werden [7, 8].

Weiterhin gibt es für die Planung von manuellen oder teil-automatisierten Fertigungsprozessen 3D-basierte Planungs- und Simulationsprogramme (Bild 1). Dafür nutzt eine Software das digitale Abbild der Fertigungsumgebung, um darin menschliche Bewegungen zu visualisieren und möglichst realistisch zu simulieren. Auf diese Weise kann die Laufwegsplanung schon im Entwicklungsprozess verbessert und präzisiert werden [9].

Die Bewegungen werden aus einer im Programm integrierten Bibliothek entnommen. Einige der simulationsbasierten Programme bieten auch eine Motion-Capture-Integration. Damit ist es möglich, vorher aufgezeichnete Bewegungen in die Simulation zu integrieren [10].

### 2.2 Forschung

In der Produktionsforschung gibt es diverse Untersuchungen zu Laufwegbewegungen und Bewegungssimulationen. Bisherige Forschungsansätze haben die Verbesserung der Laufwegsplanung mit bisherigen Methoden (zum Beispiel A\*-Algorithmus) zum Ziel gehabt [11]. Ein weiterer wichtiger Punkt in der Forschung ist die Abweichung von geplanter und realer Laufbewegung. Die Forscher Agethen et al. haben 2016 eine solche Analyse der Laufbewegung bei einer sogenannten „Mixed-Model Assembly Line“ zur Variantenfließfertigung durchgeführt [12]. Die Untersuchung erfolgt am Beispiel eines Endmontagebands im Automobilbau. Dabei wurden die Trajektorien der geplanten und mit Motion Capture aufgenommenen Laufbewegung verglichen (Bild 2). Beim Vergleich ist aufgefallen, dass die Linien der geplanten und aufgenommenen Laufbewegung stark voneinander abweichen. In Zahlen ausgedrückt ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung von 0,99 m. Insgesamt benötigt der Werker für den Laufweg pro Zyklus 6,34 m anstatt der geplanten 7,2 m. Der kürzere Weg ergibt sich zum Teil aus einer Selbstoptimierung, die der Werker bei den Gehbewegungen an seinem Arbeitsplatz vornimmt [3, 12].

Weitere Forschungen beschäftigen sich mit der Simulation von menschlichen Bewegungen in der Produktion. Die Bewegungen, die mit Motion-Capture-Systemen erfasst werden, können in Simulationsumgebungen von Produktionssystemen integriert werden. Das Ziel ist die Verbesserung der Produktionsplanung [13].

Um diese Methode auch für KMU interessant zu machen, wurde der Fokus auf die Aufwandsreduktion gelegt. Mit der

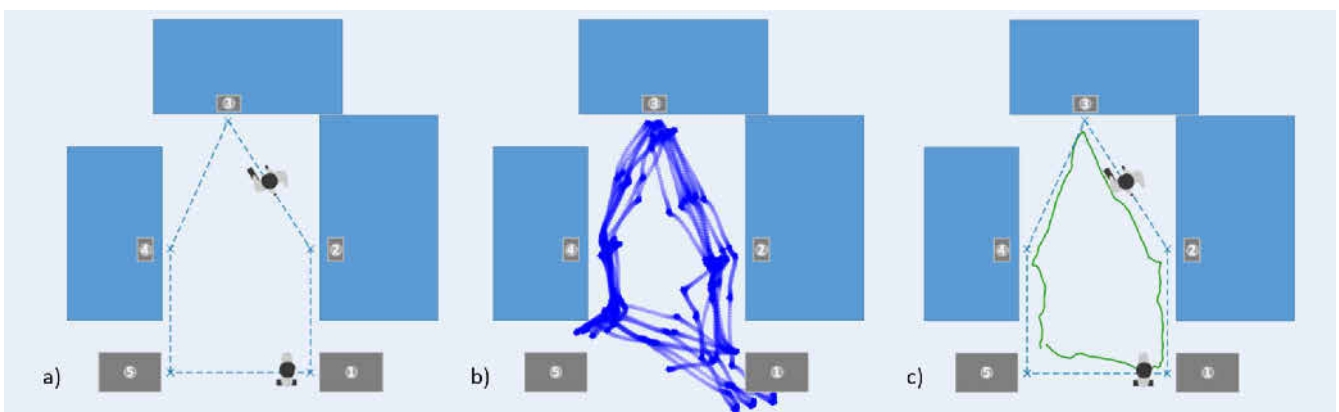


Bild 2. Geplanter (dicke Linien) und aufgenommener Laufweg (dünne Linien) in einer realen Produktionsumgebung. Bild: FAMS

vorgestellten Methode soll ermöglicht werden, dass die reale Laufbewegung bereits früh im Planungsprozess von Fertigungsaufgaben berücksichtigt wird, ohne aufwendige Simulations- und Planungssoftware zu verwenden.

### 3 Methode

Für die Methode, die in diesem Beitrag vorgestellt wird, wird zur Bewegungserfassung das inertialbasierte „Motion-Capture“-System von Xsens benutzt. Um die Bewegungen während der Montage zu erfassen, wird der Werker mit dem System ausgestattet.

Die Aufzeichnung der Daten erfolgt mit dem von Xsens bereitgestellten Programm „MVN Analyze“. Dafür müssen die Sensoren kabellos mit dem Computer verbunden werden und die Körpermaße des Werkers aufgenommen werden. Nach einer Kalibrierung kann die Aufzeichnung der Montagetätigkeit beginnen. Die Montageaufgabe wird mehrere Zyklen wiederholt. Für verlässliche Daten werden mindestens zehn Zyklen empfohlen.

Der Export der Bewegungsdaten aus dem Programm ermöglicht eine umfangreiche Auswertung aller aufgenommenen und errechneten Bewegungsparameter. Für die Laufwegsplanung werden lediglich die errechneten x- und y-Koordinaten des Körperschwerpunkts extrahiert. Die Auswertung der Daten erfolgt mithilfe eines Python-Skripts.

Aus den Bewegungslinien der einzelnen Zyklen wird eine durchschnittliche Bewegungslinie erstellt. Diese kann visualisiert und mit der manuellen Planung verglichen werden. Für die Analyse und den Vergleich werden die beiden visuellen Laufwege, die Laufweglängen und die Abweichung erstellt und verglichen. Die aufgezeichnete Laufweglinie ersetzt die geplante Laufweglinie und die als Basis für die Arbeitsplanung.

### 4 Testsetup

Die Methode zur Laufwegsplanung mit Unterstützung der Motion Capture Technik soll an einem praxisnahen Beispiel auf der Fertigung dargestellt und erläutert werden. Dafür wird eine Fließfertigung in U-Form aufgebaut. Bei einer Fließfertigung sind die einzelnen Verarbeitungsstationen nacheinander aufgestellt. Ein Artikel durchläuft die Stationen nacheinander, indem es von dem Werker von Station zu Station bewegt wird.

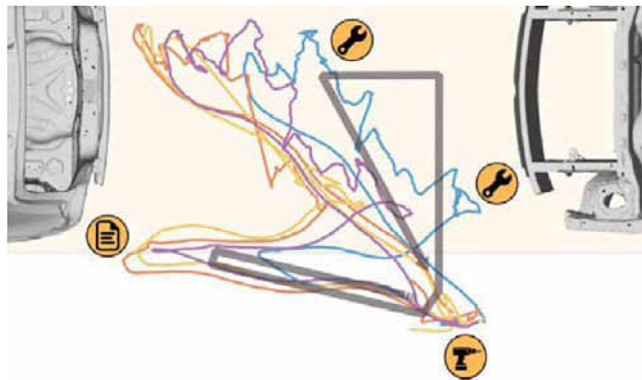
In unserem Setup betrachten wir fünf Stationen, die für die Laufwegsplanung wichtig sind. Die Stationen sind

- Entnahme aus Transportbox
- Verarbeitungsschritt 1
- Verarbeitungsschritt 2
- Prüfungsschritt
- Hineinlegen in Transportbox

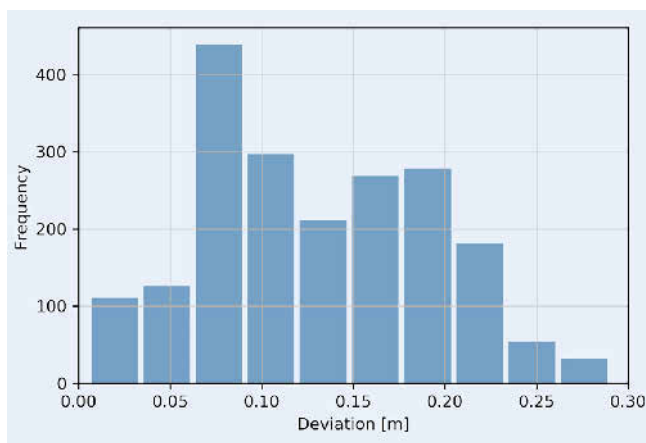
In dem Testversuch wurden acht zur Verfügung gestellte Teile verwendet, die eine Testperson von Station zu Station bewegt und in die angefertigten Vorrichtungen einsetzt. Um eine ausreichend hohe Anzahl an Daten zu bekommen, wird der Versuch mit acht Teilen zwei Mal durchlaufen, sodass 16 Bewegungszyklen zur Auswertung zur Verfügung stehen.

