

FORSCHUNGSBEIRAT



Expertise des Forschungsbeirats Industrie 4.0

Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme

Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen: O2P17D260) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Empfohlene Zitierweise:

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme, 2024, DOI: 10.48669/fb40_2024-2

Impressum

Herausgeber

Forschungsbeirat Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

Projektbüro

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer-Institut für
Entwurfstechnik Mechatronik (Fraunhofer IEM)
Lynn Humpert; Jan-Philipp Disselkamp; Dr.-Ing. Anja Schierbaum,
Kristin Zagatta; Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Koordination

Dr. Paul Grünke, acatech

Redaktion und Lektorat

Elisabeth Mader

Gestaltung und Produktion

GROOTHUIS. Gesellschaft der Ideen und Passionen mbH
für Kommunikation und Medien, Marketing und Gestaltung;
goothuis.de

Bildnachweis

AdobeStock/TensorSpark (generiert mit KI)

Stand

Juli 2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

 **acatech**
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

 **Fraunhofer**
IEM

Der **Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0** berät als strategisches und unabhängiges Gremium die *Plattform Industrie 4.0*, ihre Arbeitsgruppen und die beteiligten Bundesministerien, insbesondere das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Als **Sensor** von Entwicklungsströmungen beobachtet und bewertet der Forschungsbeirat die Leistungsprofilentwicklung von Industrie 4.0 und versteht sich als **Impulsgeber** für künftige Forschungsthemen und Begleiter beziehungsweise Berater zur Umsetzung von Industrie 4.0. Dabei konzentriert sich der Forschungsbeirat inhaltlich auf folgende **Themenfelder im Kontext von Industrie 4.0**:

- Industrielle Wertschöpfung im Wandel
- Perspektiven technologischer Entwicklungen
- Engineering von Industrie 4.0-Lösungen
- Arbeit, Unternehmen und Gesellschaft

Hier setzen die **Expertisen des Forschungsbeirats** an. Vor dem Hintergrund der Themenfelder werden klar umrissene Problemstellungen aufgezeigt, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe definiert und Handlungsoptionen für eine erfolgreiche Gestaltung von Industrie 4.0 abgeleitet.

Die Expertisen liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Autorinnen und Autoren. Alle bisher erschienenen Publikationen des Forschungsbeirats stehen unter www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/ zur Verfügung.

Inhalt

Kurzfassung/Management Summary	5
1. Einleitung	6
2. Ausgangslage und Zielsetzung	7
3. Methodisches Vorgehen	9
4. Grundlagen	12
4.1. Produktionssysteme in Deutschland: Status Quo und zukünftige Merkmale	12
4.2. Bausteine autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	14
4.2.1. Definition autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	14
4.2.2. Merkmale autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	16
4.3. Unterschiede zwischen bestehenden Produktionssystemen und autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen	17
4.4. Treiber und Anwendungsfelder autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	18
4.4.1. Treiber	18
4.4.2. Anwendungsfelder	19
4.4.2.1. Logistik	19
4.4.2.2. Batterietechnik	20
4.4.2.3. Industrielle Produktion	20
4.4.2.4. Gesundheit	21
4.5. Zusammenfassung	21
5. Engineering	23
5.1. Status quo – Engineering von Produktionssystemen	23
5.2. Status quo – Branchenspezifische Besonderheiten	26
5.3. Wegweiser der Zukunft: Trends im Engineering	29
5.4. Systems Engineering als verbindendes Element zwischen Autonomie und Wandelbarkeit	33
5.4.1. Systems Engineering	33
5.4.2. Verknüpfung mit dem Produktionskontext	35
5.4.3. Die Schlüsselfaktoren des Systems Engineerings für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme	38
5.5. Ein Blick auf Standards, Richtlinien und Normen	40
5.6. Zusammenfassung	41
6. Best Practices aus Unternehmen	43
6.1. Beispiele aus Industrieunternehmen	43
6.1.1. Smart Factory im Werkzeugbau bei KAMAX	43
6.1.2. <i>Fabrik der Zukunft</i> Porsche Zuffenhausen	44
6.1.3. Matrixproduktion im Fluss der Siemens AG	45
6.1.4. <i>Datenfabrik.NRW</i>	46
6.2. Erfolgsfaktoren für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen	47
6.3. Kompetenzprofile	48
6.4. Zusammenfassung	51

7. Chancen und Barrieren	53
7.1. Chancen für Unternehmen durch das Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	53
7.2. Barrieren im Engineering zukunftsfähiger Produktionssysteme	55
7.3. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für das (modellbasierte) Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	56
7.4. Zusammenfassung	58
8. Zukunft gestalten	60
8.1. Handlungsfeld – Kollaboration zwischen den Engineering-Bereichen ausbauen	60
8.2. Handlungsfeld – Weiterentwicklung von Engineering-Methoden	60
8.3. Handlungsfeld – Investition in Wissen und Bildung	60
8.4. Abschließende Betrachtungen für Unternehmen	61
9. Literaturverzeichnis	63

Kurzfassung/Management Summary

Getrieben von stetig zunehmender Digitalisierung und dem Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) werden Industrie 4.0-Systeme zunehmend autonom und wandelbarer. In dieser Weiterentwicklung liegen große Chancen, die Industrie in Deutschland wettbewerbsfähig und innovativ zu halten sowie den Herausforderungen und Risiken unserer Zeit zu begegnen.

Industrie 4.0 bezeichnet die vierte industrielle Revolution, die vor allem durch die Digitalisierung und Vernetzung von Produktionssystemen gekennzeichnet ist. Der Einsatz neuester Technologien wie KI ermöglicht eine zunehmend autonome und flexible Produktionslandschaft. Der Begriff „autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme“, der für eine Weiterentwicklung des Industrie 4.0-Konzepts steht, soll dies zum Ausdruck bringen. Er beschreibt die Fähigkeit von Produktions- und Fertigungssystemen, sich selbstständig an neue Bedingungen anzupassen und Veränderungen autonom vornehmen zu können. Der Einsatz fortgeschrittener Algorithmen trägt dazu bei, dass diese Systeme auch in unsicheren und dynamischen Umfeldern agieren können.

Die vorliegende Expertise wurde von Mitarbeitenden des Fraunhofer-Instituts für Entwicklungstechnik Mechatronik (IEM) erstellt, um dem wachsenden Bedarf an grundlegendem Wissen über das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen aufzuzeigen. Sie beinhaltet eine systematische Literaturrecherche, um Lücken in der Forschung zu identifizieren, und das Ergebnis von insgesamt 18 mit Fachleuten durchgeführten Interviews. Die semi-strukturierten Interviews decken verschiedene Branchen wie Werkzeugmaschinenbau, Agrarwirtschaft, Automotive und Medizintechnik ab. Die Expertise beleuchtet die Bedeutung der autonomen Anpassungsfähigkeit in der Produktion sowie ihre Potenziale wie Effizienzsteigerungen, Kosteneinsparungen, Qualitätsverbesserungen und Innovationsfähigkeit. Zudem präsentiert sie Best Practices

führender Industrieunternehmen, die aufzeigen, wie zukunftsfähige Produktionssysteme entwickelt werden können.

Im Hauptteil der Expertise wird das Engineering von Produktionssystemen in Verbindung mit Systems Engineering untersucht. Das Engineering von Produktionssystemen bezieht sich auf den Prozess der Konzeption, Entwicklung und Gestaltung von Produktionssystemen und -prozessen. Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz, der auf dem Systemdenken¹ basiert. Mit diesem Ansatz können komplexe Herausforderungen effizient bewältigt und innovative Lösungen entwickelt werden. Das Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme wird durch einen ganzheitlichen Ansatz, Interdisziplinarität, Kundenintegration, dynamische Anpassungsfähigkeit und die Integration digitaler Technologien gekennzeichnet. Es wird das gesamte System aus Produkt und Produktionssystem betrachtet. Dennoch besteht sowohl in der industriellen Praxis als auch in der Forschungslandschaft ein Mangel an Konnektivität: Systems Engineering und das Engineering von Produktionssystemen weisen geringe Überschneidungen auf. Hinzu kommen die spezifischen Ansätze in den Bereichen der Autonomie und der Wandelbarkeit. Es bedarf der Kommunikation und Kooperation von Fachleuten verschiedener Bereiche und Abteilungen mit unterschiedlichen Ausdrucksmitteln sowie eigenen Sichten auf das „System“. Eine stärkere Vernetzung ist erforderlich.

Abschließend werden die Forschungsbedarfe in drei Handlungsfeldern zusammengefasst. Erstens sollten die Communities der Produktionssystementwicklung und des Systems Engineerings enger zusammenarbeiten. Zweitens müssen Lösungen entwickelt werden, die die Ansätze der Produktionssystementwicklung und des Systems Engineerings miteinander verknüpfen. Drittens gilt es diese interdisziplinäre Zusammenarbeit auch in der Lehre und Weiterbildung zu integrieren.

1 Systemdenken ist eine Denkweise, bei der komplexe Probleme ganzheitlich betrachtet werden, um Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen eines Systems zu erkennen. Weitere Informationen: Vgl. Rüdiger Kaffenberger GfSE 2017.

1. Einleitung

Heutige technische Systeme zeichnen sich durch ein immer engeres Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Software aus. Sie sind das Ergebnis eines Wandels von klassischen Mechanik-zentrierten Systemen hin zu Systemen, die allgemein als intelligent bezeichnet werden können.² Dieser Wandel betrifft auch die Produktionssysteme dieser Systeme. Fortschritte beispielsweise in den Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), der Datenanalyse und im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) ermöglichen die Entwicklung sogenannter autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme, die die Fähigkeiten heutiger Produktionssysteme erweitern. Eine zentrale Fähigkeit von Industrie 4.0-Systemen ist Wandelbarkeit. Sie trägt zur Resilienz von Fertigungsprozessen und -systemen bei, indem sie Ausfälle von Maschinen, Anlagen und Arbeitskräften ausgleicht. Daher konzentrieren sich viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten darauf, wie die Wandelbarkeit von Industrie 4.0-Systemen, etwa durch Interoperabilität, verbessert werden kann.

Die neuen Fähigkeiten bringen jedoch auch eine steigende Komplexität mit sich, sowohl auf der Ebene der Systeme selbst als auch auf Ebene des Engineerings dieser Systeme.³ An der Entwicklung von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen ist zudem eine Vielzahl von Fachleuten mit unterschiedlichen Perspektiven beteiligt. Bei der gemeinsamen Arbeit an autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen bedarf es daher eines Vorgehens, das der Komplexität der Systeme, ihrer wechselseitigen Dynamik sowie den unterschiedlichen Perspektiven der Fachleute gerecht wird.

In diesem Kontext gewinnen Ansätze wie das Systems Engineering zunehmend an Bedeutung, insbesondere aufgrund des interdisziplinären Charakters des Engineerings autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systemen. Bislang fokussieren etablierte Ansätze des Sys-

tems Engineerings vornehmlich die Entwicklung von Produkten. Beim Engineering von Produktionssystemen müssen jedoch auch immer komplexere Abhängigkeiten zwischen Produkten, Prozessen und den realisierenden Produktionsressourcen berücksichtigt werden. Wie das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen in Zukunft gestaltet werden kann, muss daher eingeordnet werden.

Das Ziel der vorliegenden Expertise ist deshalb, eine Basis für die Definition von autonom wandelbareren Industrie 4.0-Systemen zu schaffen und das zukünftige Engineering dieser Systeme aufzuzeigen. Die Expertise bietet eine umfassende Analyse des Ist-Zustands und der Zukunftsperspektiven des Engineerings von Produktionssystemen. Dafür werden auf Basis einer Befragung von Fachleuten und einer systematischen Literaturrecherche Merkmale von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen dargestellt und das Engineering dieser Systeme betrachtet. Unter anderem wird dabei beleuchtet, inwieweit das Systems Engineering als Grundlage zur Weiterentwicklung des Engineerings von Produktionssystemen dienen kann. Außerdem werden vier Best Practices aufgezeigt, die Einblicke in den heutigen Stand der Produktionssystementwicklung bieten. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Handlungsfelder für die Gestaltung der Rahmenbedingungen in Wirtschaft, Politik und Wissenschaft, aber auch für ihre Umsetzung in den Unternehmen in unterschiedlichen Branchen aufgeführt.

Das Ziel der Expertise ist, den künftigen Bedarf an Forschung und Entwicklung in dem Bereich zu ermitteln und Handlungsoptionen für verschiedene Akteurinnen und Akteure abzuleiten, um das Systems Engineering für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme in der betrieblichen Praxis einzuführen und kontinuierlich zu verbessern.

² Vgl. Gausemeier et al. 2019.

³ Vgl. Gausemeier et al. 2019; Dumitrescu et al. 2021.

2. Ausgangslage und Zielsetzung

Der Begriff Industrie 4.0 war in den vergangenen Jahren häufig Gegenstand von Diskussionen. Er beschreibt die vierte industrielle Revolution.⁴ Im Zuge von Industrie 4.0 wurden neue Technologien und Konzepte wie das Internet der Dinge (IoT), künstliche Intelligenz (KI) und Automatisierung eingeführt, um die Produktivität sowie Effizienz der Produktionssysteme zu steigern und damit den Kundennutzen zu erhöhen.⁵ Industrie 4.0 hat somit einen erheblichen Beitrag zur Weiterentwicklung der Industrie allgemein geleistet.

Industrie 4.0 verändert die Denk- und Arbeitsweise

Industrie 4.0 hat jedoch nicht nur technologische Fortschritte zur Folge, sondern hat auch die Denk- und Arbeitsweise in der Industrie verändert. Unternehmen müssen ihre Prozesse neu gestalten und sich an sich dynamisch verändernde Anforderungen anpassen, die die Digitalisierung mit sich bringt. Sie müssen Daten integrieren und große Datenmengen analysieren, um die Entscheidungsfindung zu verbessern und eine höhere Transparenz in der gesamten Wertschöpfungskette herzustellen.⁶ Zudem müssen sie Standards etablieren, um das Zusammenspiel der Anlagen effizient zu managen. Passen sie sich den neuen Gegebenheiten an und gestalten die Transformation proaktiv, dann eröffnet Industrie 4.0 den Unternehmen neue Geschäftsmöglichkeiten, weil es sie in die Lage versetzt, innovative Produkte und Dienstleistungen anzubieten.⁷

Industrie 4.0 hat die Industrie maßgeblich verändert. Unternehmen, die dementsprechende Technologien und Konzepte erfolgreich implementieren, können ihre Effizienz steigern, Kosten senken und Kundenwünsche besser bedienen.⁸ Dabei sind Digitalisierung und Vernetzung wichtige Voraussetzungen dafür, Industrie 4.0-Potenziale zu heben sowie Innovation und Fortschritt voranzutreiben.

Autonomie und Wandelbarkeit als zentrale Aspekte von Industrie 4.0-Systemen

In der heutigen Zeit steht die deutsche Industrie vor zahlreichen Herausforderungen. Die Globalisierung, der Wettbewerbsdruck und die steigenden Kundenanforderungen erfordern flexible und agile Produktionsprozesse, die stärker als bislang kollaborativ und menschenzentriert gestaltet werden müssen.⁹

Dafür bietet Industrie 4.0 Lösungen, indem sie Autonomie und Wandelbarkeit in den Mittelpunkt stellt. Autonome Systeme können eigenständig Entscheidungen treffen und sich an veränderte

Bedingungen anpassen. Die Wandelbarkeit erlaubt es Unternehmen, ihre Produktion technisch und menschbezogen, schnell und effizient an neuen Anforderungen auszurichten.¹⁰

Autonomie und Wandelbarkeit in Industrie 4.0-Systemen basieren auf verschiedenen Technologien und Konzepten. IoT und KI spielen dabei eine zentrale Rolle. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Vernetzung von Maschinen und Geräten. Diese schafft die Voraussetzung dafür, dass autonome Entscheidungen getroffen und Prozesse optimiert werden können.