### 5 Auswertung in der Software

Bei der Aufzeichnung wurden insgesamt für einen gesamten Durchgang 21 144 Datenpunkte mit 60 Hz aufgenommen. Mit-



**Bild 3.** a) geplanter Pfad b) aufgenommener Pfad c) Vergleich zwischen geplantem Pfad (blau) und mittlerem aufgenommenen Pfad (grün).  
Bild: [12]



**Bild 4.** Histogramm über die Abweichungen. Bild: FAMS

hilfe der x- und y-Koordinaten kann der Laufweg visualisiert werden, indem die Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem aufgetragen und verbunden werden. Aus den 16 Zyklen wird eine durchschnittliche Linie für alle Zyklen gebildet. Die Linie ist in Bild 3 c) im Vergleich mit der geplanten Linie im Layout zu sehen.

Das Histogramm aus **Bild 4** zeigt mit einem Stichprobenumfang von 2000 Daten deutlich, dass die Abweichung meist im Bereich von 0,05 m bis 0,20 m liegt und in dem Bereich ungefähr gleichmäßig verteilt ist, jedoch handelt es sich um keine Normalverteilung. Zu sehen sind zwei Modalwerte zwischen 0,05 m und 0,10 m und bei etwa 0,20 m. Eine mögliche Erklärung ist, dass es keine Konvergenz zum mittleren Pfad gibt, sondern zwei beliebte Pfade das Ergebnis des vom Werker selbst-optimierten Laufpfades sind.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass die vermutete Abweichung zwischen geplantem und realer Bewegung des Werkers bestätigt und gemessen werden kann. Der aufgezeichnete Laufweg ist mit 7,59 m im Vergleich zu 8,25 m fast 10 % kürzer als geplant. Je nach Position ist die Abweichung von dem geplanten Pfad mehr oder weniger stark. Die maximale Abweichung beträgt 0,29 m. Im Durchschnitt über einen gesamten Zyklus beträgt die Abweichung 0,13 m von dem geplanten Laufweg.

Weiterhin zeigt eine qualitative Analyse der visuellen Auswertung, dass die Stationen nicht wie geplant angelaufen werden. Das liegt an der Selbstoptimierung der Bewegungen durch den Men-



schen. Bei Station 5 ist der Unterschied am auffälligsten. Die Transportbox wird nicht seitlich angelaufen und beladen, wie es die Planung vorsieht, sondern nur bis zur Ecke. Diese Abweichung bedeutet, dass die Anordnung der Transportbox im Layout verbessert werden kann. Mit einer Neuordnung kann dem Laufweg des Werkers entgegengekommen werden und insgesamt Laufweg so wie unproduktive Transportzeit gespart werden.

Die Methode zeigt eine Alternative zur Laufwegsimulation mit kostenintensiven kommerziellen Programmen auf. Mit überschaubarem Aufwand können reale Laufbewegungen in nachgestellten oder realen teilautomatisierten Fertigungsprozessen aufgenommen und in das Layout eingefügt werden. Die Kenntnis über reale Laufwege, die vom Menschen in der Praxis von selbst optimiert werden, kann in die Planung einfließen und Änderungen am Layout zur Folge haben. Damit ist die Methode zielführend, um mit geringem Aufwand früh in der Entwicklungsphase eines Fertigungsprozesses die menschlichen Laufwege beziehungsweise das Layout zu optimieren.

Der Xsens-Motion-Capture-Anzug beschränkt die Ergonomie aufgrund des geringen Tragekomforts und kann die realen Bewegungen verfälschen. In dem Versuch wurde lediglich das grundsätzliche Prinzip mit einem Produkt und einem Werker betrachtet. Die unterschiedlichen Werkerprofile wurden nicht berücksichtigt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführte Untersuchung zeigt den Unterschied zwischen geplanten und realen Laufwegen in teilautomatisierten Montageprozessen. Der aufgezeichnete Laufweg weicht erheblich ab. Durch den Einsatz der Motion-Capture-Technik kann der Planer die menschlichen Bewegungen präziser einbeziehen und in die Planung des Layouts einfließen lassen. Dadurch können bereits früh im Entwicklungsprozess Optimierungen am Layout vorgenommen werden. Es wird jedoch Fachwissen für die Planung mit Motion-Capture-Systemen benötigt, das in KMU in der Regel fehlt. Deshalb kann es für KMU sinnvoll sein, externe Dienstleister hinzuzuziehen. Neben einer effizienteren Planung können auch Lean Management-, KVP- und Ergonomieoptimierungsprozesse von Motion Capture profitieren.

Als nächster Schritt soll die vorgestellte Methode zur Montageplanung in das offene modulare und interaktive Simulationsframework integriert werden, das im Rahmen des Forschungsprojekts „Mosim“ entwickelt wird.

### DANKSAGUNG

Die Forschungsarbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des ITEA3 Projekts „Mosim“ (Projektnummer: 01IS18060A-H) und durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Projekts SMAPS (Projektnummer: 0200545) gefördert.

### Literatur

- [1] Hermeier, B.; Heupel, T.; Fichtner-Rosada, S. (Hrsg.): Arbeitswelten der Zukunft: Wie die Digitalisierung unsere Arbeitsplätze und Arbeitsweisen verändert. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2019
- [2] Jendrusch, R.; Leidholdt, W.; Bauer, S. et al.: Algorithmische Bewegungsgenerierung und semiautomatische Ergonomiebewertung für digitale Menschmodelle. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 65 (2011) 3, S. 259–271
- [3] Agethen, P.; Otto, M.; Gaisbauer, F. et al.: Presenting a Novel Motion Capture-based Approach for Walk Path Segmentation and Drift Analysis in Manual Assembly. Procedia CIRP 52 (2016), pp. 286–291
- [4] Raman, T. V.: Audio system for technical readings. Lecture Notes in Computer Science, No. 1410. Berlin: Springer 1998
- [5] Hasler, N.: Motion Capture. In: Computer Vision. Boston: Springer, 2014, pp. 495–498
- [6] Xsens: Xsens MTw Awinda. Stand: 16.12.2020. Internet: <https://www.xsens.com/products/mtw-awinda>
- [7] Michalos, G.; Karvouniari, A.; Dimitropoulos, N. et al.: Workplace analysis and design using virtual reality techniques. CIRP Annals 67 (2018) 1, pp. 141–144
- [8] Allen, T. T.: Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma. Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems. Guildford, Surrey: Springer 2010
- [9] Käfer, I.: IPO-Log erstellt intelligentes 3D-Spaghettidiagramm. Laufwegeanalysen mit aktuellen Daten – schnell und einfach auf Knopfdruck. 3D-Planungswerkzeug reagiert automatisch auf Prozessänderungen. Pressemitteilung Leonberg 16.01.14. <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/ipoplan-gmbh/IPO-Log-erstellt-intelligentes-3D-Spaghettidiagramm/boxid/651584>. Zuletzt abgerufen 21.04.2020
- [10] Spitzhörn, M.; Ullmann, S.; Harsch, A.-K. et al.: Berücksichtigung der Varianz der menschlichen Laufwege in der Planungssimulation von Produktionsprozessen der Mensch-Roboter-Kollaboration. In: Simulation in Produktion und Logistik. Auerbach Wissenschaftliche Scripten 2019, S. 173–182
- [11] Manns, M.; Martin, N. A. A.: Improving A\* Walk Trajectories with B-splines and Motion Capture for Manual Assembly Verification. Procedia CIRP 33 (2015), pp. 364–369
- [12] Agethen, P.; Otto, M.; Mengel, S. et al.: Using Marker-less Motion Capture Systems for Walk Path Analysis in Paced Assembly Flow Lines. Procedia CIRP 54 (2016), pp. 152–157
- [13] Letellier, P.: Modelling and Simulation. A vision of standards and state of play. ITEA Magazine (2020) 35, pp. 28–31



**Michael Jonek**, M. Sc.  
Bild: FAMS

Prof. Dr.-Ing. **Martin Manns**

**Tadele Belay Tuli**, M. Sc.

Universität Siegen  
Protech – Institut für Produktionstechnik  
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Montage (FAMS)  
Paul-Bonatz-Str. 9–11, 57076 Siegen  
Tel. +49 271 / 740-2267  
[michael.jonek@uni-siegen.de](mailto:michael.jonek@uni-siegen.de)  
[protech.mb.uni-siegen.de/fams](http://protech.mb.uni-siegen.de/fams)

## Austaktung in der variantenreichen Fließmontage

# Flexibilitätsoptimale Austaktung der Fließmontage

C. Hofmann, J. Schoof, A. Kuhnle, G. Lanza

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die ausgehend vom Mischgraphen unter Berücksichtigung der minimalen Auslastung der Stationen und benötigter Betriebsmittel eine variantenflexible Allokation der Arbeitsinhalte auf die Produktionsstationen ermittelt. Ziel ist eine Allokation auf die Stationen der Mehrproduktlinie zu wählen, bei der stationsweise eine minimale Auslastung erreicht wird und der Korridor, innerhalb dessen die Variantenanteile schwanken dürfen, maximal ist.