Einführung der Begrifflichkeit autonom wandelbares Industrie 4.0-System

Aktuell befinden sich autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme noch im Stadium der konzeptionellen Vision, wobei ihr Potenzial als zukunftsweisende Entwicklung erkannt wird. Es beschreibt die Ausrichtung auf das zukünftige Engineering neuer Produktionssysteme, die zunehmend komplexer und variantenreicher werden und sich gleichzeitig durch kurze Innovationszyklen auszeichnen. In dieser Expertise wird der Begriff autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme näher erläutert, um ein umfassendes Verständnis von Industrie 4.0 und den Herausforderungen der Entwicklung dieser Systeme zu vermitteln.

In den Interviews wurde deutlich, dass autonom wandelbare Systeme bisher noch eine Vision sind und nicht oder nur in Ansätzen in der Praxis realisiert werden. Es bedarf daher weiterführender Forschung im Hinblick darauf, wie eine konkrete Umsetzung gelingen kann.

Das Engineering dieser Systeme steht im Mittelpunkt

Die technische Basis von Industrie 4.0 bilden intelligente, digital vernetzte Produkte, Dienstleistungen und Produktionssysteme. Flexible Kombinationen von Produkten und Dienstleistungen sowie ein hoher Grad an Autonomie und Vernetzung kennzeichnen die Systeme von morgen. Die ganzheitliche Gestaltung dieser technischen Systeme erfordert eine neue Herangehensweise an das Engineering der Zukunft.¹¹ In der Entwicklung bedarf es einer Methodik, um die Komplexität der Produktionssysteme zu beherrschen, der hohen Dynamik in der Entwicklung technischer Möglichkeiten gerecht zu werden sowie eine Vielzahl von Fachleuten zu integrieren. Systems Engineering adressiert genau diese Bedarfe. Daher be-

4 Vgl. Pistorius 2020.

5 Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2019.

6 Vgl. Pistorius 2020.

7 Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2019.

8 Vgl. Pistorius 2020.

9 Vgl. Vogel-Heuser und Bengler 2023.

10 Vgl. acatech 2018.

11 Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

schäftigt sich diese Expertise mit der Frage, wie aufbauend auf den Grundlagen des Systems Engineerings das Engineering von Produktionssystemen an sie wachsenden Herausforderungen weiterentwickelt werden kann.

Autonomie und Wandelbarkeit als Auswirkungen auf das Engineering

Die in dieser Expertise betrachteten Industrie 4.0-Systeme zeichnen sich durch zwei wesentliche Eigenschaften aus: Autonomie und Wandelbarkeit.

Autonomie bedeutet, dass die technischen Systeme in der Lage sind, eigenständig Entscheidungen zu treffen und Aktionen durchzuführen, die keinen menschlichen Eingriff erfordern.¹² Um sicherzustellen, dass die autonomen Funktionen effektiv und zuverlässig arbeiten, ist eine umfassende Planung und Gestaltung des Systems nötig. Während des Engineering-Prozesses muss sichergestellt werden, dass die Algorithmen und Kontrollsysteme die notwendigen Fähigkeiten besitzen, um die gestellten Aufgaben autonom auszuführen. Zudem müssen Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden, um zu gewährleisten, dass die autonomen Systeme keine Gefahr für Menschen oder andere Maschinen darstellen.¹³

Wandelbarkeit beschreibt die Fähigkeit der Systeme, sich an veränderte Anforderungen anzupassen und flexibel auf neue Situationen zu reagieren.¹⁴ Dies erfordert ein flexibles und modulares Design, durch das sich Komponenten und Funktionen schnell hinzufügen, entfernen oder anpassen lassen. Das Engineering muss sicherstellen, dass die Systeme skalierbar und erweiterbar sind, um Änderungen in der Produktion oder im Betrieb zu ermöglichen. Zudem ist auch eine gute Kommunikation und Integration der verschiedenen Komponenten des Systems nötig, um eine nahtlose Zusammenarbeit zu gewährleisten.

Integration von Autonomie und Wandelbarkeit durch zielgerichtetes Engineering

Mithilfe des Engineerings lassen sich bestehende und neue Produktionsanlagen autonom und wandelbar gestalten. Schnittstellen müssen frühzeitig und eindeutig definiert und entwickelt werden, um die Kommunikation zwischen den autonom wandelbaren Systemen und anderen Maschinen oder Anlagen zu ermöglichen. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Fachleuten der Produkt- sowie der Produktionssystementwicklung, wie

beispielsweise Fachleuten aus der Elektrotechnik, dem Maschinenbau und der Informatik, aber auch aus der Fertigungsplanung, der Materialflussplanung und der Automatisierung.

SE hat den Anspruch, eine Methodik für die Entwicklung von komplexen und interdisziplinären Systemen zu liefern, um die Herausforderungen bei der Entwicklung von autonomen und wandelbaren Industrie 4.0-Systemen erfolgreich zu bewältigen. Es liefert die methodische Grundlage für eine sorgfältige Planung, Gestaltung und disziplinübergreifende Entwicklungssprache. Dies ermöglicht, dass die Systeme effizient, sicher und zuverlässig arbeiten und den Anforderungen der modernen Produktionssysteme gerecht werden. SE beinhaltet zudem Methoden und Werkzeuge, die das unternehmensweite Wissensmanagement und die Zusammenarbeit fördern. Darüber hinaus zeigt die Expertise Best Practices für Prozesse, Methoden, IT-Werkzeuge und Informationsstandards auf, die es global tätigen Organisationen ermöglichen, lernfähig sein und zu bleiben sowie über verteilte Entwicklungsstandorte in Wertschöpfungsnetzwerken zusammenzuarbeiten.¹⁵

In der Expertise werden die folgenden Fragestellungen beantwortet:

Frage 1 (Kapitel 4): Wie sind autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme definiert und welche Treiber und Anwendungsfelder bestehen für diese?

Frage 2 (Kapitel 5): Wie sieht das Engineering von Produktionssystemen in der heutigen Zeit aus und welche Herausforderungen ergeben sich dabei insbesondere im Hinblick auf autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme?

Frage 3 (Kapitel 6): Welche Best Practices bestehen in der Industrie und welche Kompetenzprofile werden für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen benötigt?

Frage 4 (Kapitel 7): Welche Chancen, Herausforderungen und Forschungsbedarfe ergeben sich für das Systems Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen?

12 Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

13 Vgl. Vogel-Heuser et al. 2017.

14 Vgl. Demeester et al. 2011.

15 Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

3. Methodisches Vorgehen

Es gibt eine große Nachfrage nach grundlegendem Wissen zur Entwicklung von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen. Das beinhaltet Fragen zur Definition, zu Merkmalen und Handlungsoptionen. Diese Expertise soll dieser Nachfrage gerecht werden. Im Sinne eines transparenten nachvollziehbaren Vorgehens werden verschiedene Forschungsmethodiken eingesetzt, die sich gegenseitig ergänzen. Die Arbeit an der Expertise gliederte sich in sechs Schritte (siehe Tabelle 1) der Datenerhebung und -analyse. Die Daten wurden auf Basis einer systematischen Literaturrecherche (SLR) nach Kitchenham und Charters¹⁶ und semistrukturierter Interviews mit Fachleuten erfasst. Die Datenanalyse wurde nach Mayring¹⁷ durchgeführt. Die SLR ermöglichte die Bewertung und Interpretation aller verfügbaren relevanten Forschungsarbeiten zu einer bestimmten Fragestellung oder einem Themenbereich. Die Fachleute wurden befragt, um zusätzliche Informationen und Einsichten zu den Themen Systems Engineering und Industrie 4.0 zu erhalten. Aufgrund ihres Fachwissens und ihrer Erfahrung konnten sie wertvolle Erkenntnisse liefern, die eine systematische Literaturrecherche allein nicht gebracht hätte. Die Interviews mit den Fachleuten dienen außerdem dazu, weitere Forschungslücken zu identifizieren und eine fundierte Grundlage für die weiteren Untersuchungsschritte zu schaffen. Die befragten Fachleute arbeiten hauptsächlich an Standorten in Deutschland, einige von ihnen auch an Standorten im Ausland.

Insgesamt wurden 18 Interviews mit Fachleuten durchgeführt. Befragt wurden Fachleute aus der akademischen Forschung und der Industrie in Deutschland, die im Bereich Systems Engineering und Industrie 4.0 tätig sind (siehe Tabelle 2), darunter Mitarbeitende aus Start-ups, mittelständischen Unternehmen, Konzernen und Forschungseinrichtungen. Sie sind in unterschiedlichen Branchen tätig und haben unterschiedliche Bezüge zu Industrie 4.0 und Systems Engineering.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über den Tätigkeitsbereich und den inhaltlichen Schwerpunkt der Fachleute. Die bestehende Expertise im Bereich Systems Engineering und der akademischen Forschung des Fraunhofer IEM ergänzt die Ergebnisse aus den Interviews. Dies wird zum Beispiel durch zahlreiche Vorarbeiten des Instituts deutlich.¹⁸

Weiterhin zeigt Abbildung 1 eine Deutschlandkarte, auf der die Arbeitsstätten der 18 Fachleute eingezeichnet sind. Die für die Befragung gewonnenen zwei Fachleute aus dem Ausland (Schweden, Vereinigte Staaten von Amerika) wurden oben gelistet.

Die Interviews wurden semistrukturiert durchgeführt und orientierten sich an einem Leitfaden. Dieser wurde nach einer Prästudie angepasst und durch eine interne Evaluation mit Fachleuten verfeinert. In der Befragung wurden die Themengebiete Megatrends, Marktleistung von morgen, Industrie 4.0, Produktionssystementwicklung, Systems Engineering, Verifikation und Validierung, Business Systems Engineering, durchgängiges Engineering und Transfer aufgegriffen. Darauf aufbauend wurde mit den Fachleuten diskutiert, wie autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systeme definiert werden könnten und wie diese sich von anderen Systemen abgrenzen. Außerdem wurden Best Practices besprochen sowie weiterer Forschungsbedarf abgeleitet. Der Leitfaden deckt somit die Kernfragen der Zielsetzung ab (siehe Kapitel 2).

Grundlage für die Interviews waren die Richtlinien für die Durchführung von qualitativen Interviews mit Fachleuten. Jedes Interview dauerte 90 Minuten. In jedem Interview waren mindestens drei Personen anwesend. Ein bis zwei Personen moderierten das Interview und eine weitere Person notierte währenddessen die zentralen Aussagen. Zudem erfolgten Aufzeichnung und Transkription, was im Nachgang eine umfangreiche Auswertung und

Tabelle 1: Vorgehen der Expertise in sechs Schritten

	Vorgehensweise	Umsetzung
Datenerhebung	1. Identifikation des Forschungsproblems	Erhebung Status quo/Systematische Literaturrecherche
	2. Definition des Lösungsansatzes	Definition von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen und Identifikation deren Engineerings
	3. Gestaltung und Entwicklung	Entwicklung des Interviewleitfadens/Auswahl der Fachleute/Durchführung einer Prästudie
	4. Demonstration	Befragung der Fachleute
Datenanalyse	5. Evaluierung	Laufende interne Evaluierung/Diskussion mit weiteren Fachleuten
	6. Kommunikation	Dissemination der Ergebnisse in Wirtschaft, Politik und Wissenschaft

Quelle: eigene Darstellung

¹⁶ Vgl. Kitchenham und Charters 2007.

¹⁷ Vgl. Mayring 2014.

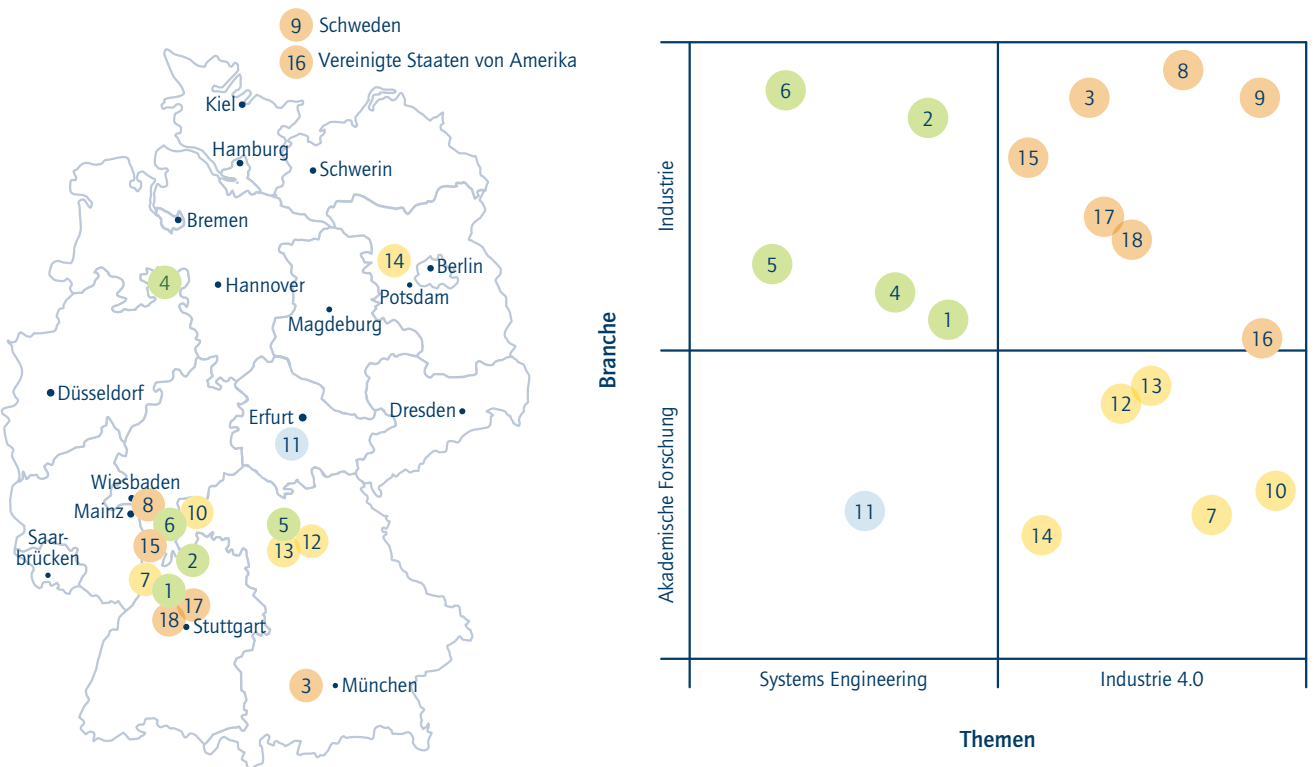
¹⁸ Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

Tabelle 2: Befragte Fachleute (anonymisiert)

Position	Unternehmen/ Organisation	Bezug zu Industrie 4.0/ Inhaltliche Schwerpunkte
Senior Engineer	Konzern (Werkzeugmaschinenbau)	Systems Engineering
Bereichsleitung Engineering	Konzern (Medizintechnik)	Simulation
Referent Prozesstechnik	Konzern (Automotive)	Wandelbarkeit
Geschäftsführung	Mittelstand (Werkzeugmaschinenbau)	Prozessautomation
Bereichsleitung Engineering	Verband	Systems Engineering
Bereichsleitung Engineering	Konzern (Agrarwirtschaft)	Systems Engineering
Institutsleitung	Forschungseinrichtung	Industrie 4.0 allgemein
Senior Engineer	Konzern (Werkzeugmaschinenbau)	Industrie 4.0 allgemein
Bereichsleitung Production Engineering	Konzern (Lebensmitteltechnik)	Automatisierung
Institutsleitung	Forschungseinrichtung	Industrie 4.0 allgemein
Institutsleitung	Forschungseinrichtung	Industrie 4.0 allgemein
Geschäftsführung	Forschungseinrichtung	Simulation
Leitung Technologiefeld	Forschungseinrichtung	Planung und Simulation
Institutsleitung	Forschungseinrichtung	Wandelbarkeit
COO	Mittelstand (Werkzeugmaschinenbau)	Autonomie/Automatisierung
CTO/Technische Leitung	Start-up (Werkzeugmaschinenbau)	Simulation
Bereichsleitung Production Engineering	Konzern (Automotive)	Industrie 4.0 allgemein
Bereichsleitung Production Engineering	Konzern (Automotive)	Industrie 4.0 allgemein

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 1: Regionale Verteilung und Einordnung der Fachkenntnisse der Fachleute



Quelle: eigene Darstellung

Evaluation ermöglichte. Die Datenanalyse wurde nach Mayring¹⁹ durchgeführt. Während der Durchsicht der Interviewdaten wurden Codes zugeordnet. Dabei wurde ein iterativer Ansatz gewählt, bei dem der Code-Baum kontinuierlich überarbeitet wurde. Das For-

schungsteam überprüfte die zugewiesenen Codes und führte Gespräche mit weiteren Fachleuten zur Validierung der Hypothesen und Interpretation.