### STICHWÖRTER

Automobilindustrie, Fertigungsplanung, PPS (Produktionsplanung/-steuerung)

### Flexibility-optimized balancing of flow assembly

The content of this paper is a method which, based on the mixed precedence graph, determines a variant-flexible allocation of work steps to production stations, taking into account the minimum utilization of the stations and required resources. The goal is to select an allocation of work content to the stations of the multi-product line, where a minimum utilization is achieved station by station and the corridor within which the variant shares may fluctuate is maximized.

## 1 Einleitung

Durch die Produktindividualisierung steigen die Varianten in der Produktion. Gleichzeitig sind die Stückzahlen pro Variante schwer prognostizierbar und schwankend. Flexible und wandlungsfähige Mehrproduktlinien sollen durch die Bündelung mehrerer Produktvarianten Schwankungen ausgleichen. Insbesondere in der Endmontage erschwert dies die Austaktung. Eine Verschiebung der Variantenanteile kann dazu führen, dass die Taktzeit einzelner Stationen überschritten wird. Ziel der Austaktung ist die Allokation von Arbeitsinhalten auf die Stationen der Mehrproduktlinie, sodass eine minimale Auslastung jeder Station erreicht wird und der Korridor der zulässigen Schwankungen der Varianten ohne Taktzeitüberschreitung maximiert wird. Dieser Beitrag stellt eine Methode vor, die ausgehend vom Mischgraphen unter Berücksichtigung der Auslastungsanforderungen und der Betriebsmittel eine variantenflexible Allokation der Arbeitsinhalte ermittelt. Bei dieser flexibilitätsmaximierenden Austaktung kann eine hohe Schwankung der Anteile des Produktionsprogramms ohne Taktzeitüberschreitung aufgenommen werden (Flexibilität) ohne dass eine Anpassung des Produktionssystems (Wandlungsfähigkeit) notwendig wäre.

## 2 Stand der Forschung

Zunächst werden die Begriffe „Flexibilität“ und „Wandlungsfähigkeit“ definiert, anschließend wird der Stand der Technik für flexible Ansätze zur Austaktung und Ansätze zur robusten Austaktung vorgestellt.

### 2.1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Flexibilität beschreibt die Fähigkeit, sich an Veränderungen anzupassen [1]. In der Produktion können mehrere Flexibilitätsarten unterschieden werden [1–3]. Relevant für die Montage sind die Flexibilitätsarten: Routen-, Maschinen-, Variantenmix- und Stückzahlflexibilität. Die Maschinenflexibilität bezieht sich auf die Anzahl der Arbeitsgänge, die ausgeführt werden können [1]. Als Routenflexibilität wird die Fähigkeit bezeichnet, verschiedene Ausführungsreihenfolgen zu ermöglichen [1]. Die Stückzahlflexibilität bezieht sich auf das Produktionsvolumen [3]. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Variantenmixflexibilität. Sie erlaubt es, ohne Änderungen verschiedene Variantenmixverhältnisse zu fertigen [3, 4]. Flexibilitätskorridore bezeichnen den Bereich, innerhalb dessen Veränderungen ohne einen Umbau des Systems aufgenommen werden können [5]. Ist die Veränderung jedoch zu groß, muss ein Wandel des Systems erfolgen [6]. Der Bereich, in dem eine Veränderung des Systems möglich ist, wird als Wandlungskorridor bezeichnet [5].

### 2.2 Ansätze der Austaktung

Änderungen der Verhältnisse der Produkte im Produktionsprogramm können zur Überlastung einzelner Stationen führen, wenn die Austaktung auf Basis des Mischgraphen erfolgt ist. Das Kriterium der Variantenmixflexibilität adressiert diese Herausforderung. Eine hohe Variantenmixflexibilität wird auf unterschiedliche Weise erreicht. Während [7] und [8] eine möglichst ausgeglichene Auslastung der Bearbeitungszeiten anstreben, stellt [9]



Bild 1. Vorgehensmodell Bild: wbk

einen Aufschlagsfaktor auf die Bearbeitungszeit vor. [10] führt hingegen eine Kennzahl zur Messung der Korrelation der Arbeitsgänge ein, um die Arbeitsgänge zu verschieben, sodass die Variantenmixflexibilität erhöht wird. Dagegen berücksichtigt [11] die Variantenmixflexibilität bereits bei der initialen Austaktung der Linie, durch eine Trennung von variantenabhängigen und variantenunabhängigen Arbeitsgängen. [12] nehmen eine Modularisierung der Montageprozesse vor, um eine flexible Austaktung zu erreichen, während *Fisel* die Varianz der Bearbeitungszeiten der Arbeitsgänge an einer Station minimiert. Daneben gibt es zahlreiche robuste Optimierungsansätze, die unsichere und variierende Bearbeitungszeiten und Nachfragemengen berücksichtigen und so zu einer Erhöhung der Flexibilität beitragen. Oft wird die Unsicherheit der Eingangsdaten mithilfe von Szenarien modelliert, zum Beispiel [14].

Fast alle Ansätze nutzen ein mathematisches Optimierungsmodell, wobei sich die Zielfunktionen stark unterscheiden. Häufig werden multi-kriterielle Zielfunktionen eingesetzt, wobei meist eine möglichst gleichmäßige Auslastung der Stationen oder eine Minimierung der Leerzeiten vorgesehen wird (vgl. [7, 8, 15]). *Fisel* minimiert dagegen die Varianz der Bearbeitungszeiten je Station, um die Flexibilität zu maximieren [13]. Häufig wird die Flexibilität nicht direkt über die Zielfunktion optimiert. Stattdessen greifen viele der robusten Optimierungsansätze auf die klassischen Zielfunktionen des Simple Assembly Line Balancing Problems (SALBP) zurück, wobei die Taktzeit besonders oft minimiert wird, zum Beispiel [16].

Nur wenige Autoren greifen auf exakte Verfahren zurück, da diese nur für kleine Probleme anwendbar sind. Zu diesen Autoren zählen [16–18]. Deshalb verwenden [16] und [17] zusätzlich eine Heuristik für große Probleminstanzen. Einige Probleme werden mit Metaheuristiken gelöst, zu denen die von [8] und [13], [15], verwendeten genetischen Algorithmen zählen. Weitere eingesetzte Metaheuristiken sind der von [19] verwendete Ameisenalgorithmus sowie die von [20] eingesetzte Partikelschwarmoptimierung.

Die Mehrheit der Ansätze eignet sich nur für eine Neuplanung der Montagelinie. Es wurden vier Ansätze identifiziert, die sich sowohl für eine flexible Neu- als auch eine flexible Umplanung einer Linie eignen. Dazu gehören die Ansätze von [11, 12, 21] und [13].

In diesem Beitrag soll der Ansatz von *Fisel* [13] angewendet werden, der bis auf die exakte Optimierung alle Anforderungen an eine mathematische Optimierung der Variantenmixflexibilität erfüllt. Dabei soll anstelle des genetischen Algorithmus eine alternative, einfachere Vorgehensweise zur Lösung des Problems entwickelt werden.

### 3 Methode zur Ermittlung der Austaktung

Ausgangspunkt bildet die Ermittlung des Mischgraphen für die betrachteten Varianten. Darauf aufbauend wird die minimale Stationszahl mithilfe eines Optimierungsproblems ermittelt. Hierfür werden die maximale Stationszahl und eine zu erreichende Taktzeit vorgegeben. Im Rahmen des dritten Schritts erfolgt die Maximierung der Variantenflexibilität. Hierzu werden aus der Menge der zulässigen Lösung möglichst unterschiedliche Lösungen gewählt, um den Lösungsraum breit abzudecken. Für diese Stichprobe wird die Flexibilitätskennzahl berechnet. Ergebnis des Verfahrens ist die zulässige Austaktungsvariante mit der höchsten Flexibilitätskennzahl. Das gesamte Vorgehen wird in Bild 1 zusammengefasst.

#### 3.1 Bildung der Montagevorranggraphen

Der erste Schritt besteht in der Erstellung der Montagevorranggraphen. Da es sich um eine Variantenfließmontagelinie handelt, wird die Austaktung der Linie anhand der Durchschnittsvariante vorgenommen. Dadurch werden große Leerzeiten, wie sie bei der Austaktung der Maximalvariante entstehen, vermieden.

#### 3.2 Minimierung der Stationszahl

Um zu prüfen, wie viele Stationen mindestens für eine zulässige Austaktung bei gegebener Taktzeit benötigt werden, wird zunächst ein dem Mixed-model Assembly Line Balancing Problem-1 (MALBP-1) ähnliches Problem gelöst. Der Unterschied zwischen dem vorliegenden Problem und MALBP-1 besteht in der zusätzlichen Restriktion zur Begrenzung der Anzahl an Betriebsmitteln je Station. Bei dem betrachteten Problem handelt es sich um ein NP-schweres, ganzzahliges und lineares Optimierungsproblem. Die Zielfunktion besteht in der Minimierung der Anzahl an Stationen für die Mischvariante unter Berücksichtigung der Taktzeit-, Vorrang-, Betriebsmittel- und Allokationsrestriktionen.