19 Vgl. Mayring 2014; Bikner-Ahsbals et al. 2015.

4. Grundlagen

Die zunehmende Vernetzung von Produktionssystemen im Rahmen von Industrie 4.0 ermöglicht Leistungssteigerungen in der Produktion und bei den Produkten. So kann beispielsweise die Produktion aufgrund der besseren Datenlage individueller gesteuert werden. Autonome Systeme kommen zum Einsatz, um eine hohe Präzision in Umgebungen zu ermöglichen, die für Menschen ungeeignet sind. Darüber hinaus haben zahlreiche Krisen (zum Beispiel COVID-19, Invasion der Ukraine, Blockade des Roten Meeres) Auswirkungen auf die Lieferketten und die Planungssicherheit in den Unternehmen. Um Produktionsengpässe und Stillstände zu vermeiden, ist Reaktionsfähigkeit und Wandelbarkeit in der Produktion gefragt.

Von dem kontinuierlichen Wandel der Produktionssysteme bleibt auch das Engineering dieser Systeme nicht unberührt. Dabei besteht die Herausforderung darin, die aktuelle und zukünftige Entwicklung von Produktionssystemen im Blick zu behalten, um das Engineering zukunftsfähig zu gestalten und weiterzuentwickeln. Deshalb wird in diesem Kapitel die folgende Forschungsfrage untersucht:

Frage 1 (Kapitel 4): Wie sind autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme definiert und welche Treiber und Anwendungsfelder bestehen für diese?

Um die Forschungsfrage zu beantworten, geht diese Expertise zunächst auf die Merkmale bestehender Produktionssysteme ein (Kapitel 4.1). Im Anschluss geht es um eine mögliche Ausprägung von zukünftigen Produktionssystemen, namentlich um autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme. Zu diesem Zweck wird zunächst der Begriff autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme definiert und von bestehenden Begriffen abgegrenzt. Dann werden die Merkmale autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme beschrieben (siehe Kapitel 4.2). Anschließend werden Unterschiede zwischen den bestehenden Produktionssystemen und autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen identifiziert (siehe Kapitel 4.3) sowie Treiber und Anwendungsfelder autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme aufgezeigt (siehe Kapitel 4.4). Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst (siehe Kapitel 4.5).

4.1. Produktionssysteme in Deutschland: Status Quo und zukünftige Merkmale

Die Bestandsaufnahme konzentriert sich auf die aktuelle Digitalisierung in der Produktion und allgemeine Unternehmens-Trends.

Die Digitalisierung wird in Deutschland vorangetrieben – auch im Mittelstand

Produktionssysteme werden in Deutschland zunehmend digitaler und automatisierter. Bereits 90 Prozent der Unternehmen in Deutschland nutzen Industrie 4.0-Anwendungen oder planen deren baldige Einführung.²⁰ Zudem nahm der Anteil derjenigen deutschen Unternehmen mit einer Größe ab 250 Beschäftigten zu, die Roboter im Unternehmen einsetzen. Im verarbeitenden Gewerbe waren es 2018 noch 26 Prozent. 2020 lag der Anteil bereits bei 31 Prozent.²¹ Außerdem haben große Unternehmen die Voraussetzungen dafür geschaffen, Daten in Zukunft besser nutzen zu können. Das Data-Economy-Readiness²²-Level ist von 51 Prozent im Jahr 2021 auf 77 Prozent im Jahr 2022 gestiegen. Ein „data economy ready“ Unternehmen ist in der Lage, Daten effizient zu nutzen und zu managen. Eine deutliche Steigerung, wenngleich auch nicht im selben Maße wie in den großen Unternehmen, zeigt sich auch bei den kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU). Hier gaben insgesamt 31 Prozent der befragten Unternehmen an, ihre Produktions- und Prozessdaten vollständig digital zu speichern.²³ Als Gründe, warum die Unternehmen die Datenpotenziale nicht noch stärker nutzen, gaben diese vor allem rechtliche Bedenken und eine Risikoabschätzung an.²⁴

Viele Unternehmen befinden sich im digitalen Transformationsprozess

Weltweit befinden sich viele Unternehmen in einem Transformationsprozess: 64 Prozent der Unternehmen gaben in einer Studie aus dem Jahr 2022 an, dass sie sich noch am Anfang der digitalen Transformation befinden. Dabei zeigte sich, dass aufgrund der aktuellen Krisen der Fokus der meisten Unternehmen darauf liegt, Resilienz, Flexibilität und Transparenz zu schaffen. 34 Prozent der befragten Unternehmen nannten diese Eigenschaften als die derzeit wichtigsten Themen. 27 Prozent der Unternehmen gaben Effizienzgewinne und Kostenreduktionen als bestimmende Themen an.²⁵

20 Vgl. Marko 2022; Statista 2023b.

21 Vgl. Statistisches Bundesamt 2021.

22 Mit dem Data-Economy-Readiness-Level wird der Status quo der deutschen Unternehmen in Bezug auf ihre Fähigkeit zur Teilnahme an der Datenökonomie dargestellt.

23 Vgl. Engels 2023a.

24 Vgl. Engels 2023b.

25 Vgl. Geissbauer et al. 2022.

International sieht eine Studie aus dem Jahr 2022 vor allem die Vereinigten Staaten von Amerika (USA) mit 25 Prozent als führend bei Industrie 4.0-Themen. Auch Deutschland wird mit 16 Prozent von einigen Befragten eine Führungsrolle zugeschrieben. China, Japan und Südkorea werden mit etwa 15 Prozent im Anschluss genannt.²⁶

Produktivitätsrückgang trotz steigender Digitalisierung im produzierenden Gewerbe

Der Einsatz von Industrie 4.0 und die damit einhergehende Digitalisierung ist in den letzten zehn Jahren weit vorangeschritten. Daher stellt sich die Frage, welche Auswirkung die Digitalisierung auf die Produktion tatsächlich hat. Die Arbeitsproduktivität, die als preisbereinigtes Bruttoinlandsprodukt je erwerbstätiger Person berechnet wird, hat sich in Deutschland zwischen 1991 und 2007 jährlich um 1,2 Prozent gesteigert. Im Jahr 2011 wurde wieder das Niveau von vor der Finanz- und Wirtschaftskrise in den Jahren 2007 und 2008 erreicht. Seitdem ist die Arbeitsproduktivität durchschnittlich um 0,2 Prozent pro Jahr gestiegen.²⁷ Der normierte Produktionsindex des produzierenden Gewerbes, der anhand der Veränderung des Produktionsvolumen und weiterer Daten errechnet wird,²⁸ ist in den letzten zehn Jahren kalender- und saisonbereinigt von 98,2 im September 2013 auf 94,2 im September 2023 gefallen.²⁹ Dieser deutliche Rückgang des Produktivitätswachstums trotz steigender Digitalisierung wird auch als Produktionsparadoxon bezeichnet. Es gibt verschiedene Theorien, dies zu erklären:³⁰

- Es ist überhaupt kein Produktivitätswachstum durch die Digitalisierung zu erwarten.
- Das mit der Digitalisierung verbundene Produktivitätswachstum ist vorhanden, aber gesamtwirtschaftlich nicht sichtbar.
- Der digitale Transformationsprozess ist in der Breite noch nicht weit genug fortgeschritten, um gesamtwirtschaftliche Effekte zu erzielen.

Die literaturbasierte Analyse der Merkmale von Produktionssystemen wurde im Rahmen dieser Expertise um die Meinungen der Fachleute ergänzt. Dabei ist festzustellen, dass sich die Meinungen der Fachleute mit vielen Aussagen überschneiden, die in aktuellen Studien zu finden sind. Es zeigt sich, dass die Produktionssysteme in der Industrie in ihrem Industrie 4.0-Reifegrad auseinandergehen: von manuell geprägten und verknüpften Anlagen bis zu digital durchgängigen Unternehmen.³¹ Dabei gibt es sowohl KMU als auch große Unternehmen als Vorreiter in der Digitalisierung innerhalb ihrer Produktion.

Digitalisierung kompensiert Fachkräftemangel und geringere durchschnittliche Arbeitszeit

Die Fachleute stellten die These auf, dass der geringe Gesamtzuwachs der Produktivitätszugewinne in der deutschen Wirtschaft aufgrund von Industrie 4.0-Maßnahmen auf eine sinkende durchschnittliche Wochenarbeitszeit und einen Nachwuchs- und Fachkräftemangel zurückzuführen ist.

Die durchschnittliche Wochenarbeitszeit aller Erwerbstätigen hat sich in Deutschland von 38,4 Stunden (1991) auf 34,7 Stunden (2022) reduziert.³² Dies wirkt sich auf die Arbeitsproduktivität in Deutschland aus. Während die Arbeitsproduktivität je erwerbstätige Person von 2011 bis 2022 einen durchschnittlichen Anstieg von 0,25 Prozent zeigt,³³ ist die Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigenstunde in Deutschland im Durchschnitt um 0,83 Prozent gestiegen.³⁴

Der Nachwuchs- oder Fachkräftemangel zeigt sich besonders deutlich in der Anzahl der offenen Stellen. Während im Jahr 2013 durchschnittlich 456.975 Stellen offen waren, waren es 2023 im Durchschnitt 768.138.³⁵ 76 Prozent der Unternehmen in Deutschland geben an, dass sie aufgrund von fehlendem Personal Produktivitätseinbußen verzeichnen.³⁶

These 1: Die Produktionssysteme verändern sich zunehmend in Richtung Digitalisierung. Die Digitalisierung kompensiert dabei die geringe Verfügbarkeit von Arbeitskräften auf dem Arbeitsmarkt, die vor allem durch den Nachwuchsmangel und die Reduzierung der durchschnittlichen Arbeitszeit entsteht.

26 Vgl. Marko 2022.

27 Im Januar 2011 lag der kalender- und saisonbereinigte Produktionsindex nach X 13 JDemetra+ bei 95,7 und bei 98,4 im Januar 2023 (Vgl. Statistisches Bundesamt 2023b)

28 Vgl. Statistisches Bundesamt 2023a.

29 Das Referenzjahr für den normierten Produktionsindex liegt bei 100 im Jahr 2015. Weitere Informationen unter: Vgl. Statistisches Bundesamt 2023b.

30 Vgl. Kuntze und Mai 2020.

31 Vgl. Schuh et al. 2017.

32 Vgl. Statistisches Bundesamt 2023c.

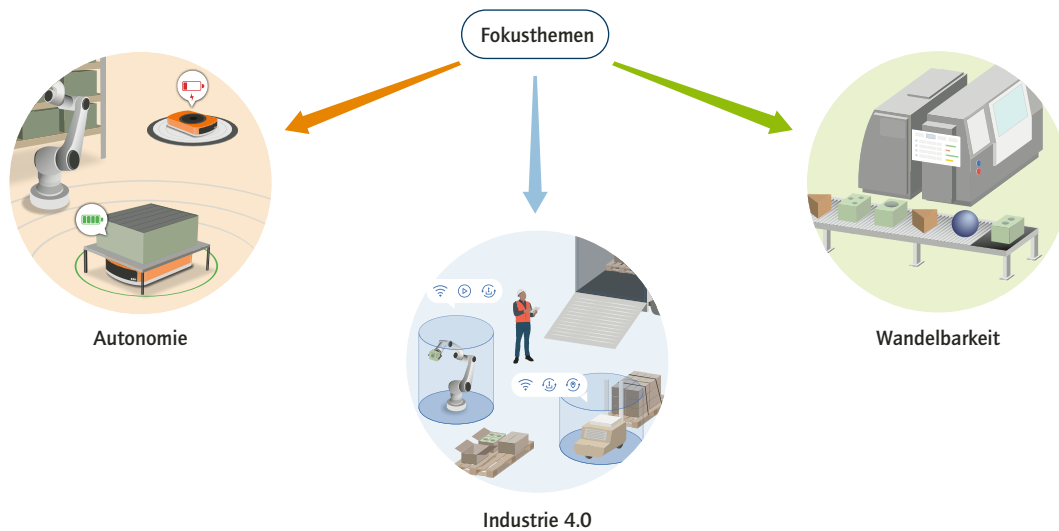
33 Der Index der Arbeitsproduktivität je erwerbstätige Person in Deutschland ist von 99,21 im Jahr 2011 auf 101,97 im Jahr 2022 gestiegen. Weitere Informationen unter: Vgl. Rudnicka 2023.

34 Der Index der Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigenstunde in Deutschland ist von 97,4 im Jahr 2011 auf 106,55 im Jahr 2022 gestiegen. Weitere Informationen unter: Vgl. Rudnicka 2024.

35 Vgl. Statista 2023a.

36 Vgl. Berger 2023.

Abbildung 2: Fokusthemen der Expertise (Autonomie, Wandelbarkeit und Industrie 4.0-Systeme)



Quelle: eigene Darstellung

4.2. Bausteine autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme

Der zunehmend höhere Digitalisierungsgrad in den Unternehmen macht neue Formen der Produktion möglich. Aufgrund der verbesserten Datenlage ist es möglich, sogenannte autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme zu entwerfen. Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, den Begriff autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme zu definieren und Merkmale dieser Systeme herauszuarbeiten. Dafür werden zunächst die drei Bestandteile autonom, wandelbar und Industrie 4.0-Systeme beschrieben. Eine Darstellung der drei unterschiedlichen Ausprägungsarten einer Produktion ist nachfolgend dargestellt (siehe Abbildung 2). Im Anschluss wird auf Basis der Interviews mit den Fachleuten der gesamte Begriff definiert. Abschließend werden in einem Fazit die gewonnenen Erkenntnisse zu autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen bewertet.

4.2.1. Definition autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme

Im Folgenden werden die Teilaspekte von Autonomie und Wandelbarkeit vorgestellt und die Idee des Verbunds als autonom wandelbares Industrie 4.0-System erläutert.

Autonomie

Das *Fachforum autonome Systeme* definiert Autonomie wie folgt:

[E]in System [ist] autonom [...], wenn es ohne menschliche Steuerung oder detaillierte Programmierung ein vorgegebenes Ziel selbstständig und an die Situation angepasst erreichen kann. Das System ist fähig, die Umgebung über Sensoren wahrzunehmen, proaktiv und situationsgerecht einen angemessenen Handlungsplan zu generieren und über Aktoren sicher und zuverlässig auszuführen.³⁷

Nach Pfeifer und Schmidt lassen sich drei Teilaspekte der Autonomie feststellen: Erstens wurde der Funktionsumfang der Produktionsanlage erweitert. Das versetzt sie in die Lage, Prozessplanung, -überwachung und -regelung selbstständig zu übernehmen (Integration von Teilfunktionalitäten). Zweitens stehen der Person, die die Anlage bedient, maßgeschneiderte Informationen und Assistenzfunktionen zur Planung und Überwachung zur Verfügung. Das reduziert die Menge an Routineaufgaben (optimierte Unterstützung der Nutzenden). Und drittens kann die Anlage selbstständig auf Störungen reagieren und diese beheben (Störungstoleranz).³⁸

37 Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

38 Vgl. Hermes et al. 2006.

Das Produktionssystem führt als selbstregulierende Einheit alle operativen Sequenzen eigenständig sowie mit hoher Resilienz gegenüber Störungen aus und unterstützt gleichzeitig die Nutzenden in den Arbeitsschritten. Die autonome Fertigungszelle integriert unterschiedliche Operationen und Funktionen: die Konzeption und Ausführung von Planungs- und Steuerungsprozessen, Manipulationsvorgänge wie Greifen und Spannen, das Schnittstellenmanagement für die Nutzenden sowie die Überwachung und Behebung von Fehlfunktionen. Um die autonome Bedienbarkeit des Systems zu erhöhen, ist dabei eine stärkere Integration der Nutzenden in den Planungskontext, verbunden mit einer präzisen Definition ihrer Rolle, unabdingbar.³⁹

Wandelbarkeit

Wandelbarkeit oder Wandlungsfähigkeit wird als „das Vermögen, den Arbeitspunkt der Produktion mit geringem Ressourcenaufwand innerhalb kurzer Zeit neu einstellen zu können“ beschrieben.⁴⁰ Flexibilität wird in der Literatur häufig synonym zum Begriff Wandelbarkeit genannt. Während Flexibilität in dieser Expertise als vordefinierte Fähigkeit mit reaktiver Anpassung an sich ändernde Produktionsbedingungen definiert wird, ist Wandlungsfähigkeit eine taktische Fähigkeit mit reaktiver und proaktiver Anpassung der Fabrik.⁴¹

In der Literatur werden fünf Schlüsselkompetenzen für Wandlungsfähigkeit genannt⁴²:

- **Universalität:** Das System kann für unterschiedliche Aufgaben hinsichtlich des Produkts und der Technologie eingesetzt werden (zum Beispiel Variantenflexibilität).
- **Mobilität:** Das System kann Objekte flexibel positionieren und bewegen (zum Beispiel Maschinen auf Rollen).
- **Skalierbarkeit:** Das System ist in technischer, personeller und räumlicher Dimension erweiterbar und reduzierbar (zum Beispiel ein flexibles Arbeitszeitmodell).
- **Modularität:** Das System ist auf Basis von standardisierten Systemen austauschbar (zum Beispiel Plug-and-Produce-Module).
- **Kompatibilität:** Die Systeme sind vernetzungsfähig (zum Beispiel einheitliche Softwareschnittstellen).

Abschließend stellt sich die Frage: Wie verhalten sich Autonomie und Wandelbarkeit zueinander? Wandelbarkeit und Autonomie sind in der Fabrikplanung zwei Schlüsselkonzepte, die sowohl Synergien heben als auch zu Spannungen führen können.

Synergie: Autonome Systeme können zur Wandelbarkeit beitragen, indem sie schnell und selbstständig auf Veränderungen reagieren. Sie fördern eine flexible und dezentrale Steuerung von Produktionsprozessen, was die Wandelbarkeit der Fabrik insgesamt erhöht.

Spannungsfeld: Ein hohes Maß an Autonomie kann aber auch Herausforderungen mit sich bringen, wenn die einzelnen autonomen Einheiten nicht ausreichend koordiniert sind und dadurch die gesamte Wandelbarkeit der Fabrik beeinträchtigt wird.

Hier eine Balance zu finden, ist eine wichtige Aufgabe in der Fabrikplanung. Daher muss sichergestellt werden, dass autonome Systeme und Einheiten integriert und koordiniert werden, um die Wandelbarkeit der Fabrik zu unterstützen.

Industrie 4.0

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) definiert den Begriff Industrie 4.0 folgendermaßen:

Industrie 4.0 ist ein Metabegriff für die Weiterentwicklung der Produktions- und Wertschöpfungssysteme durch die Verknüpfung der realen und der digitalen Welt. Diese Verknüpfung entsteht durch sich selbststeuernde [cyberphysische Systeme] CPS, die mit eingebetteten Systemen ausgestattet sind. Industrie 4.0 beschreibt die vertikale (innerhalb eines Unternehmens) und die horizontale Verknüpfung dieser CPS (sowohl über mehrere Unternehmensbereiche als auch über mehrere Unternehmen entlang der Supply Chain hinweg) zur effizienten, dezentral organisierten und flexiblen Produktion von Erzeugnissen oder Durchführung von Dienstleistungen.⁴³



Für mich ist Industrie 4.0 der Einsatz aller technologischen Möglichkeiten, die wir heute haben. Wir sollten sie mit Augenmaß und vor allem dort einsetzen, wo andere Lösungen nicht ausreichen.

In Abgrenzung zum Begriff Industrie 4.0 werden die Digitale Fabrik, die Smart Factory und der Digitale Zwilling beschrieben (siehe Tabelle 3). Weitere Begriffsdefinitionen in diesem Kontext sind bei Bracht et al.⁴⁴ zu finden:

39 Vgl. Schumacher und Bauer 2023.

40 Vgl. Demeester et al. 2011.

41 Vgl. Grundig 2021.

42 Vgl. Wiendahl et al. 2014; Nyhuis et al. 2007.

43 Vgl. Bischoff et al. 2015. Die Ausführungen im Text werden zusätzlich durch Zitate der Fachleute aus den Interviews verdeutlicht.

44 Vgl. Bracht et al. 2018.

Tabelle 3: Definition und Abgrenzung der Begriffe Digitale Fabrik, Smart Factory und Digitaler Zwilling

	Definition	Abgrenzung zu Industrie 4.0
Digitale Fabrik	Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.	Bei der Industrie 4.0 geht es nicht nur um die Optimierung und Digitalisierung der Produktionsprozesse in einer einzelnen Fabrik, sondern um die Digitalisierung und Vernetzung aller Stufen der Wertschöpfungskette (Beschaffung, Produktion, Logistik, Vertrieb).
Smart Factory	Ein wichtiges Element von Industrie 4.0 ist die intelligente Fabrik (Smart Factory). Die Smart Factory beherrscht Komplexität, ist weniger störanfällig und steigert die Effizienz in der Produktion. In der Smart Factory kommunizieren Menschen, Maschinen und Ressourcen so selbstverständlich wie in einem sozialen Netzwerk. Ein wichtiges Element von Industrie 4.0 ist die intelligente Fabrik (Smart Factory). Die Smart Factory beherrscht Komplexität, ist weniger störanfällig und steigert die Effizienz in der Produktion.	Eine Smart Factory ist eine konkrete physische Umsetzung der Industrie-4.0-Prinzipien auf Fabrikebene.
Digitaler (Fabrik-) Zwilling	Virtuelle Repräsentation mit Echtzeitdaten zur Simulation und Optimierung von der realen Fabrik.	Der digitale Fabrikzwilling ist ein Werkzeug oder eine Anwendung, die im Rahmen von Industrie 4.0 eingesetzt werden kann, um das Zielbild der Produktion zu erreichen.

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an VDI-Richtlinie VDI4499-1; Kagermann et al. 2013; Bauernhansl et al. 2016

Begriffsverständnis von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen

Der Begriff autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme bezieht sich auf Produktions- und Fertigungssysteme, die in der Lage sind, sich selbstständig an neue Bedingungen anzupassen und Veränderungen vorzunehmen. Dies umfasst die automatisierte und situationsgerechte Anpassung des Produktionssystems ohne menschliches Eingreifen sowie die Anpassung des Produkts oder der Produktfamilie, um diese besser produzieren zu können. Der Einsatz von KI dient dazu, Daten zu analysieren, Zustände vorherzusagen und Entscheidungen zu fundieren.



Die logische Konsequenz aus dem, was Industrie 4.0 ermöglicht, ist also der Einsatz von Industrie 4.0-Technologien, um eben ein System aufzubauen, das sich selbstständig auf neue Herausforderungen einstellen kann.

Die Hälfte der befragten Fachleute betonte, dass autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme, also die selbstständige Anpassung der Systeme an neue Herausforderungen, eine logische Folge der bereits bekannten Potenziale von Industrie 4.0 seien. Sie sehen Autonomie und Wandelbarkeit als Teil des bestehenden Industrie 4.0-Konzepts. Aus den Gesprächen mit den Fachleuten ging jedoch auch deutlich hervor, dass verschiedene Bereiche unter-

schiedlich zu betrachten sind: Im Mittelstand beispielsweise steht die Wirtschaftlichkeit der Prozesse von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen im Vordergrund. In der Lebensmittelindustrie sind hohe Stückzahlen über einen langen Lebenszyklus relevant.

Die befragten Fachleute wiesen konkret darauf hin, dass weitere Forschung in verschiedenen Disziplinen notwendig ist, um vollständig autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme einzusetzen. Weiterhin sind die Umsetzbarkeit und der geplante Zeitrahmen bis zur Realisierung und Etablierung von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen noch Gegenstand der Forschung.

4.2.2. Merkmale autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme

Industrie 4.0-Systeme gibt es in unterschiedlichen Ausprägungen. Um das Engineering von diesen Systemen und die damit verbundenen komplexen Zusammenhänge abzubilden, wird deshalb im Folgenden auf die jeweiligen Ausprägungen eingegangen. Eine Übersicht zu den Entwicklungsstufen von Autonomie, Wandelbarkeit und Industrie 4.0 wurde auf Basis einer Literaturrecherche erstellt und ist nachfolgend dargestellt (siehe Tabelle 4). Diese sind nebeneinander aufgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass es darüber hinaus zahlreiche weitere Klassifizierungsansätze, etwa zu den Begriffen Autonomie⁴⁵ oder Industrie 4.0⁴⁶ gibt, auf die diese Expertise jedoch nicht näher eingeht.

45 Vgl. Beyerer et al. 2021.

46 Vgl. BMBF 2016; Neugebauer et al. 2016.

Tabelle 4: Stufen von Autonomie, Wandelbarkeit und Industrie 4.0

Stufen	Autonomie	Wandelbarkeit	Industrie 4.0
0	Keine Autonomie , Mensch hat volle Kontrolle ohne Assistenz.		
1	Assistenz bei ausgewählten Funktionen , Mensch ist stets verantwortlich und trifft alle Entscheidungen.	Umrüstbarkeit: Fähigkeit einer Maschine oder eines Arbeitsplatzes, zu jedem gewünschten Zeitpunkt mit minimalem Aufwand und in kürzester Zeit spezifische Arbeitsoperationen an bekannten Werkstücken oder Baugruppen durchzuführen.	Datenerfassung und -verarbeitung (zum Beispiel durch Sensoren oder RFID-Chips)
2	Zeitweise Autonomie in klar definierten Bereichen, Mensch ist stets verantwortlich und gibt (Teil-) Ziele vor.	Flexibilität: Fähigkeit sich reaktiv auf eine vorab definierte Anzahl von Werkstücktypen durch Hinzufügen oder Wegnahme einzelner Funktionselemente in kurzer Zeit mit geringem Aufwand umstellen zu können	Assistenzsysteme (zum Beispiel Augmented Reality)
3	Abgegrenzte Autonomie in größeren Teilbereichen, System warnt bei Problemen, Mensch bestätigt Lösungsvorschläge des Systems bzw. fungiert als Rückfallebene	Rekonfigurierbarkeit: Fähigkeit eines ganzen Produktionsbereichs, sich auf eine neue ähnliche Komponente durch Veränderung der Fertigungsverfahren, Materialflüsse etc. in mittlerer Zeit und mittlerem Aufwand umzustellen.	Vernetzung und Integration (zum Beispiel cyber-physische Systeme oder vernetzte Geräte)
4	Das System arbeitet autonom und adaptiv in bestimmten Systemgrenzen, Mensch kann überwachen oder in Notfallsituationen agieren	Wandelbarkeit: Fähigkeit einer ganzen Fabrik sich auf ähnliche Produktfamilien reaktiv oder vorausschauend umzustellen und Produktionskapazitäten durch strukturelle Eingriffe in das Produktions- und Logistiksystem anzupassen.	Dezentralisierung und Serviceorientierung (zum Beispiel modulare oder skalierbare Systeme)
5	Autonomer Betrieb in allen Bereichen , auch in Kooperation und in sich ändernden Systemgrenzen, Mensch kann abwesend sein.		Selbstorganisation und Autonomie (zum Beispiel Selbstkonfiguration und Optimierung oder maschinelles Lernen)

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020; Wiendahl 2009; Wiendahl et al. 2014; Schuh et al. 2017

4.3. Unterschiede zwischen bestehenden Produktionssystemen und autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen

Im Rahmen der Expertise wurden die Fachleute zu Merkmalen bestehender Produktionssysteme, die auch zukünftig eine bedeutende Rolle spielen werden und zukünftigen Anforderungen befragt (siehe Abbildung 3). Die bestehenden Produktionssysteme in Deutschland zeichnen sich den Fachleuten zufolge durch folgende Merkmale aus: Sie ermöglichen eine durchgängige Simulation und ein virtuelles Abbild der Produktionsprozesse. So können Unternehmen die Auswirkungen der Systeme im Vorhinein testen. Zudem sind die Maschinen intelligent miteinander vernetzt, was die Kommunikation und Koordination zwischen den verschiedenen Produktionsstufen erleichtert. Diese Vernetzung der Maschinen erfolgt jedoch in der Regel noch manuell, was mit einem gewissen personellen Aufwand verbunden ist. Des Weiteren sind bestehende Produktionssysteme oft durch sehr spezifische Produktionsmaschinen gekennzeichnet, die für bestimmte Aufgaben optimiert sind. Die Produktionsanlagen folgen in der Regel einem sequenziellen, konventionellen und wasserfallartigen Ansatz, bei dem die Produktionsschritte nacheinander abgearbeitet werden.

Im Gegensatz dazu weisen autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme den Fachleuten zufolge eine Reihe spezifischer Merkmale auf. Ein erstes wichtiges Merkmal ist ihre Selbstauskunftsfähigkeit, auch Self-X-Fähigkeit genannt. Diese ermöglicht den Systemen, sich selbst zu überwachen und eigenständig Informationen über ihren Zustand und ihre Leistung zu generieren. So können sie frühzeitig auf Abweichungen reagieren und proaktiv Anpassungen vornehmen. Zudem sind Industrie 4.0-Systeme flexibel und wandelbar. Sie können Innovationen nahezu in Echtzeit in die Produktion integrieren und sich an wechselnde Anforderungen und Marktbedingungen anpassen. Dies führt zu einer erhöhten Effizienz und Autonomie der Systeme. Ein weiteres Merkmal ist, dass ausgewählte Segmente der Fabrik autonom betrieben werden können. Dies ermöglicht eine dezentrale und flexiblere Produktion. Darüber hinaus zeichnen sich autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme durch Mobilität, Interoperabilität, Skalierbarkeit, Modularität und Universalität aus. Dies ermöglicht eine einfache Integration und Zusammenarbeit verschiedener Systeme sowie die Skalierung der Produktion je nach Bedarf.