#### 3.3 Maximierung der Variantenflexibilität

Zur Maximierung der Variantenflexibilität wird eine Menge zulässiger Lösungen generiert. Ziel hierbei ist es, den Lösungsraum abzudecken. Daher werden als zusätzliche Nebenbedingung eine Mindest- und eine Maximalauslastung pro Station eingeführt. Zur Generierung der Lösungsmenge werden sowohl die geforderte Mindest- und Maximalauslastung, als auch die maximale Stationszahl variiert. Der verwendete Algorithmus zum

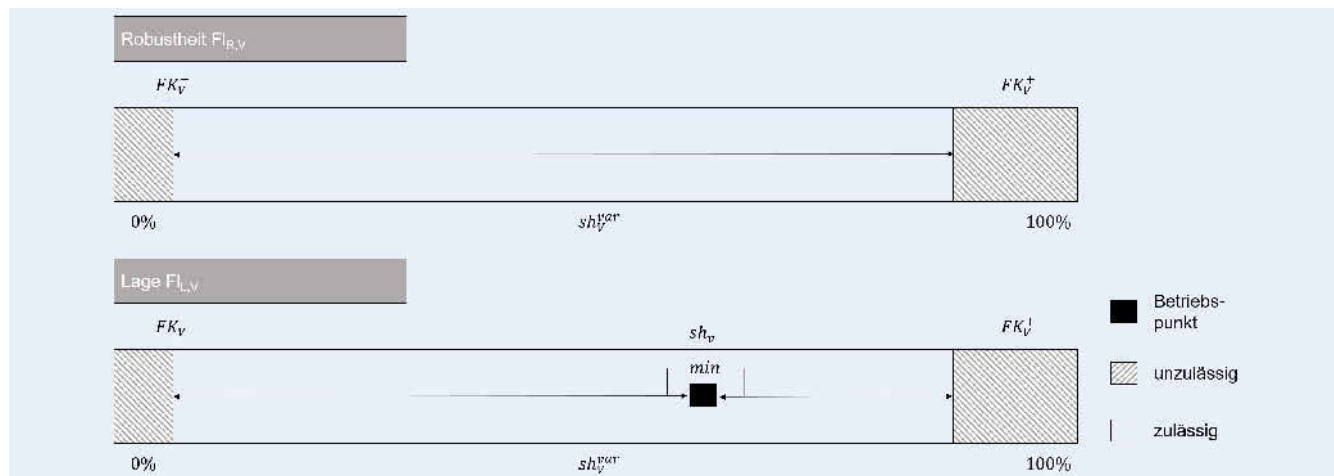


Bild 2. Darstellung der Robustheits- und Lagekennzahlen. Bild: wbk

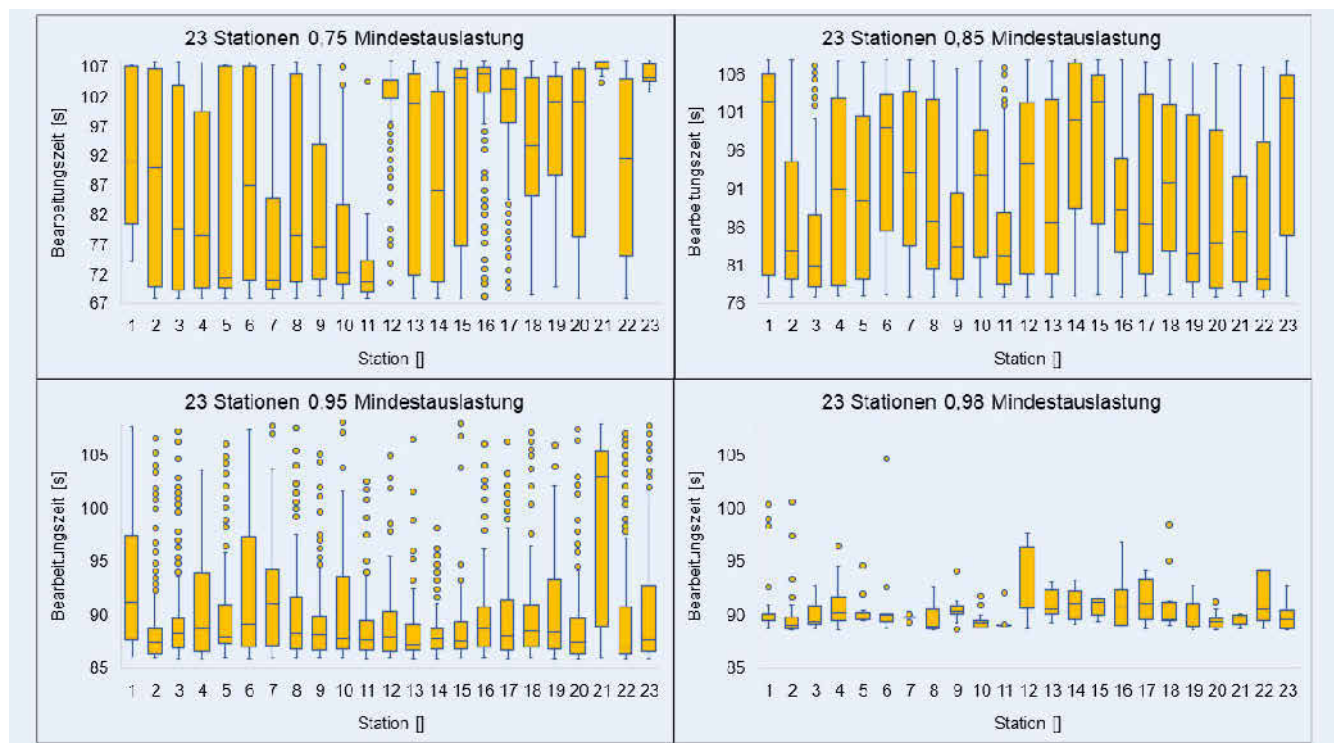


Bild 3. Boxplot der Bearbeitungszeit pro Station über alle zulässigen Lösungen. Bild: wbk

Erstellen des Lösungspools nach [22] läuft in zwei Phasen ab. In der ersten Phase wird der Branch & Bound-Baum konstruiert. In der zweiten Phase wird dieser Baum verwendet, um möglichst viele Lösungen zu erzeugen. Für die erzeugte Stichprobe wird anschließend die Flexibilitätskennzahl berechnet.

Die Flexibilitätskennzahl setzt sich nach Fisel aus der Robustheit und der Lage zusammen [13]. Die Robustheit ergibt sich als Abstand der oberen Grenze und unteren Grenze für den Anteil der betrachteten Variante am Produktionsmix. Die Robustheit gibt demnach an, innerhalb welchen Bereichs der relative Anteil der Produktvariante schwanken darf, ohne, dass die Taktzeit an einer Station überschritten wird. Das Lagemaß gibt an, wo der betrachtete Betriebspunkt relativ zu der nächsten Grenze liegt, siehe Bild 2. Die Flexibilitätskennzahl für das gesamte Produktionsprogramm ergibt sich als gewichtete Summe der Lage- und

Robustheitskennzahlen gemäß des relativen Anteils der Variante am Gesamtproduktionsprogramm.

#### 4 Erprobung am Beispiel einer automobilen Endmontage

Das Verfahren wurde am Beispiel einer Endmontage für Komponenten im Automobilbau mit drei Produktfamilien und über 100 Arbeitsschritten erprobt. Die maximale Stationszahl lag bei 25. Im ersten Schritt wurde die minimale Anzahl an Stationen ermittelt, bei der mit der Mindest- und Maximalauslastung zulässige Lösungen erzeugt werden. Bei 20 Stationen ist die Anzahl generierter Lösungen grundsätzlich am höchsten und bei 25 Stationen am niedrigsten, da bei einer hohen Anzahl Stationen die Mindestanzahl an Stationen nicht mehr erreichbar ist.