Abbildung 3: Merkmale und zukünftige Anforderungen von Produktionssystemen (vgl. eigene Befragung von 18 Fachleuten)

	Produktionssysteme	
	Aktuelle Merkmale	Zukünftige Merkmale
Prognosefähigkeit		<ul style="list-style-type: none"> • Ausgewählte Segmente der Fabrik können autonom betrieben werden • Flexibilität und Wandlungsfähigkeit („Innovation quasi in Nullzeit in die Produktion einpflegen“)
Transparenz	<ul style="list-style-type: none"> • Intelligente miteinander vernetzte Maschinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehr Effizienz und Autonomie • Selbstauskunftsfähigkeit, Self-X-Fähigkeit
Sichtbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgängige Simulation und virtuelles Abbild 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilität, Interoperabilität, Skalierbarkeit, Modularität, Universalität
Konnektivität	<ul style="list-style-type: none"> • Verknüpfung von Maschinen durch manuellen Eingriff • Sehr spezifische Produktionsmaschinen • Sequenziell/konventionell/wasserfallartige Produktionsanlagen 	

Quelle: eigene Darstellung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bestehende Produktionssysteme vor allem auf Simulation, Vernetzung und spezifischen Maschinen basieren, während autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme durch Selbstauskunftsfähigkeit, Flexibilität und Autonomie sowie eine erhöhte Modularität und Universalität gekennzeichnet sind.

4.4. Treiber und Anwendungsfelder autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme

Nachdem bereits eine Definition, Merkmale und Unterschiede zwischen bestehenden und autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen identifiziert wurden, zielt dieses Kapitel auf die Anwendung in der Praxis ab. In welchem Marktumfeld kann ein Einsatz dieser Systeme sinnvoll sein? Um diese Frage zu beantworten, werden die Treiber autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme beschrieben (siehe Kapitel 4.4.1). Anschließend werden Anwendungsfelder aus bestimmten Industriebereichen thematisiert (siehe Kapitel 4.4.2).

4.4.1. Treiber

Was bewegt Unternehmen dazu, autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme einsetzen zu wollen und vor allem, in welchen Anwendungsbereichen erfolgt der Einsatz? Die Merkmale Autonomie und Wandelbarkeit werden von verschiedenen externen sowie internen Treibern begünstigt.⁴⁷



Ohne Turbulenzen ist Wandlungsfähigkeit einfach nur teuer.

Turbulentes Umfeld und unsichere Wertschöpfungsprozesse:

In Zeiten großer Veränderungen, von konjunkturellen Schwankungen, Lieferkettenproblemen, globalen Krisen oder politischen Umwälzungen besteht ein erhöhter Bedarf, Risiken zu minimieren und auf unvorhersehbare Ereignisse reagieren zu können. Diverse Unsicherheiten und Risiken können die gesamte Wertschöpfungskette beeinflussen, darunter Schwankungen in der Nachfrage, Engpässe von Rohstoffen, Qualitätsprobleme, politische Instabilität oder unvorhergesehene externe Ereignisse wie Naturkatastrophen oder globale Gesundheitskrisen. Unternehmen stehen daher vor der Herausforderung, ihre Wertschöpfungsprozesse widerstandsfähiger und anpassungsfähiger zu gestalten, um auch unter unsicheren Umständen erfolgreich zu agieren.

Individualisierung und Komplexität: Seit geraumer Zeit ist ein Wandel hin zur On-Demand-Fertigung und kundenspezifischen Einmüllösungen zu beobachten. Die wachsende Nachfrage nach einer Individualisierung der Produkte geht dabei nicht selten mit steigender Produktkomplexität einher.

Effizienz: Unternehmen streben nach höherer Produktivität, geringeren Kosten und kürzeren Durchlaufzeiten. Die Kombination von Wandelbarkeit und Autonomie ermöglicht, Prozesse schneller anzupassen, auf Veränderungen zu reagieren und gleichzeitig die Effizienz zu steigern. Durch die Autonomisierung von Aufgaben und die kontinuierliche Überwachung können Ressourcen optimal genutzt werden, was zu höherer Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit führt.

47 Vgl. Dombrowski und Krenkel 2021.



Wir haben die Herausforderung, Produktinnovationen quasi in Nullzeit ins Produkt zu bringen. Das geht gut über Software-Updates, muss aber auch in der Hardware passieren.

Neue Produkttechnologien: Die enormen Fortschritte in Bereichen wie der KI, der Robotik, dem maschinellen Lernen und dem Internet der Dinge veranlassen Unternehmen dazu, in innovative Technologien zu investieren, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.



Den Markt extrem schnell bedienen zu können, ist für uns genau die Motivation für schnelle Neuerungen.

Wettbewerbsvorteil: In einer globalisierten Wirtschaft müssen Unternehmen flexibler, effizienter und innovativer sein, um in einem intensiven Wettbewerbsumfeld zu bestehen. Unternehmen, die sich schnell an veränderte Bedingungen anpassen, erlangen einen Wettbewerbsvorteil. Sie sind in der Lage, Marktlücken zu nutzen und sich von der Konkurrenz abzuheben.

Nachhaltigkeit: Die Fähigkeit, Prozesse und Produktion umweltfreundlicher und nachhaltiger zu gestalten, bietet Unternehmen zahlreiche Vorteile. Mithilfe eines wandelbaren Produktionssystems können nachhaltige Praktiken leichter implementiert, die Effizienz gesteigert und Emissionen vermieden werden. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an sich ändernde Produktionsanforderungen. Ressourcen können effizienter genutzt werden, da das System bei Bedarf umkonfiguriert werden kann. Ungenutzte Kapazitäten müssen nicht vorgehalten werden. So kann die Produktion an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden, was Überproduktion und damit Ressourcenverschwendung minimiert.

4.4.2. Anwendungsfelder

Anwendungsfelder ergeben sich somit insbesondere in Industrien, in denen eine hohe Reaktionsschnelligkeit vonnöten ist, um in turbulenten Situationen weiterhin erfolgreiche und wettbewerbsfähige Produkte herzustellen. Branchen, die beispielsweise von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen profitieren, sind die Logistik, die Batterietechnologie, die Medizintechnik sowie die industrielle Produktion.

4.4.2.1. Logistik

Die Logistik vereint klassische Funktionen wie Lagerung, Transport und Verpackung. Mit technologischem Fortschritt und sich dynamisch ändernden Situationen rücken zusätzlich Konzeptions-, Koordinations- und Planungsaufgaben in den Fokus der Logistik.

Absicherung der Lieferkette

Sichere Lieferketten sind essenziell, da Unternehmen auf eine zuverlässige und pünktliche Belieferung angewiesen sind, um ihren Betrieb reibungslos aufrechtzuerhalten. Die Nachfrage kann sich schnell ändern und Unternehmen müssen in der Lage sein, flexibel auf diese dynamischen Schwankungen zu reagieren. Autonome wandelbare Industrie 4.0-Systeme ermöglichen es, die Lieferkette in Echtzeit zu überwachen und Engpässe oder andere Probleme frühzeitig zu erkennen. Das erhöht Transparenz und Nachverfolgbarkeit in der gesamten Lieferkette. Zudem minimiert es Risiken wie Unterbrechungen.⁴⁸

Unterstützung bei Planungsprozessen

Der Einsatz von innovativen Technologien wie KI birgt Verbesserungspotenziale im Bereich der Lagerlogistik und den zugehörigen Planungsprozessen. KI kann dazu beitragen, Lagerprozesse zu optimieren, die Bestandsverwaltung zu verbessern und die Auftragsabwicklungen kundenfreundlicher zu gestalten. Mithilfe intelligenter Algorithmen und maschinellem Lernen lassen sich Lagerbestände prognostizieren und anpassen, was zu geringeren Lagerkosten und weniger Überbeständen führt. Darüber hinaus ermöglicht KI die Echtzeitüberwachung und -verfolgung von Produkten im Lager, was zu kürzeren Lieferzeiten und einer insgesamt reibungsloseren Logistikabwicklung beiträgt.⁴⁹ Voraussetzung hierfür ist den befragten Fachleuten zufolge ein hoher Standardisierungsgrad, also einheitliche Prozesse, Datenmodelle, IT-Plattformen und einheitliche Softwarelösungen, die die Erfassung der Daten über den gesamten Produktlebenszyklus in Form eines digitalen Zwillings ermöglichen.⁵⁰

Neues Mobilitätskonzept in der Logistik

Fachleute am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) erforschen bereits, wie durch autonome Antriebskomponenten neue Verkehrs- und Mobilitätsdienste ermöglicht werden können. Das sogenannte U-Shift soll dabei das nächste Level an Automation erreichen und Schlüsselemente des Managed Automated Driving vereinen. Potenzielle Anwendungsbeispiele dafür sind die autonome, elektromobile Nachtbelieferung, autonome Intra-Logistik und barrierefreie Personentransporte.⁵¹

48 Vgl. Lochmahr und Ewig 2023.

49 Vgl. Lochmahr und Ewig 2023.

50 Vgl. Lochmahr und Ewig 2023.

51 Vgl. Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR) 2020.

4.4.2.2. Batterietechnik

Der Batterieindustrie kommt im Zuge der voranschreitenden Elektromobilisierung eine wesentlich höhere Bedeutung zu. Dabei bringen sowohl die Batteriezellfertigung als auch das Recycling von Batteriezellen diverse technische Herausforderungen mit sich.

Batteriezellfertigung

Derzeit werden insbesondere in der Automobilindustrie vorwiegend Lithium-Ionen-Batterien gefertigt und eingesetzt. Mit fortschreitender Forschung zur und Nutzung der Elektromobilität ergeben sich neben innovativen Technologien auch vielfältige neuartige Anforderungen.

Die Batteriezeile selbst aber auch die Fertigung zeichnen sich durch ein komplexes Zusammenspiel von Prozessen, Anlagen und Strukturen der einzelnen Zwischenprodukte aus. Bereits heute haben die Fertigungsprozesse einen sehr hohen Automatisierungsgrad. Das gewährleistet hohe Qualität und geringe Fehleranfälligkeit. Dennoch stellt der hohe Grad an Komplexität die Industrie und Forschung im Hinblick auf Prozessstabilität, Effizienz, Leistungsfähigkeit und Nachverfolgbarkeit vor zahlreiche Herausforderungen.⁵²

Fachleute in der Forschung sehen großes Potenzial in der Implementierung eines Digitalen Zwilling in der Batteriezellfertigung. Im Laufe der Batteriezellproduktion fallen kontinuierlich große Mengen an Daten an. Der digitale Zwilling der Batteriezellfertigung führt Daten wie die digitalen Anlagen-, die Produkt- und die Gebäudezwillinge zusammen. Standardisierte Schnittstellen ermöglichen einen übergreifenden Daten- und Informationsaustausch. Diese Daten lassen sich gewinnbringend zur Analyse und Optimierung der Systeme auswerten.⁵³

Neben der klassischen Lithium-Ionen-Technologie wird kontinuierlich an weiteren noch effizienteren Batterietechnologien geforscht. Die Produktion muss demnach auf die permanenten Weiterentwicklungen und Optimierungen reagieren können. Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) sieht die Gestaltung von modularen Fertigungsstationen, flexiblen Anlagen sowie die Verfügbarkeit von geschulten Fachkräften als wesentliche Voraussetzungen dafür, auf variierende Produktdesigns reagieren zu können.⁵⁴

Demontage und Recycling

Je mehr Hersteller von Batteriezellen auf dem Markt tätig sind, umso mehr nimmt auch die Anzahl an unterschiedlichen Batteriesystemen zu. Am Ende des Batteriezyklus im Fahrzeug werden diese ausgemustert und in die Verwertung gegeben. Die Ver-

wertung selbst gliedert sich in verschiedene Prozessschritte, bei der die Demontage der ausrangierten Batteriezellen eine zentrale Stellung einnimmt. Die große Anzahl unterschiedlicher Batterien führt dazu, dass die Systeme derzeit lediglich durch manuelle Arbeit zerlegt werden können. Mit autonom wandelbaren Systemen lassen sich diese Herausforderungen bewältigen und die einzelnen Prozessschritte effizienter gestalten.⁵⁵

4.4.2.3. Industrielle Produktion

Die industrielle Produktion zeichnet sich durch stetig zunehmende Digitalisierung und Vernetzung der Systeme aus. Obwohl Digitalisierung und Vernetzung in der Industrie bisher noch nicht in der Breite angekommen sind, zeigt sich bereits jetzt, dass beides zu höheren Graden an Autonomie und Wandelbarkeit führt. Das Tempo der Entwicklung bringt eine gesteigerte Dynamik mit sich. Denn jede technologische Innovation oder Weiterentwicklung erfordert eine entsprechende Anpassung der industriellen Produktion, um flexibler und interoperabler zu werden.

Skalierbarkeit der industriellen Produktion

Ein durchgängig hoher digitaler Vernetzungsgrad konnte bisher trotz intensiver Investitionen in die Digitalisierung in der Industrie noch nicht erreicht werden. Das Ziel der ganzheitlichen digitalen Vernetzung von Produktionsanlagen und Maschinen ist es, eine nahtlose Kommunikation und Koordination innerhalb des Produktionssystems und über dessen Grenzen hinaus. Dies ermöglicht eine interdisziplinäre und reibungslose Zusammenarbeit und einen besseren Datenaustausch, was zu einer effizienteren Ressourcennutzung führt. Durch die Analyse und Auswertung von Echtzeitdaten können Unternehmen fundierte Entscheidungen treffen, um Prozesse zu optimieren.⁵⁶

Ein turbulentes Umfeld bestehend aus dynamischen Marktveränderungen und Nachfrageschwankungen stellt einen elementaren Treiber für die Weiterentwicklung eines Systems dar. Intelligente Steuerungssysteme ermöglichen es, die Produktion schnell und flexibel an Bedarfsschwankungen anzupassen und so resilienter zu werden.

Verbesserung und Leistungssteigerung

Vermeint setzen Unternehmen bereits auf den Einsatz eines digitalen Zwilling. Dabei handelt es sich um eine digitale Simulation der Prozesse, die mit Echtzeitdaten der Maschinen und Anlagen versorgt wird. Auf diese Weise können Unternehmen vorausschauende Strategien wie Predictive Maintenance verfolgen: Eine frühzeitige Problemerkennung führt zu einer besseren Wartungsplanung und reduzierten Ausfallzeiten.⁵⁷

52 Vgl. VDMA Batterieproduktion 2023.

53 Vgl. Krauß et al. 2023; VDMA Batterieproduktion 2023.

54 Vgl. VDMA Batterieproduktion 2023.

55 Vgl. PEM RWTH Aachen 2023.

56 Vgl. Dumitrescu et al. 2018.

57 Vgl. Bracht et al. 2018.

Gerade auf dem Weg zur nachhaltigen Produktion bieten diese Ansätze zur Verbesserung und Leistungssteigerung der Wertschöpfung elementare Vorteile. Prozesse werden stabiler, Nacharbeit und Ausschuss reduzieren sich und langfristig erhöht sich der Wirkungsgrad der Produktion.

4.4.2.4. Gesundheit

Auch in der Gesundheitsbranche gibt es großes Potenzial für den Einsatz autonom wandelbarer Systeme. Die möglichen Anwendungsfelder reichen von der vergleichsweise simplen Produktion von Pflastern über die Produktion von Pharmazeutika bis hin zur Herstellung von künstlichen Organen und Geweben. Im Bereich medizinischer Produkte wird kontinuierlich an effizienteren, wirksameren und sichereren Lösungen gearbeitet, um den Menschen eine bestmögliche Versorgung zu bieten. Von der Anwendung autonomer wandelbarer Systeme in der Medizin verspricht man sich eine höhere Sicherheit für Patientinnen und Patienten sowie eine effizientere Entwicklung und Dokumentation.



Es muss gelingen, fernab von Baukastensystemen mit standardisierten Komponenten individuelle Lösungen für Patienten zu schaffen.

Personalisierte Medizin

In der personalisierten Medizin werden sogenannte Advanced Therapy Medicinal Products (ATMP) eingesetzt, die auf Genen, Geweben oder Zellen basieren. Bei ATMPs handelt es sich um individuelle medizinische Produkte und Therapien. Man verspricht sich von ihnen deutlich höhere Aussichten auf Erfolge bei der Behandlung von Krankheiten. Diese medizinischen Produkte sind durch eine individuelle Herstellung und meist sehr kleine Stückzahlen gekennzeichnet. Produktionssysteme, die derart hoch-komplexe und individualisierte medizinische Produkte herstellen, unterliegen strengen Anforderungen und Regularien. Für alle Komponenten sowie Prozesse sind Validierungen und Zulassungen erforderlich, sodass Änderungen oft nicht ohne weiteres möglich sind. Insbesondere die Wandelbarkeit bietet in diesem Bereich die Chance, ein skalierbares Produktionssystem aufzubauen, das an spezifische Bedarfe angepasst werden kann.⁵⁸ Produktionssysteme müssen dabei zudem strenge Anforderungen an Sicherheit, Flexibilität und Geschwindigkeit erfüllen.

Operationsroboter

Ein weiteres Anwendungsfeld ist der Einsatz von Robotersystemen, die bei Operationen unterstützen. Solche Operationsroboter sind an sich keine vollautonomen oder teilautonomen Systeme, sondern werden aktiv von ausgebildeten Ärztinnen und Ärzten bedient. Sie

sind jedoch in der Lage, Abweichungen in menschlichen Bewegungen auszugleichen. Auf diese Weise sollen insbesondere hochpräzise Eingriffe schonend und mit reduziertem Risiko durchgeführt werden können.⁵⁹

These 2: Autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme werden in spezifischen Bereichen eingesetzt, um wirtschaftliche Vorteile zu erzielen. Der Einsatz in der gesamten Fabrik ist selten.

4.5. Zusammenfassung

Frage 1 (Kapitel 4): Wie sind autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme definiert und welche Treiber und Anwendungsfelder bestehen für diese?

Um diese Frage zu beantworten, wurde in diesem Kapitel zunächst eine Bestandsaufnahme der Digitalisierung in Deutschland vorgenommen. Viele Unternehmen nutzen bereits Industrie 4.0-Anwendungen, insbesondere im Bereich der Automatisierung und des Robotereinsatzes. Großunternehmen sind bei der Nutzung von Daten weiter als KMU. Nichtsdestotrotz zeigen sich nicht nur bei Großunternehmen, sondern auch bei KMU Fortschritte. Rechtliche Bedenken und Risikoabwägungen hindern jedoch viele Unternehmen daran, ihr Datenpotenzial voll auszuschöpfen. Der Wandel zur digitalen Fabrik ist in vollem Gange, wobei der Schwerpunkt derzeit darauf liegt, das Produktionssystem resilient, flexibel und transparent zu gestalten. Einer Studie zufolge sind die USA führend bei Industrie 4.0-Themen, gefolgt von Deutschland, China, Japan und Südkorea. Es gibt eine große Vielfalt an Produktionssystemen, die von manuell betriebenen Fabriken bis hin zu hochgradig digitalisierten Unternehmen reichen.⁶⁰

Der Wandel der Produktionssystemen zeigt sich in sogenannten autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen. Dieser Begriff bezieht sich auf Produktions- und Fertigungssysteme, die in der Lage sind, sich selbstständig an neue Bedingungen anzupassen und Veränderungen vorzunehmen. Das heißt, Produktionssysteme können sich automatisiert und situationsgerecht anpassen. Außerdem können sie sich an Produktvarianten oder die Produktfamilie anpassen, um diese effizienter herzustellen.

Der Einsatz autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme wird durch ein dynamisches Umfeld, die Notwendigkeit der Risikominimierung, unsichere Prozesse in der Wertschöpfung, Individualisierung und Komplexität, Effizienzsteigerung sowie neue Produkttechnologien vorangetrieben. Unternehmen streben nach Wettbewerbsvorteilen und müssen sich schnell an veränderte Bedingungen

58 Vgl. Abele et al. 2011.

59 Vgl. Mathis-Ullrich und Scheikl 2021.

60 Vgl. Marko 2022.

anpassen. Nachhaltigkeit spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, da wandelbare Produktionssysteme zur Umsetzung nachhaltiger Praktiken beitragen können.

Autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme werden in verschiedenen Branchen wie der Logistik und der Batterietechnik eingesetzt. Sie ermöglichen die Echtzeitüberwachung der Lieferkette, optimieren Lagerprozesse und unterstützen die Auftragsabwicklung. Durch die Implementierung eines digitalen Zwillings und den Einsatz auto-

nom wandelbarer Systeme lassen sich Prozesse optimieren und die Effizienz steigern. In der industriellen Produktion bergen Autonomie und Wandelbarkeit Potenziale, um den Ressourceneinsatz nachhaltiger zu gestalten und die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Im Gesundheitswesen tragen autonom wandelbare Systeme zur Erhöhung der Sicherheit von Patientinnen und Patienten bei, etwa, wenn Operationsroboter chirurgische Eingriffe begleiten. Bei all diesen Einsatzfeldern ist es wichtig, robuste Fertigungsprozesse zu gewährleisten, um Qualität und Individualität zu kombinieren.

5. Engineering

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass es verschiedene Treiber gibt, die den Wandel von Produktionssystemen hin zu autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen voranbringen. Dabei stellt sich die Frage, ob die bestehenden Entwicklungsmethoden für diese Arten von Produktionssystemen noch ausreichend sind oder ob auch das Engineering weiterentwickelt werden muss, um den weitreichenden Veränderungen gerecht zu werden. Darauf soll in diesem Kapitel näher eingegangen werden.

Damit autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme funktionieren, benötigen sie automatisch bereitgestellte Produktdaten. Hierfür ist es erforderlich, Produkt- und Produktionssystementwicklung zu koppeln. Die zunehmende Komplexität von Produktionssystemen bedarf zudem der interdisziplinären Zusammenarbeit von unterschiedlichen Fachleuten – von der Konstruktion bis zur Automatisierung. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob die bestehenden Engineering-Methoden für Produktionssysteme ausreichen oder ob sie um weitere Methoden ergänzt werden sollten. Dieses Kapitel widmet sich der folgenden Forschungsfrage:

Frage 2 (Kapitel 5): Wie sieht das Engineering von Produktionssystemen in der heutigen Zeit aus und welche Herausforderungen ergeben sich dabei insbesondere im Hinblick auf autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme?

Um diese Frage zu beantworten, wird in diesem Kapitel zuerst untersucht, wie Produktionssysteme derzeit entwickelt werden (siehe Kapitel 5.1). Im Anschluss wird analysiert, ob das aktuelle Engineering dazu geeignet ist, auf die bestehenden branchenspezifischen Anforderungen (siehe Kapitel 5.2) und Trends und Entwicklungen (siehe Kapitel 5.3) einzugehen. Darauf aufbauend wird erörtert, wie sich das Engineering von Produktionssystemen verändern muss, um autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme zu entwerfen. Als Resultat der Analyse wird das sogenannte Systems Engineering (siehe Kapitel 5.4) als eine mögliche Weiterentwicklung zu der bestehenden Entwicklung von Produktionssystemen vorgestellt. Dabei werden auch die Vorteile für den Einsatz im Produktionskontext beleuchtet. Darüber hinaus wird beschrieben, welche Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Anwendung erfüllt sein müssen (siehe Kapitel 5.5) und wie Standards etabliert werden können (siehe Kapitel 5.6). Diese können als Rahmen für Unternehmen der Industrie dienen, die komplexe Produktionssysteme einführen wollen.

5.1. Status quo – Engineering von Produktionssystemen

Der Fokus der Expertise liegt auf der Entwicklung von Produktionssystemen⁶¹. Dabei werden unterschiedliche Perspektiven bei der Entwicklung eines Produktionssystems berücksichtigt. Anschließend werden die Engineering-Methoden von Produktionssystemen beschrieben, um dann die am Entwicklungsprozess beteiligten Teildisziplinen und den zunehmenden Einfluss von Autonomie und Wandelbarkeit sowie die daraus resultierende Interdisziplinarität zu beleuchten. Das Kapitel schließt mit einem Fazit zu aktuellen Entwicklungskonzepten von autonom wandelbaren Produktionssystemen.

Engineering ist in diesem Kontext als eine Tätigkeit zu verstehen, bei der wissenschaftliches und technisches Verständnis genutzt wird, um Innovationen möglich zu machen, Systeme zu entwickeln und zu realisieren sowie Probleme zu lösen. Das umfasst die Produktentwicklung, die strategische Produktplanung, die Produktionssystementwicklung und die Herstellung.⁶²

Produktionssysteme als Systems of Systems (SoS): Perspektiven der Produktentwicklung, der Nutzung und der Herstellung

Bei der Entwicklung von Produktionssystemen sind verschiedene Personen und Einheiten involviert, die aus unterschiedlichen Perspektiven auf den Prozess blicken. Dies wird nachfolgend anhand der drei Perspektiven Produktentwicklung, Nutzung und Herstellung veranschaulicht. Die Beschreibung beginnt mit der Produktentwicklung, weil der Bedarf an Produktionssystemen im Normalfall entsteht, wenn ein Produkt hergestellt werden soll:

Produktentwicklung: Unternehmen I entwickelt ein Produkt 1 und berücksichtigt dabei die Herstellbarkeit.

Nutzung: Die Produktionssystemplanung von Unternehmen I plant die Produktion von Produkt 1 und beschließt die Produktionssysteme A und B aus dem Bestand wiederzuverwenden. Produktionssystem C wird ebenfalls benötigt, muss aber von Unternehmen II zugekauft und in die Produktion integriert werden.

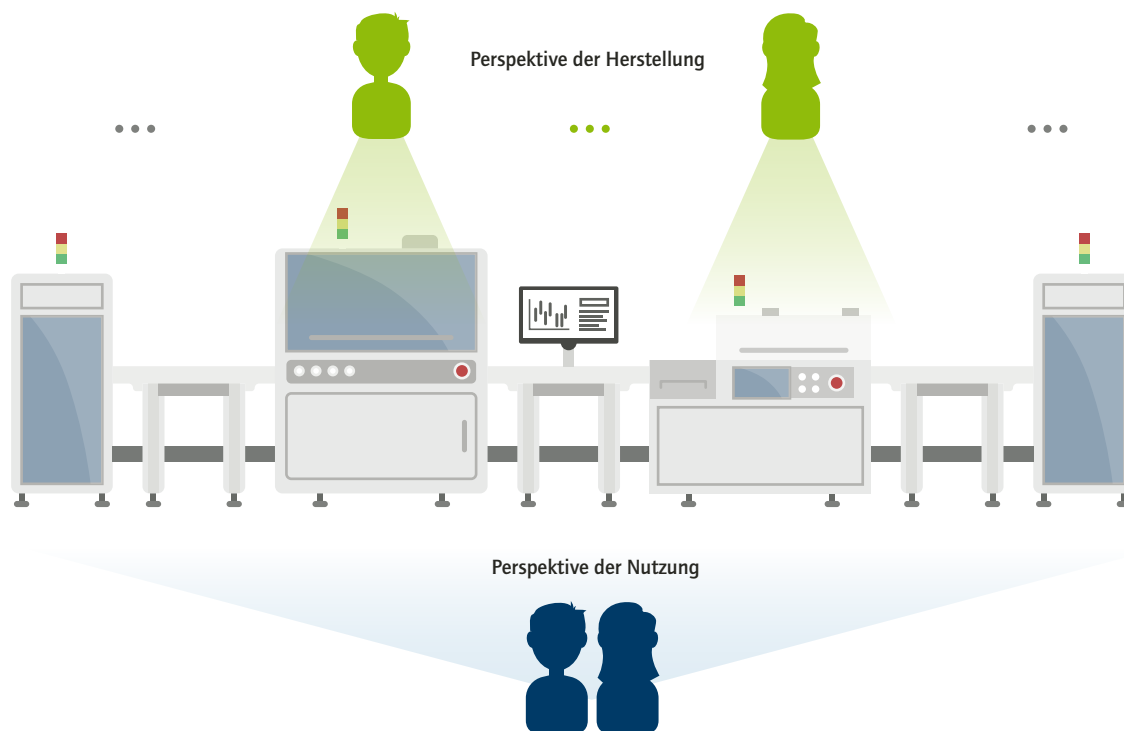
Herstellung: Das Produktionssystem C wird von Unternehmen II hergestellt. Unternehmen II entwickelt das Produktionssystem als ein Produkt 2 und berücksichtigt die Herstellbarkeit.⁶³

61 In diesem Kapitel werden die Begriffe Industrie 4.0-Systeme und Produktionssysteme synonym verwendet.

62 Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

63 Unternehmen II könnte die Abfolge aus Produktentwicklung, Nutzung und Herstellung wieder bei einem weiteren Unternehmen aus der neuen Perspektive Produktentwicklung triggern.

Abbildung 4: Perspektive des Herstellers und des Nutzers auf Produktionssysteme



Quelle: eigene Darstellung

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen Perspektiven liegt darin, wie und wo die Systemgrenzen definiert werden (siehe Abbildung 4). Aus Sicht der **Herstellung** ist das System ein abgeschlossenes Produkt, das verkauft werden kann. Aus Sicht der **Nutzung** hingegen ist das gleiche System ein Baustein in der Produktionskette, der es ermöglicht, das Produkt in der **Produktentwicklung** zu fertigen. Diese Sichtweise beeinflusst, wie das System entworfen, eingesetzt und bewertet wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Produktionssystem von einer Vielzahl von beteiligten Stakeholderinnen und Stakeholdern genutzt und entwickelt wird. Es kann daher als System of Systems bezeichnet werden. Um ein System of Systems zu entwerfen, müssen viele Teildisziplinen berücksichtigt und in ihren Zuständigkeiten koordiniert werden. Dabei sollte nicht nur die initiale Entwicklung, sondern auch die kontinuierliche Weiterentwicklung des Systems im Blick behalten werden.

Engineering-Methoden der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung

Je nach Systemgrenze kommen unterschiedliche Entwicklungsmethoden zum Einsatz. In der Herstellung werden überwiegend **Produktentwicklungsmethoden** eingesetzt (zum Beispiel Systems Engineering, VDI 2206 oder VDI 2221⁶⁴). In der Nutzung werden mehrheitlich **Produktionssystementwicklungsmethoden**⁶⁵ eingesetzt.

Die Produktentwicklung besteht aus einer Vielzahl an Teildisziplinen und spezifischen Entwicklungsmethoden, etwa aus den Bereichen Elektronik oder Software. Systems Engineering wird zunehmend in der Produktentwicklung eingesetzt, um die verschiedenen Fachdisziplinen aufeinander abzustimmen. Die Befragung der Fachleute hat jedoch gezeigt, dass die Produktentwicklung aufgrund diverser Hürden (z. B. organisatorische Verankerung in unterschiedlichen Unternehmen oder Abteilungen) dennoch nicht mit der Produktionssystemplanung verzahnt ist. Dies deckt sich mit früheren Erkenntnissen, denen zufolge Systems Engineering häufig nicht ganzheitlich im eigentlichen Sinne eingesetzt wird, sondern punktuell in der Produktentstehung, etwa in der Produktionssystementwicklung.⁶⁶

64 Vgl. VDI-Richtlinie VDI2221-1; VDI-Richtlinie VDI2206a.

65 Je nach Unternehmen werden eher Methoden der Fabrikplanung oder Produktionssystemplanung verwendet. Im Rahmen der Expertise sind diese Begriffe synonym zu verstehen.

66 Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

Die Methoden der Produktionssystementwicklung umfassen die Planung, Gestaltung und Optimierung von Produktionsstätten, die Gestaltung der Fabrik, die Anordnung von Maschinen und Arbeitsplätzen sowie den Materialfluss und die Logistik. Hierzu müssen viele Fachleute mit unterschiedlichen Kenntnissen zusammenarbeiten. Deren Koordination erfordert weitere Kenntnisse, etwa in den Bereichen Simulation und Architektur. Dies bringt Herausforderungen mit sich, die eine übergreifende und frühzeitige Zusammenarbeit erschweren.⁶⁷

These 3: Für die Entwicklung von Produktionssystemen werden Methoden der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung eingesetzt. Die Methoden integrieren verschiedene Fachdisziplinen. Eine übergreifende Zusammenarbeit scheitert in vielen Unternehmen.