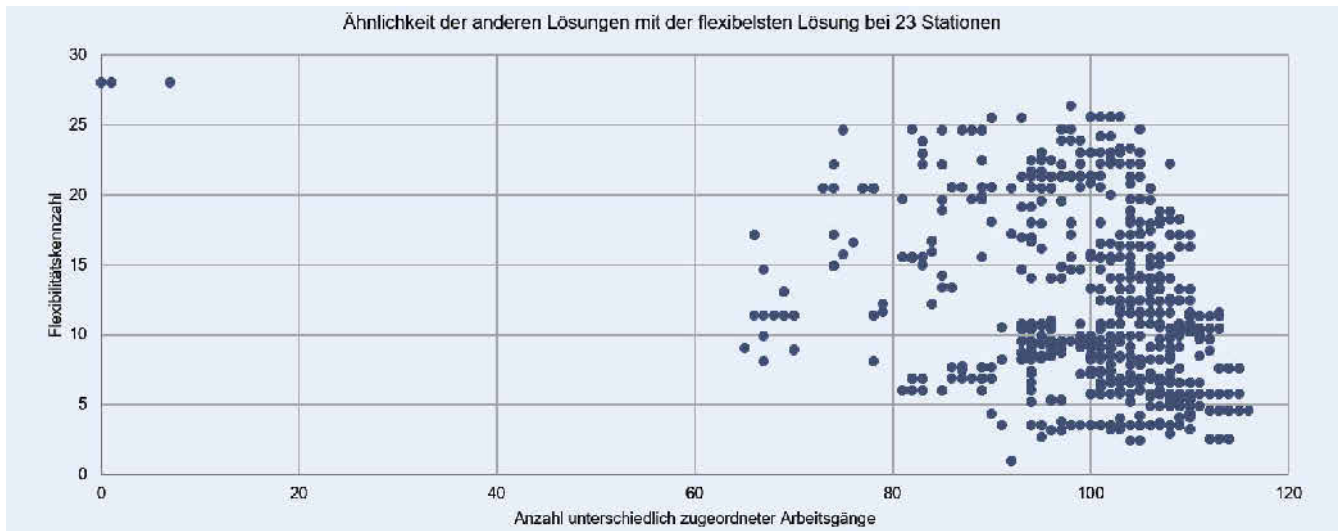


Bild 4. Flexibilitätskennzahl abhängig von der Ähnlichkeit der Allokation. Bild: wbk

Nach der Variation der Stationszahl wurden die Auslastungsrestriktionen variiert. Bei 23 Stationen werden bereits bei einer Mindestauslastung von 0,98 38 Lösungen generiert, während bei 25 Stationen erst bei einer Auslastung von 0,97 zwölf zulässige Lösungen gefunden werden.

Aus der Menge der zulässigen Lösungen wird eine Stichprobe möglichst unterschiedlicher Lösungen entnommen. Für das Sampling der Lösungen können Heuristiken, siehe [23] verwendet werden. Für diese Teilmenge werden die Flexibilitätskennzahlen und errechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Flexibilitätskennzahl für eine Mindestauslastung ab 95 % am höchsten ist und positiv mit der Anzahl der Stationen korreliert.

Bild 3 zeigt einen Boxplot der Summe der Bearbeitungszeiten der Arbeitsinhalte, die einer Station zugeordnet wurde für alle Lösungen aus der Stichprobe. Es wird ersichtlich, dass für steigende Mindestauslastungen die Diversität der Lösungen abnimmt, da immer weniger Möglichkeiten bestehen, die Restriktionen zu erfüllen. Bild 4 stellt für die Anzahl der unterschiedlich zugeordneten Arbeitsvorgänge im Vergleich zur Lösung mit der höchsten Flexibilitätskennzahl die erreichte Flexibilitätskennzahl dar. Es wird ersichtlich, dass ähnliche Lösungen zu der Referenzlösungen ebenfalls die höchste Flexibilität erreichen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte mehrschrittige Verfahren ermöglicht es, flexibilitätsmaximierende Austaktungsalternativen zu generieren und zu bewerten. Durch das stichprobenbasierte Vorgehen wird die Komplexität stark reduziert und gleichzeitig der Lösungsraum gleichmäßig abgedeckt. Durch die Anwendung konnte die Praxis-tauglichkeit sichergestellt werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht in Untersuchung der erreichbaren Lösungsgüte.

### DANKSAGUNG

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 416818066.

### Literatur

- [1] Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: A survey, Int. J. Flex. Manuf. Syst. 2 (1990) S. 289–328
- [2] De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: A literature review, Int. J. Prod. Res. 36 (1998) pp. 1587–1617
- [3] Koste, L. L.; Malhotra, M. K.: A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility, J. Oper. Manag. 18 (1999) S. 75–93
- [4] Rogalski, S.: Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen: Messung von Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität zur Bewältigung von Planungsunsicherheiten in der Produktion, 2009
- [5] Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionssysteme, GITO mbH Verlag, 2010
- [6] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung, 2014.
- [7] Matanachai, S.; C.A. Yano, C. A.: Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload, IIE Trans. 33 (2001) S. 29–42
- [8] Yang, C.; Gao, J.; Sun, L.: A Multi-Objective Genetic Algorithm for Mixed-Model Assembly Line Rebalancing, Comput. Ind. Eng. 65 (2013) S. 109–116
- [9] Boysen, N.: Variantenfließfertigung, Springer-Verlag, 2005
- [10] Altemeier, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume, HNI, 2009
- [11] Pröpster, M.: Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus, Herbert Utz Verlag, 2016
- [12] Küber, C.; Westkämper, E.; Keller, B.; Jacobi, H.-F.: Method for a cross-architecture assembly line planning in the automotive industry with focus on modularized, order flexible, economical and adaptable assembly processes, Procedia CIRP 57 (2016) S. 339–344
- [13] Fisel, J.: Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme: Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage, 2019
- [14] Weida, X.; Tianyuan, X.: Robust balancing of mixed model assembly line, COMPEL – Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng. 28 (2009) pp. 1489–1502
- [15] Guo, Z. X.; Wong, W.K.; Leung, S.Y.-S.; Fan, J.T.; Chan, S. F.: A Genetic-Algorithm-Based Optimization Model for Solving the Flexible Assembly Line Balancing Problem With Work Sharing and Workstation Revisiting, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C. 38 (2008) S. 218–228
- [16] Pereira, J.: The robust (minmax regret) assembly line worker assignment and balancing problem, Comput. Oper. Res. 93 (2018) S. 27–4
- [17] Bukchin, J.; Tzur, M.: Design of flexible assembly line to minimize equipment cost, IIE Trans. 32 (2000) S. 585–598
- [18] Li, J.; Gao, J.: Balancing manual mixed-model assembly lines using overtime work in a demand variation environment, Int. J. Prod. Res. 52 (2014) S. 3552–3567

- [19] Simaria, A. S.; de Sá, M.; Vilarinho, P. M.: Meeting demand variation using flexible U-shaped assembly lines, Int. J. Prod. Res. 47 (2009) S. 3937–3955
- [20] Papakostas, N.; Pintzos, G.; Giannoulis, C.; Nikolakis, N.; Chrysosolouris, G.: Multi-criteria Assembly Line Design under Demand Uncertainty, Procedia CIRP. 25 (2014) pp. 86–92
- [21] Weyand, L.: Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie, 2010
- [22] Danna, E.; Fenelon, M.; Gu, Z.; Wunderling, R.: Generating Multiple Solutions for Mixed Integer Programming Problems BT – Integer Programming and Combinatorial Optimization. In: Fischetti, M.; Williamson, D.P. (Eds.): Berlin: Springer 2007, pp. 280–294
- [23] Danna, E.; Woodruff, D.L.: How to select a small set of diverse solutions to mixed integer programming problems, Oper. Res. Lett. 37 (2009) pp. 255–260



**Constantin Hofmann**, M. Sc.

Bild: wbk

**Juliane Schoof**

Dr.-Ing. **Andreas Kuhnle**

Prof. Dr.-Ing. **Gisela Lanza**

wbk Institut für Produktionstechnik  
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe  
Tel. +49 721 / 608-44017  
constantin.hofmann@kit.edu  
www.wbk.kit.edu

## Innovative Werkzeugkonzepte zur Lebensdauererhöhung zum trockenen Schleifen von Stahl

# Entwicklung von Seilschleifwerkzeugen

B. Denkena, A. Krödel, C. Heller

Das Seilschleifen gewinnt im Rückbau kerntechnischer Anlagen immer mehr an Bedeutung. Aufgrund der hohen Belastung kommt es jedoch häufig zu frühzeitigem Werkzeugversagen. Seilschleifwerkzeuge bestehen aus Schleifsegmenten, die mittels Gummierung auf dem Trägerseil fixiert werden. In diesem Beitrag wird der Einfluss des Werkzeugverbundes auf das Einsatzverhalten und die Lebensdauer untersucht. Die Verwendung von neuen Werkstoffen als Vergussmasse zeigt dabei das Potenzial einer signifikanten Lebensdauersteigerung.

### STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Schleifen, Seilschleifen

### Development of wire grinding tools for dry wire grinding of steel – Innovative tool concepts to increase the tool life of wire grinding tools

Wire grinding processes are frequently used in dismantling of nuclear facilities. However, the tool life is limited due to high thermal and mechanical loads. Wire grinding tools consist of grinding segments that are fixed to the carrier wire by means of rubber coating. In this article, the influence of the tool structure on the grinding behaviour and the tool life is investigated. The use of new materials shows the potential of a significant increase in tool life.

## 1 Einleitung

Die Kernenergie deckt einen großen Anteil des weltweiten Energiebedarfs. Zu diesem Zweck waren im Jahr 2020 laut der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEO) weltweit 442 Kernkraftwerke mit einem Durchschnittsalter von 31 Jahren in Betrieb. Diese kerntechnischen Anlagen müssen nach Beendigung ihrer betrieblichen Nutzung von circa 30 Jahren ordnungsgemäß stillgelegt werden. So sieht sich die Rückbauindustrie in naher Zukunft mit einer Vielzahl von kostenintensiven Rückbauprojekten konfrontiert [1, 2]. Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage stellt jedoch hohe Anforderungen an die Produktionstechnik, da in den Anlagen viele verschiedene, komplexe Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen zum Einsatz kommen. Diese sind aufgrund des komplexen Designs des Reaktors nur schwer zugänglich. Seit den 90er Jahren wird deshalb neben den herkömmlichen mechanischen und thermischen Trennverfahren zunehmend auch das Seilschleifen eingesetzt [3, 4]. Das Seilschleifen zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Werkstückgeometrie und die erreichbare Schnitttiefe sowie einen geringen Platzbedarf aus. Um die zusätzliche Kontamination von Kühlmitteln beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zu vermeiden, wird das Seilschleifen trocken oder mit Druckluftkühlung durchgeführt. Dies führt zu einer Steigerung der thermischen Belastung im Seilschleifprozess, allerdings können die dabei entstehenden verunreinigten Stäube im Vergleich zu flüssigen Kühlschmierstoffen leichter kontrolliert und direkt aus dem Prozess abgesaugt werden [5, 6].

Die für das Seilschleifen eingesetzten Seilschleifwerkzeuge bestehen aus Segmenten mit Diamantkörnern in einer metallischen

Bindung, die auf einem Trägerseil aufgezogen werden. Dieser grundlegende Aufbau ist in **Bild 1** dargestellt. In modernen Fertigungsprozessen werden dabei drei Bindungstypen verwendet: Neben mehrschichtig gesinterten werden noch einschichtig belegte Schleifsegmente eingesetzt, die galvanisch gebunden oder vakuumgelötet werden. Gesinterte Schleifsegmente bieten aufgrund ihres mehrschichtigen Aufbaus eine lange Lebensdauer, sind aber nicht zum Trennen von reinem Stahl geeignet. Das duktile Materialverhalten von Stahl verursacht kein Zurücksetzen der Bindung durch die im Prozess entstehenden Späne. Dadurch können keine tiefer liegenden Diamantlagen freigelegt und in den Einsatz gebracht werden. Ein Abstumpfen und Splintern der obersten Diamantlage führt deshalb direkt zum Verschleiß des gesamten Werkzeugs während des Prozesses [7]. Gesinterte Werkzeuge werden deshalb vor allem zum Trennen von abrasiven Materialien wie Beton oder Naturstein eingesetzt. Für die Stahltrennung werden einschichtig gelötete oder galvanisch hergestellte Bindungssysteme eingesetzt. Diese besitzen eine hohe Kornkonzentration und einen hohen Kornüberstand, weisen aber aufgrund ihres Herstellverfahrens nur eine nutzbare Lage an Diamanten auf [8]. Durch Kornverschleiß in Form von Anflachungen und Absplitterungen der Diamanten beim Seilschleifen kommt es zu einer kontinuierlichen Veränderung der Eingriffsbedingungen, wodurch die reibungsinduzierte Werkzeugtemperatur stetig ansteigt [7].

Neben den für den Materialabtrag verantwortlichen Schleifsegmenten nimmt auch die Gummierung bei Seilschleifwerkzeugen eine zentrale Rolle ein. Sie schützt das Trägerseil und die Abstandsfeder vor äußeren Einflüssen und fixiert gleichzeitig die losen Schleifsegmente auf dem Trägerseil. Kommt es zum Versa-

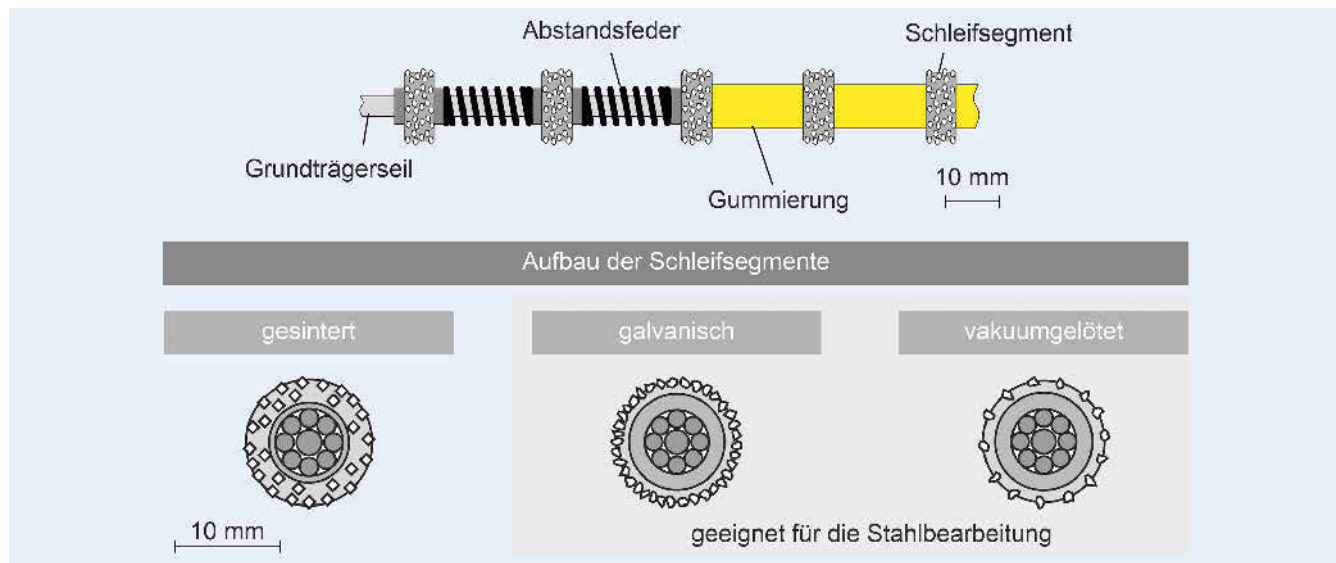


Bild 1. Aufbau eines Seilschleifwerkzeugs Bild: IFW

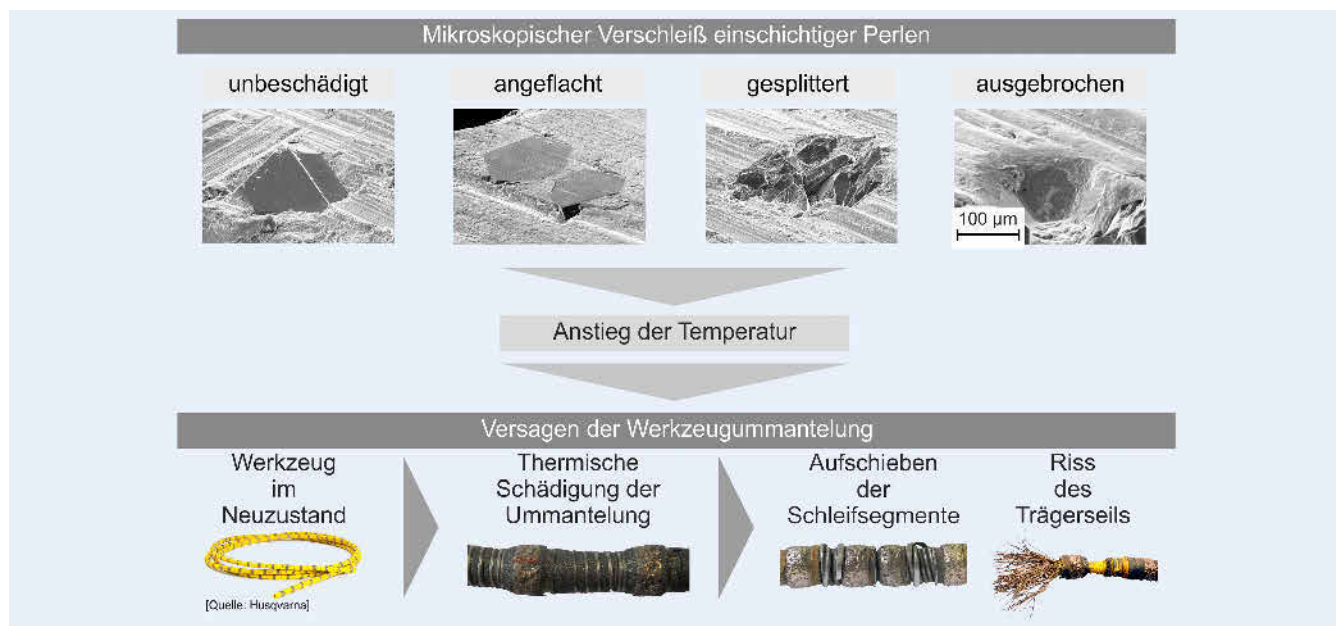


Bild 2. Versagensmechanismus aktueller Seilschleifwerkzeuge. Bild: IFW

gen dieses Haftungsverbunds aus Trägerseil, Gummierung und Schleifsegment, ist dieses axial nicht mehr gehalten. Infolge der Impulsbelastung beim Segmenteingriff in das Werkstück kommt es deshalb zu einer axialen Verschiebung der Schleifsegmente. Dies führt dazu, dass Bereiche des Trägerseils freigelegt werden und mechanisch mit dem Werkstück in Kontakt treten. Dies führt zu einem sofortigen Werkzeugversagen beziehungsweise Seilriss, der eine schwerwiegende Gefahr für umgebende Personen enthält (vergleiche Bild 2). Einschichtige Seilschleifwerkzeuge werden in der Regel mit einer Kautschuk-Mischung auf der Basis eines Nitril-Butadien-Kautschuks (NBR) vergossen. Dieser weist eine thermische Stabilität von circa 100 °C auf [7]. Oberhalb dieser Temperatur kommt es zu einer Versprödung der Gummierung. Diese begünstigt die Rissinitiierung und führt letztendlich zum Versagen des Gesamtwerkzeugs. Der thermisch bedingte

Gummierungsverschleiß stellt somit zurzeit das standzeitbestimmende Kriterium beim trockenen Seilschleifen von Stahl dar.