Teildisziplinen als wichtiges Element der Engineering Methoden in der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung

Die zunehmende Einbindung und Vernetzung der Fachgebiete sowie die damit einhergehende Komplexität im Projekt und Unternehmen erfordern eine ganzheitliche und interdisziplinäre Herangehensweise. Die Entwicklungsmethoden sollten daher darauf abzielen, die Zusammenarbeit zwischen den Fachdisziplinen zu ermöglichen sowie Wechselwirkungen und Abhängigkeiten innerhalb der Systeme zu verstehen und transparent zu machen.

Herausforderung der Verbindung von Teildisziplinen im Entwicklungsprozess von Produktionssystemen

In der industriellen Praxis können Produktionssysteme als Systems of Systems verstanden werden, die unterschiedliche Entwicklungsbereiche (vor allem Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung) miteinbeziehen. Die Herausforderung besteht darin, unterschiedliche Teilsysteme und Entwicklungsbereiche in einem integrativen Entwicklungsprozess zusammenzubringen. Dabei müssen Vernetzung und Abhängigkeiten der Teildisziplinen und -systeme untereinander definiert werden. Hierfür ist der Austausch von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung wesentlich, die in vielen Unternehmen jedoch organisatorisch getrennt

67 Beispiel aus den Interviews mit den Fachleuten: Bei einer Neuplanung einer Fabrik wird zunächst produktionsunabhängig ein Achtzig-Prozent-Standard des Produkts mit Produktentwicklungsmethoden (wie z. B. Systems Engineering) entwickelt. Dieser Prozess dauert beispielsweise in der Automobilindustrie in der Regel drei bis vier Jahre und kann standortübergreifend erfolgen. Anschließend folgt die Standortentscheidung. Danach beginnt die klassische Produktionssystementwicklung, bei der Technikfachleute für den Betrieb, die Standortplanung (für die Abläufe in der Fabrik) und die Logistik eingesetzt werden. Die Produktionssystementwicklung dauert in der Regel zwei bis vier Jahre. Während dieser Zeit erfolgt kontinuierlich Rückmeldung an die Produktentwicklung, um das Produkt entsprechend anzupassen (zum Beispiel Änderungen der Auflagepunkte für die Montage) und an die Herstellung von neuen Produktionssystemen.

sind. Über diese organisatorischen Grenzen von Produktentwicklung, Nutzung und Herstellung zu kommunizieren, ist ein wichtiger Faktor für das Gelingen des Entwicklungsprozesses. Dies haben viele Unternehmen erkannt und streben eine bessere Vernetzung der Bereiche an.

Autonomie und Wandelbarkeit machen noch stärkere Vernetzung der Teildisziplinen nötig

Die Komplexität der zu entwickelnden Produktionssysteme steigt kontinuierlich. Produktionssysteme werden zudem in Zukunft autonom und wandelbar sein, was die Mitarbeit von Fachleuten mit diesen Kompetenzen erfordert (siehe Abbildung 5).

Außerdem müssen Autonomie und Wandelbarkeit in den gesamten Entwicklungsprozess integriert werden, weil sie sich auf weitere Teile der Produktion auswirken und eine Vielzahl an Informationen aus vor- und nachgelagerten Prozessen benötigen. Hier fehlen Ansätze, die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten schon in frühen Phasen berücksichtigen, Alternativen aufzeigen und so dazu beitragen, transparente Entscheidungen zu treffen.

Keine vorhandenen Ansätze zur Entwicklung von autonom wandelbaren Produktionssystemen

Um Autonomie und Wandelbarkeit in die Fachdisziplinen und in den gesamten Prozess zu integrieren, bedarf es einer Analyse, ob bestehende Engineering-Methoden für die Entwicklung von autonom wandelbaren Produktionssystemen geeignet sind. Die Forschung beschreibt zahlreiche Methoden.

Die Entwicklung autonomer Produktionssysteme fokussiert sich schwerpunktmäßig auf einzelne Teilaspekte der Autonomie, wie die Entwicklung von fahrerlosen Transportsystemen.⁶⁸ Das Engineering wandelbarer Produktionssysteme zielt primär auf die Entwicklung geeigneter Produktionsformen ab, wie eine Matrixproduktion oder eine Modularisierung der Produktion.⁶⁹

Bisher fehlen jedoch Methoden, die der Komplexität und den damit einhergehenden Herausforderungen gerecht werden.

These 4: Es existieren sowohl Methoden zur Entwicklung autonomer Systeme als auch Methoden zur Entwicklung wandelbarer Systeme. Weiterer Forschungsbedarf besteht für Engineering-Methoden von autonom wandelbare Produktionssystemen.

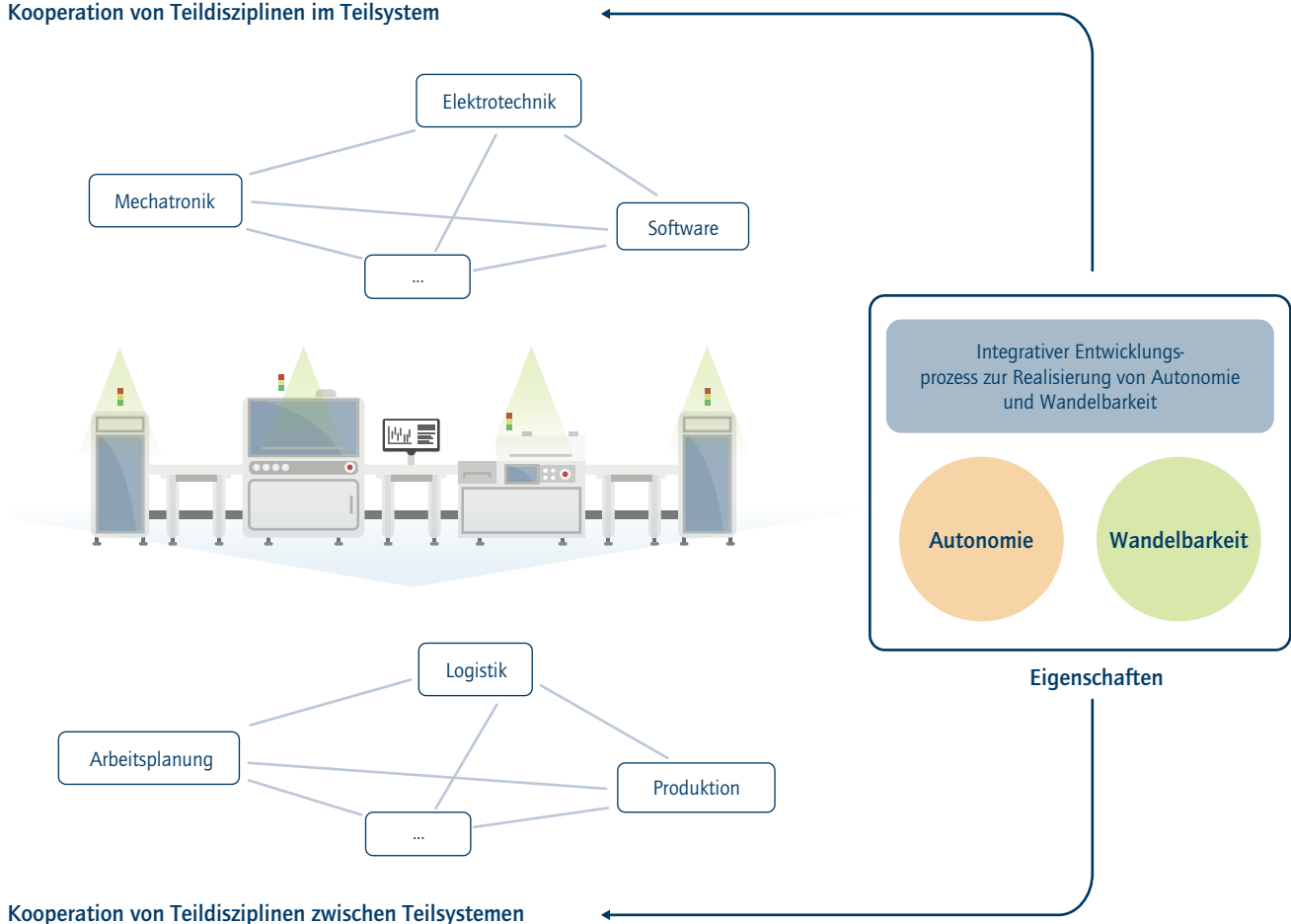
68 Vgl. Wannenwetsch 2021; Zidi et al. 2023; Scholz-Reiter und Freitag 2007.

69 Vgl. Nyhuis et al. 2021.

Abbildung 5: IST-Zustand des Engineerings im Kontext der Entwicklung von autonom wandelbaren Produktionssystemen

Perspektive der Herstellung: **Produktentwicklungsmethoden**

Kooperation von Teildisziplinen im Teilsystem



Kooperation von Teildisziplinen zwischen Teilsystemen

Perspektive der Nutzung: **Produktionsentwicklungsmethoden**

Quelle: eigene Darstellung

5.2. Status quo – Branchenspezifische Besonderheiten

Bei den Interviews mit den Fachleuten hat sich gezeigt, dass nicht nur eine Diskrepanz zwischen den Engineering-Methoden besteht (siehe Kapitel 5.1), sondern auch branchenspezifische Unterschiede. Aus diesem Grund wurden die Antworten der Fachleute nach Branchen aufgeschlüsselt. Die befragten Fachleute lassen sich fünf Branchen zuordnen: Agrarwirtschaft, Automotive, Lebensmitteltechnik, Medizintechnik und Werkzeugmaschinenbau. Die Einteilung der Wirtschaftszweige orientiert sich dabei an der Einteilung des statistischen Bundesamtes.⁷⁰ Die Ergebnisse aus den Interviews der unterschiedlichen Wirtschaftszweige sind in Abbildung 6 zusammengefasst. Die befragten Fachleute aus der Agrarwirtschaft, dem Automotivebereich und der Medizintechnik neh-

men die Perspektive der Nutzer ein, während die Fachleute aus den Wirtschaftszweigen Lebensmitteltechnik und Werkzeugmaschinenbau die Perspektive der Hersteller einnehmen (näheres zu den Perspektiven in Kapitel 5.1). Abschließend folgt die Perspektive der Forschung auf das Thema.

Agrarwirtschaft

Die Agrarwirtschaft steht vor der Herausforderung, ihre Produktionsprozesse zu modernisieren, um steigenden Kundenanforderungen gerecht zu werden. Dabei spielen automatisierte Verknüpfungen von Datenbanken und erhöhte Automatisierung eine wesentliche Rolle. Zudem gewinnen autonome Systeme zunehmend an Bedeutung:

70 Vgl. Statistisches Bundesamt 2008.

Abbildung 6: Branchenspezifische Unterschiede (eigene Befragung von 18 Fachleuten)

Branchen	Kriterien						
	Einsatz von Systems Engineering	Digitale Durchgängigkeit	Regulatorik	Wandlungsfähigkeit der Anlagen	Autonomie der Anlagen	Parallelisierung des Engineerings	
Agrarwirtschaft	↑	↑	↑	→	↓	↓	
Automotive	↑	↑	↑	↓	→	→	
Lebensmitteltechnik	→	↓	↑	→	↓	→	
Medizintechnik	↑	→	↑	↓	↓	→	
Werkzeugmaschinenbau	→	→	→	→	↑	↑	



hoch



moderat



gering

Quelle: eigene Darstellung

- Sequenzielles Engineering von Industrie 4.0-Systemen:** Die Entwicklung der Produktionssysteme ist derzeit noch sequenziell wasserfallartig aufgebaut und erfordert menschliche Eingriffe, um die Datenbanken zu verknüpfen. Das Ziel ist hier, die Verknüpfung automatisiert und idealerweise autonom zu gestalten.
- Erhöhung der Automatisierung in der Produktion:** Das Produktionssystem soll effizienter und mit einem höheren Grad an Automatisierung gestaltet werden, um die Qualität zu steigern und den Arbeitsschutz zu verbessern. In Vorbereitung auf künftige wirtschaftliche oder gesetzliche Anforderungen arbeiten Unternehmen dabei zum Beispiel am verstärkten Einsatz energieeffizienter Lacke, an der Nutzung von Solarenergie oder rückgewonnener Wärme sowie an Maßnahmen, die Lieferketten transparenter machen sollen.
- Erster Einsatz von autonomen Systemen:** Die Optimierung von Kosten ist ein zentraler Faktor in der Landwirtschaft, aber auch in vielen anderen Branchen. Daher spielt Autonomie eine große Rolle (besonders in der Produktentwicklung). Autonome Systeme bieten die Möglichkeit, Arbeitsbereiche zu entlasten und risikoreiche Aufgaben sicherer zu machen.

Automobilindustrie

In der Automobilindustrie stehen besonders Standardisierungsbestrebungen im Engineering sowie die Erhöhung von Wandelbarkeit und Flexibilität im Fokus:

- Einsatz von Standardisierung im Engineering:** Der Prozess des Engineerings von Produktionssystemen erfordert sowohl hohes technisches Fachwissen als auch eine enge Zusammenarbeit der verschiedenen Fachbereiche. Ein hoher Grad an Standardisierung kann das Engineering vereinfachen und die Planung effizienter gestalten. Das Engineering von Produktionssystemen ist eng mit der Produktentwicklung verbunden, damit sichergestellt wird, dass die Planungen auch umsetzbar sind.
- Wandelbarkeit und Flexibilität in Produktionssystemen:** Das Engineering soll zukünftig stärker Wandelbarkeit und Flexibilität berücksichtigen, um schnell auf sich ändernde Marktanforderungen und Produktveränderungen zu reagieren. Dafür bedarf es einer effizienten und agilen Produktionssystementwicklung. Die Nutzung von Standardkomponenten in allen Werken weltweit ermöglicht eine flexible und anpassungsfähige Produktion. Der Einsatz von virtuellen Fabriken ermöglicht eine digitale Darstellung und Anpassungen, um schnell auf Veränderungen zu reagieren.



Wir müssen viele Abläufe, die wir intern in der Entwicklung klassisch so vorgesehen haben, komplett überdenken und beschleunigen.

- **Green- und Brownfield mit unterschiedlichen Anforderungen:**

Beim Greenfield-Ansatz wird die Planung der Fabrik deutlich früher in die Produktentwicklung integriert. So kann man die Produktion zeitlich optimal auf das Produkt abstimmen, ohne Kompromisse einzugehen. Im Rahmen des Brownfield-Ansatzes hingegen werden bestehende Fertigungsanlagen analysiert und angepasst, um die gewünschte Kapazität in der Produktion zu erreichen. Dafür werden sehr detaillierte Simulationen eingesetzt, um den Umbau der Fabrik in den Betriebsferien möglichst gut abzusichern und Planungsfehler auszuschließen.



Wandlungsfähigkeit ist für uns ein wichtiges Thema. Die Produktion muss je nach Bedarf hoch oder runter skaliert werden können. Wenn wir eine Anlage planen, die in sechs Jahren startet und sieben bis acht Jahre lang Karossen produziert, müssen wir jetzt schon wissen, welche Stückzahlen in 13 Jahren über das Band laufen.

hohen Investitionen. Häufig stehen der Weiterentwicklung die hohen Investitionskosten gegenüber, die sich erst langfristig auszahlen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn Unternehmen sehr stark auf ihre aktuelle Situation fokussiert sind und nicht die langfristigen Vorteile erkennen.