Eine Weiterentwicklung des Gummierungswerkstoffes mit höherer thermischer Stabilität führt damit unmittelbar zu einer Standzeiterhöhung. Deshalb wird am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) an der Entwicklung und Erprobung neuer Gummierungswerkstoffe geforscht. Neben der thermischen Stabilität ist dabei die Anhaftung des Werkstoffs an das Grundträgerseil entscheidend. Die im Seilschleifprozess auftretende hoch frequente Biegewechselbelastung stellt hohe Anforderungen an die mechanische Festigkeit des Gesamtwerkzeugs. Ziel dieses Beitrags ist es deshalb, die mechanische Festigkeit von Seilschleifwerkzeugen mit unterschiedlichen Gummierungsmaterialien zu charakterisieren und deren Einsatzverhalten anhand von Lebensdaueruntersuchungen zu vergleichen. Als Referenz zu



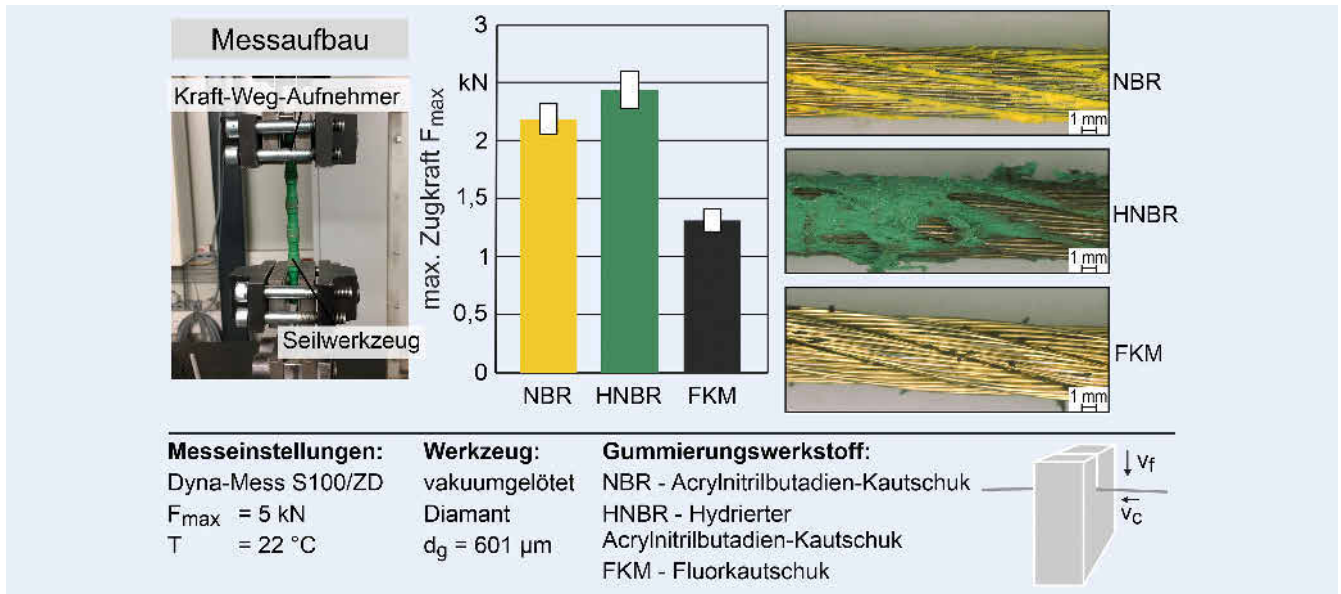


Bild 3. Mechanische Charakterisierung der Seilgummierung. Bild: IFW

den neuartigen Gummierungswerkstoffen wird dabei ein kommerziell verfügbares Referenzwerkzeug untersucht.

## 2 Mechanische Charakterisierung

Das Versagensverhalten der Gummierung lässt sich grundsätzlich durch zwei unterschiedliche Mechanismen charakterisieren. Zum einen löst sich durch adhäsives Versagen die Gummierungsschicht an der Kontaktstelle zum Trägerseil. Dies führt zum Haftungsverlust ganzer Bereiche von Schleifsegmenten und damit zum Versagen des Werkzeugs. Dieser Prozess ist überwiegend auf mechanisches Versagen aufgrund der Biegewechselbelastung und der Prozesskräfte zurückzuführen. Kohäsives Versagen hingegen zeichnet sich durch einen Bruchverlauf innerhalb der Gummierungsschicht aus. Dieses Verhalten wird durch die thermische Versprödung und daraus resultierender Rissinitiation begünstigt. Der optimale Gummierungswerkstoff für Seilschleifwerkzeuge zeichnet sich deshalb durch eine ausreichend hohe Haftung zum Trägerseil aus, um adhäsives Versagen auszuschließen, und besitzt gleichzeitig eine möglichst hohe Temperaturbeständigkeit zur Vermeidung kohäsiven Versagens.

Als Referenzwerkzeug kommt in den hier vorgestellten Untersuchungen ein Seilschleifwerkzeug mit einer Gummierung aus Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) zum Einsatz. Dieser ist bis circa  $100 \text{ °C}$  temperaturstabil und stellt den Stand der Technik bei der Herstellung von Seilschleifwerkzeugen dar. Dem gegenüber werden zwei prototypische Werkzeuge untersucht. Zum einen kommt ein hydrierter Nitrilkautschuk (HNBR) zum Einsatz. Dieser entsteht durch selektive Hydrierung von NBR, wodurch dessen Reaktivität vor allem im hohen Temperaturbereich gesenkt wird. Durch die molekulare Ähnlichkeit des HNBR zum NBR lassen sich so vergleichbare mechanische Eigenschaften bei einer erhöhten Temperaturbeständigkeit (bis zu  $140 \text{ °C}$ ) erzielen. Für das dritte Werkzeug wird ein Fluorkautschuk (FKM) zum Verguss verwendet. Dieser besteht aus hoch fluorierten Kohlenwasserstoffen und zeichnet sich durch hohe chemische Beständigkeit und eine sehr hohe Temperaturfestigkeit

von über  $200 \text{ °C}$  aus. FKM wird beispielsweise für Dichtungen in der Automobilbranche oder in der Raumfahrt verwendet. Alle Werkzeuge besitzen die gleichen vakuumgelöteten Diamantschleifsegmente mit einer Korngröße von  $601 \text{ }\mu\text{m}$ , um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Bisher ist jedoch noch keine Versuchsmethodik zur Bewertung der mechanischen Festigkeit von Gummierungswerkstoffen in einem Seilschleifwerkzeug bekannt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch den Aufbau des Werkzeugs, bestehend aus einem Litzenseil, Abstandsfeder und Schleifsegmente, eine Charakterisierung durch beispielsweise Schälversuche gemäß DIN EN 1372 nur bedingt aussagekräftig ist. Deshalb wurde im vorliegenden Fall eine Vorrichtung entwickelt, die es ermöglicht, Zugversuche mit Seilschleifwerkzeugen durchzuführen (Bild 3). Dazu wurde eine Zugprüfmaschine „S100/ZD“ der Firma Dyna-Mess Prüfsysteme GmbH verwendet. Diese erlaubt eine quasistatische Prüfung der Seilschleifwerkzeuge bei gleichzeitiger Aufnahme des Kraft-Weg-Verlaufs. Dabei wurde jeweils ein Schleifsegment in beiden Aufnahmen der Maschine befestigt und die Zugkraft kontinuierlich gesteigert, bis es zum Versagen des Werkzeugaufbaus und zum Abziehen des Schleifsegments vom Trägerseil kommt. Es wurden für jeden Gummierungswerkstoff drei Proben untersucht und der Mittelwert der maximalen Zugkraft bestimmt. Durch die axiale Krafteinleitung wird somit ein Kennwert aufgenommen, der sowohl die kohäsive Festigkeit des Gummierungswerkstoffs, als auch die adhäsive Anbindung an das Trägerseil charakterisiert. Die jeweils auftretende maximale Zugkraft zeigt, dass diese für das HNBR-Werkzeug mit  $2,39 \text{ kN}$  nur leicht über der Zugkraft des NBR-Werkzeugs mit  $2,28 \text{ kN}$  liegt. Das FKM-Werkzeug besitzt die geringste maximale Zugkraft. Da der Versuch bei Raumtemperatur durchgeführt wurde, ist hier die Temperaturbeständigkeit nicht ausschlaggebend. Beim FKM-Werkzeug kommt es zum vollständigen adhäsiven Versagen des Verbundes, sodass das blanke Trägerseil erkennbar ist. Das Trägerseil des NBR-Werkzeugs ist hingegen vollständig von Gummierungsresten benetzt, weshalb hier von einem rein kohäsiven Versagen ausgegangen werden kann. Das HNBR-Werkzeug weist ein überwie-

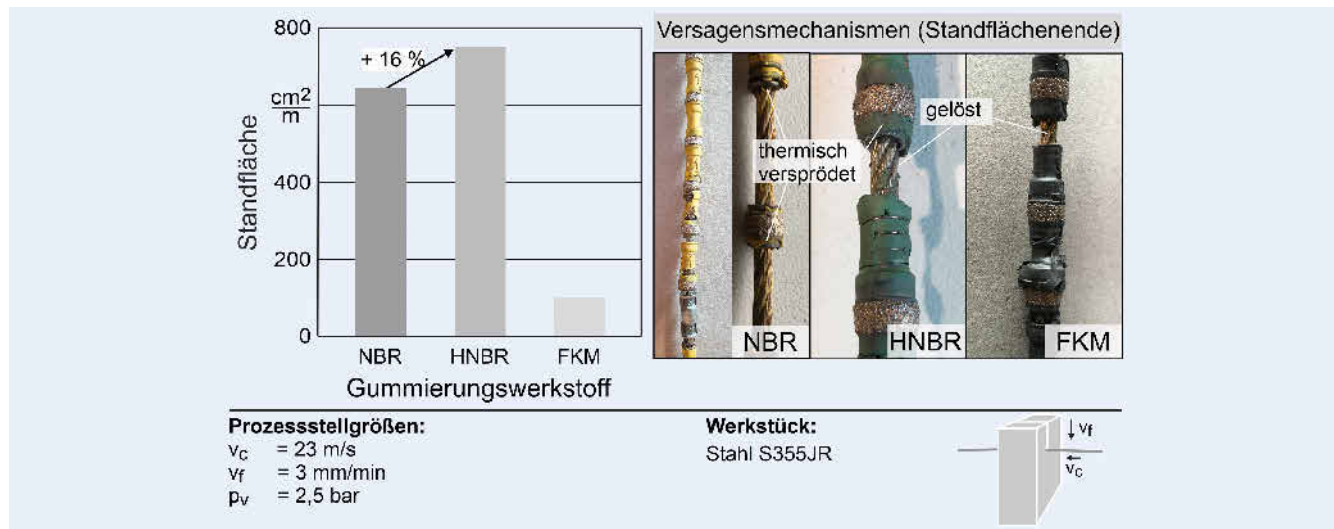


Bild 4. Standflächenvergleich Bild: IFW

gend kohäsives Versagen auf, zeigt jedoch auch einzelne blanke Stellen am Trägerseil. Die erhöhte Gesamtfestigkeit ist damit auf die verbesserten mechanischen Eigenschaften aufgrund der Hydrierung zurückzuführen, wodurch die geringere adhäsive Anbindung an das Trägerseil kompensiert wird.

### 3 Einsatzuntersuchungen

Um den Einfluss des Gummierungswerkstoffs auf das Einsatzverhalten der Seilschleifwerkzeuge zu untersuchen, wurden Schleifuntersuchungen an einer stationären Seilschleifmaschine am IFW durchgeführt. Diese verfügt über eine trockene Druckluftkühlung, um eine vergleichbare Prozessumgebung zu den Einsatzbedingungen im Rückbau kerntechnischer Anlagen zu realisieren. Als Versuchswerkstoff wurde jeweils Stahl der Sorte S355JR verwendet. Die verwendeten Prozessstellgrößen entsprechen einem stabilen und wirtschaftlichen Prozess gemäß bereits abgeschlossener Untersuchungen am IFW [6]. Das Ende der Standzeit wurde bei den folgenden Untersuchungen als der Punkt definiert, ab dem freigelegte Bereiche des Trägerseils erkennbar waren, die bei weiterem Einsatz zum unmittelbaren Versagen des Werkzeugs führen würden.

Die resultierenden Standflächen sind in Bild 4 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die erreichten Standflächen direkt mit der maximalen Zugkraft der mechanischen Charakterisierung korrelieren. Das FKM-Werkzeug weist ein sehr frühes Werkzeugversagen auf. Aufgrund der geringen Anhaftung des Werkstoffs am Trägerseil löst sich hier der gesamte Werkzeugaufbau vom Trägerseil. Es sind keine Anzeichen einer Versprödung beziehungsweise thermischen Schädigung des Werkstoffs erkennbar. Der Vorteil der höheren Temperaturbeständigkeit kann jedoch nicht ausgenutzt werden, da das adhäsive Versagen des Gesamtverbundes überwiegt. Dem gegenüber zeigt das Referenzwerkzeug mit NBR-Gummierung kohäsives Versagen. Das Trägerseil ist auch nach dem Einsatz noch nahezu vollständig mit Gummierungsresten benetzt. Hier führt die thermische Schädigung der Gummierung zu Rissbildung und innerem Versagen. Das HNBR-Werkzeug zeigt einen Kompromiss aus beiden Versagensformen. Durch die höhere Temperaturbeständigkeit wird eine um 16 % höhere Standfläche gegenüber dem Referenzwerkzeug erzielt.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Seilschleifen wird immer häufiger im Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt. Dabei werden hohe Anforderungen an den Schleifprozess gestellt, weshalb ein besonderer Bedarf an innovativen Seilschleifwerkzeugen besteht. Vor allem die Gummierung limitiert bei heute verfügbaren Werkzeugen die Lebensdauer in trockenen Schleifprozessen. Deshalb wurden prototypische Werkzeuge mit neuartigen Vergusswerkstoffen hergestellt und auf ihr Einsatzverhalten hin untersucht. Die mechanische Charakterisierung der Festigkeit des Gesamtwerkzeugs zeigt dabei eine positive Korrelation mit der Lebensdauer der Werkzeuge. HNBR zeigt hier die höchste mechanische Festigkeit und erreicht eine um 16 % erhöhte Lebensdauer gegenüber kommerziellen Referenzwerkzeugen, da es einen Kompromiss zwischen hoher Temperaturbeständigkeit und guter Anhaftung zum Trägerseil bietet. In fortsetzenden Untersuchungen wird dieses Werkzeug weiterentwickelt. Es soll untersucht werden, ob das adhäsive Versagen der Gummierungsschicht im Seilschleifwerkzeug durch den Einsatz von Haftvermittlern vollständig unterdrückt und somit eine weitere Steigerung der Lebensdauer erreicht werden kann und inwiefern sich die thermische Stabilität auf wichtige Werkzeugeigenschaften wie die Biegefestigkeit auswirkt.

#### DANKSAGUNG

Die dargestellten Untersuchungen wurden innerhalb des Forschungsvorhabens 15S9494 „Innovatives Seilschleifkonzept für die Bearbeitung von Stahl (InnoSeil)“ im Rahmenprogramm „Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

## Literatur

- [1] Stahl, T.; Strub, E.; 2012: Stilllegung kerntechnischer Anlagen, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Köln
- [2] Thierfeldt, S.; Schartmann, F.; 2009: Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, Brenk Systemplanung, Aachen
- [3] Tönshoff, H.K.; 2003: Automatisierte Fertigung unter Wasser, Wiley-VCH, Weinheim
- [4] Steiner, H.: Dismantling and demolition processes and technologies in nuclear decommissioning projects. In: Nuclear Decommissioning – Planning, Execution and International Experience, 2012, S. 293–318
- [5] Denkena, B.; Köhler, J.; Seiffert, F.: 2011: Alternative cooling strategy for the wire sawing process in the dismantling of nuclear power plants – Comparison of the process behaviour on steel with and without coolant supply, Kontec, Dresden, 2011, S. 199–214
- [6] Gärtner, S.; Dutzi, G.; Praxl, H.; 2005: Neue Konzepte in der Zerlegetechnik – Trockenes Seilsägen. In: Tagungsband 7. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“ KONTEC, Berlin, S. 415–418
- [7] Tatzig, L.: Trockenes Seilschleifen von Stahl, Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Berichte aus dem IFW, 2018
- [8] Knecht, D.: Untersuchungen zum Seilsägeprozess an Stählen ausgewählter Geometrie im umschlingenden Verfahren. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2015



Prof. Dr.-Ing. **Berend Denkena**  
Bild: IFW

Dr.-Ing. **Alexander Krödel**

**Christian Heller**, M. Sc.

Institut für Fertigungstechnik  
und Werkzeugmaschinen (IFW)  
Leibniz Universität Hannover  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
Tel. +49 511 / 762-18066  
heller@ifw.uni-hannover.de  
www.ifw.uni-hannover.de