- **Lights-Out-Fabriken:** Eine Lights-Out-Fabrik ist eine Fabrik, in der keine menschlichen Arbeitskräfte anwesend sind. Stattdessen werden alle Prozesse und Abläufe von einem zentralen Kontrollzentrum gesteuert. Durch den Einsatz fortschrittlicher Automatisierungstechnologie und KI können diese Fabriken rund um die Uhr arbeiten, ohne auf menschliches Personal angewiesen zu sein.



Ein aufkommender Trend sind Lights Out Factories, Fabriken ohne menschliche Arbeitskräfte. Ein Kontrollzentrum, „ähnlich einem Tower am Flughafen“, überwacht die Fabrik rund um die Uhr. Dadurch können Fabriken weltweit gesteuert werden, unabhängig davon, ob sie sich in Neuseeland, Südafrika oder Südamerika befinden.

Lebensmittelindustrie

Der Anlagenbau für die Lebensmittelindustrie muss differenziert betrachtet werden: Während vor allem kleinere Unternehmen derzeit noch Investitionen in autonomiefähige Anlagen scheuen, verfolgen andere Anlagenbauunternehmen bereits die Vision von vollautonomen Lights-Out-Fabriken, wie im Folgenden beschrieben:

- **Fehlende Zusammenführung der Engineering-Informationen:**

Nach wie vor mangelt es im Engineering an geeigneten Lösungen, die Informationen verwalten und zusammenführen können. Die zentrale Herausforderung liegt darin, den Produktionsprozess und die Funktionsweise der Maschinen zu definieren. Immer noch werden häufig Informationen manuell in Excel-Tabellen eingetragen. Im Sinne eines effizienten Datenmanagements ist daher eine intelligente Schnittstelle oder ein Werkzeug vonnöten, das die vorhandenen Informationen nutzt, um zum Beispiel automatisch ein Anlagen- oder Fabriklayout zu erstellen.

- **Skepsis gegenüber autonomen Anlagen:** Insbesondere in kleineren Unternehmen herrscht mitunter Skepsis gegenüber autonomen Anlagen. Auch deshalb ist man dort oft nicht bereit, in neue Technologien zu investieren. Stattdessen konzentrieren sich kleinere Unternehmen aktuell eher auf andere Herausforderungen, wie etwa darauf, ihren Betrieb energieeffizienter zu gestalten. Visionäre Firmen sind in der Regel aufgeschlossen gegenüber autonomen Anlagen, haben teilweise jedoch Bedenken aufgrund der damit verbundenen

Medizintechnik

Die Herstellung von medizinischen Geräten erfordert eine sorgfältige Planung und Umsetzung, um den regulatorischen Anforderungen zu entsprechen, die Validierung und Verifizierung sicherzustellen, Reinraumtechnologien zu implementieren, Produkthaftung und Risikomanagement zu berücksichtigen und eine umfangreiche Dokumentation und Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Das Engineering der Produktionssysteme spielt eine entscheidende Rolle dabei, diese Anforderungen zu erfüllen und die Qualität und Sicherheit der medizinischen Geräte zu gewährleisten.

- **Regulatorische Anforderungen:** Die Medizintechnik unterliegt strengen regulatorischen Anforderungen wie der ISO 13485-Zertifizierung und der Einhaltung von Richtlinien wie der Medical Device Directive (MDD) oder der Medical Device Regulation (MDR). Das Engineering der Produktionssysteme muss sicherstellen, dass diese regulatorischen Anforderungen erfüllt werden, um die Qualität und Sicherheit der medizinischen Geräte zu gewährleisten.
- **Validierung und Verifizierung:** Die Produktion von Medizintechnik erfordert umfangreiche Validierungs- und Verifizierungsprozesse. Damit soll dafür gesorgt werden, dass die Geräte den spezifizierten Anforderungen entsprechen. Das Engineering der Produktionssysteme muss diese Prozesse in den Produktionsablauf integrieren und gewährleisten, dass alle erforderlichen Tests und Prüfungen durchgeführt werden.

- **Dokumentation und Traceability**⁷¹: Die Medizintechnik erfordert eine umfangreiche Dokumentation und Rückverfolgbarkeit aller Produktions- und Qualitätskontrollprozesse. Das Engineering der Produktionssysteme muss sicherstellen, dass alle relevanten Informationen dokumentiert und rückverfolgbar sind.



Die digitale Durchgängigkeit entlang der gesamten Prozesskette in Kombination mit der Hardware der Maschine ist definitiv ein wichtiges Thema. Dadurch können virtuelle Inbetriebnahmen, Absicherungen und mehr durchgeführt werden.



Wir müssen von Anfang an die Anforderungen berücksichtigen. Besonders bei der Logistik müssen wir bereits zu Beginn überlegen, wie die Gesamtmaschine in den logistischen Ablauf des Kundenunternehmens integriert werden kann.

Werkzeugmaschinen

Die Entwicklung von Werkzeugmaschinen spielt in verschiedenen Branchen eine entscheidende Rolle bei der Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung. Das Engineering der Automatisierungssysteme entwickelt maßgeschneiderte Lösungen, um den spezifischen Anforderungen gerecht zu werden:

- **Kundenanforderungen:** Der Maschinenbau umfasst die Entwicklung und die Herstellung von maßgeschneiderten Maschinen und Anlagen auf Basis der spezifischen Anforderungen und Bedürfnisse der Kunden. Mitarbeitende, die im Engineering der Maschinen tätig sind, müssen eng mit den Kunden zusammenarbeiten, um deren Anforderungen zu verstehen und die Maschinen entsprechend zu konzipieren. Deshalb werden bereits in einer frühen Entwicklungsphase die Anforderungen der Kunden in Form von Lastenheften aufgenommen.
- **Prüfung und Validierung:** Unter anderem müssen Sondermaschinen gründlich geprüft und validiert werden, damit sie den Anforderungen und Spezifikationen entsprechen. Mitarbeitende im Engineering müssen Test- und Prüfverfahren entwickeln und durchführen, um die Leistung, die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Maschinen zu überprüfen.
- **Berücksichtigung der Logistik bei der Anlagenkonstruktion:** Die Logistikkonzepte der Kunden sind meist vielfältig und variantenreich. Das müssen Mitarbeitende in der Maschinenentwicklung berücksichtigen, etwa wenn es um die physische Anbindung an fahrerlose Transportsysteme geht oder die nötige IT-Infrastruktur bereitgestellt werden muss.

These 5: In der Automobilindustrie liegt der Schwerpunkt auf wandelbaren Produktionssystemen, während insbesondere im Maschinenbau autonome Systeme im Vordergrund stehen.

These 6: Die Nutzerorientierung und die Kundeneinbindung zu Validierungszwecken sind besonders im Engineering von Produktionssystemen relevant, um Produktionssysteme optimal auf das Produkt abzustimmen.

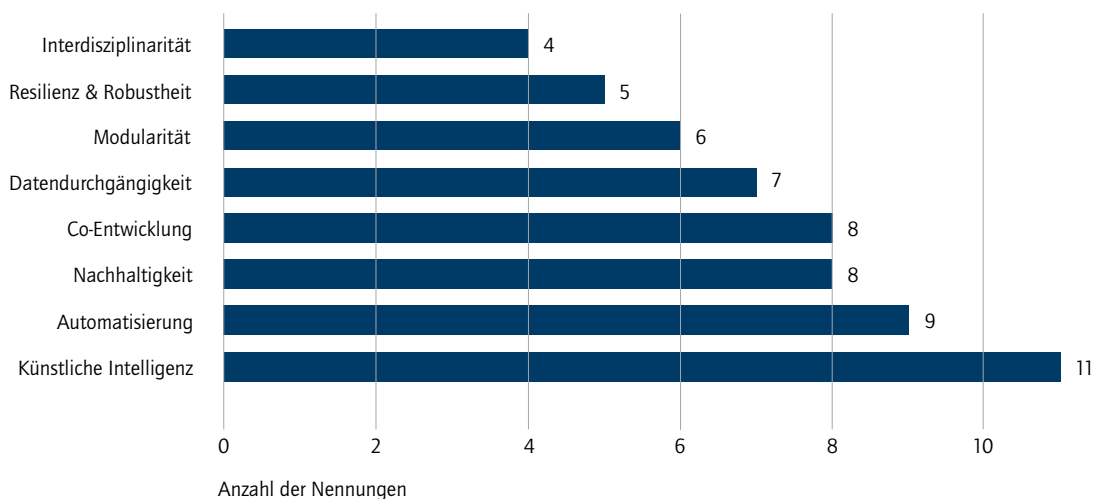
These 7: Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung erfolgen in weiten Teilen der Industrie unabhängig voneinander.

5.3. Wegweiser der Zukunft: Trends im Engineering

Die Analyse der bestehenden Engineering-Methoden hat gezeigt, dass Forschungsbedarf hinsichtlich der Frage besteht, wie autonom wandelbare Produktionssysteme in interdisziplinären Teams und aus Perspektive von Nutzung und Herstellung entwickelt werden können. Je nach Perspektive kommen eher klassische Produktentwicklungsmethoden und Systems Engineering zum Einsatz oder Methoden der Produktionssystementwicklung und Fabrikplanung (siehe Kapitel 5.1). Dabei werden Autonomie und Wandelbarkeit aktuell eher getrennt und nicht gemeinsam betrachtet. Zudem ließen sich branchenspezifische Unterschiede im Engineering (siehe Kapitel 5.2) ausmachen. Dieses Kapitel beleuchtet Trends im Engineering mit dem Ziel, die Anforderungen an zu entwickelnde Methoden im Kontext autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme zu beschreiben. Zu diesem Zweck wurden die Fachleute befragt. Die Antworten finden sich in Abbildung 7.

⁷¹ Traceability bezeichnet die Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit von Anforderungen, Entwurfsentscheidungen und Prozessen während des gesamten Lebenszyklus eines Engineering-Projekts. Sie ermöglicht es, Änderungen und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu verfolgen und zu dokumentieren.

Abbildung 7: Trends im Engineering (eigene Befragung unter 18 Fachleuten)



Quelle: eigene Darstellung

Die zwei häufigsten genannten Trends im Engineering sind der Einsatz von KI und die Automatisierung. Dabei empfinden es viele Unternehmen als herausfordernd, Fachkräfte zu gewinnen, Know-how aufzubauen und in einem sehr dynamischen Umfeld geeignete Technologien auszuwählen, die es ihnen ermöglichen, ihre Produktion weiter zu verbessern.

These 8: Es bedarf einer Methodik zur Auswahl der vielversprechendsten Technologien in der Produktion, um herauszufinden, welche Technologien den größten Hebel für die eigene Produktion bieten.

Künstliche Intelligenz

Die zunehmende Menge und Vielfalt an Daten erhöhen den Bedarf an Werkzeugen für deren Analyse und Auswertung. Bei der Entwicklung und dem Betrieb autonomer Industrie 4.0-Systeme birgt KI als Analysewerkzeug Potenziale für Verbesserungen, so kann KI etwa als Entscheidungshilfe eingesetzt werden.

Im Bereich der Produktion werden große Sprachmodelle zum Beispiel durch Machine Learning (ML) immer interessanter. Sprachmodelle, insbesondere im Bereich des maschinellen Lernens, sind in der Lage, natürliche Sprache zu verstehen und zu generieren. So können große Mengen unstrukturierter Daten wie Texte effizient analysiert und daraus Erkenntnisse gewonnen werden. Mit zunehmender Intelligenz eines Systems steigt auch die Komplexität und somit der Bedarf an Engineering, um diese Komplexität zu beherrschen. Dabei geht es nicht darum, Menschen zu ersetzen, sondern ihnen Hilfsmittel an die Hand zu geben, die ihnen erlauben, bessere Entscheidungen zu treffen.

Eine zentrale Herausforderung beim Einsatz von KI ist, Geheimhaltungspflichten zu genügen, die Vertraulichkeit von sensiblen Daten zu wahren und damit Menschen zu schützen. Daher müssen Wege gefunden werden, um diese Daten sicher zu managen.

Ein Beispiel für den Einsatz von KI ist die vorausschauende Wartung. Bei diesem Anwendungsfeld gibt die KI auf Basis bestehender Daten Prognosen ab, wann Wartungsarbeiten an Maschinen oder Anlagen erforderlich sind. Dies kann Ausfälle vermeiden und die Effizienz der Anlagen steigern.

Ein weiteres anschauliches Beispiel für den Einsatz von KI in der Industrie 4.0 ist die Optimierung von Produktionsprozessen. Durch die Analyse großer Datenmengen erkennen intelligente Algorithmen, wie Maschinen und Anlagen effizienter betrieben werden können, um Ressourcen zu sparen und die Produktivität zu steigern. Das steigert nicht nur die Effizienz, sondern senkt auch Kosten und entlastet die Umwelt.

Wir haben frühzeitig das Thema ML aufgegriffen und sind intensiv damit beschäftigt. In jeder Arbeitsgruppe spielt es mittlerweile eine Rolle, sei es in Form von Predictive Maintenance, Predictive Quality oder beim Erstellen eines digitalen Schattens des Wertstroms, um zukünftige Entwicklungen zu antizipieren.

Automatisierung

Der steigende Grad der Digitalisierung hat Auswirkungen auf verschiedene Bereiche der Produktion. Eine Konsequenz davon ist die zunehmende Automatisierung, die sich von der Entwicklung der Systeme außerhalb des Hauptstandorts bis hin zum Service erstreckt.

Gleichzeitig entwickelt sich der „Lean-Gedanke“ im Sinne des Lean Managements weiter. Auf Basis dieser Überlegungen werden Werkerassistenzsysteme und Shopfloor-Management implementiert, um Produktionsprozesse zu optimieren sowie die Qualität in allen Bereichen zu steigern. Dabei spielt Machine Learning eine wichtige Rolle.

Ein weiterer Aspekt, der mit der zunehmenden Digitalisierung und Automatisierung einhergeht, sind Lights-Out-Fabriken (siehe Kapitel 5.2), die, wie der Name andeutet, vollständig im Dunkeln betrieben werden können. Derartige Fabriken sind nahezu vollständig automatisiert, menschliche Eingriffe sind auf ein Minimum reduziert.⁷²



Um eine massive Produktivitätssteigerung in Deutschland zu erreichen, müssen wir automatisieren. Das bedeutet, menschliche Arbeitskraft zu ersetzen oder den Menschen in seiner Tätigkeit produktiver zu machen. Derzeit sehen wir jedoch noch keine ausreichenden Maßnahmen in diese Richtung. Wir haben bereits massive Probleme bei der Besetzung von Stellen festgestellt.

Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit gewinnt im Kontext von Industrie 4.0-Systemen zunehmend an Bedeutung. Denn die Weiterentwicklung intelligenter Technologien und digitaler Lösungen kann maßgeblich dazu beitragen, Umweltbelastungen durch effizientere und ressourcenschonendere Produktion zu reduzieren.

Mithilfe von Konzepten der Kreislaufwirtschaft können Materialien und Ressourcen in Produktionsprozessen wiederverwendet und recycelt werden. Das reduziert sowohl den Bedarf an Ressourcen als auch den Abfall. Der Einsatz intelligenter Systeme ermöglicht beispielsweise die Entwicklung und Verwendung umweltfreundlicherer Lacke. Digitale Überwachung verhilft Herstellern zu einer besseren Kontrolle und Optimierung des Lackherstellungsprozesses. Das reduziert die Verwendung umweltschädlicher Stoffe.

Neue Entwicklungsmethoden können auch dabei unterstützen, den Energieverbrauch, eine zentrale Umweltauswirkung im Bereich industrieller Prozesse, zu optimieren. Mit Hilfe von Energiemanagementsystemen und intelligenten Steuerungen können energieeffiziente Prozesse etabliert werden. Dies führt zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs und damit zu einer Verringerung der Umweltauswirkungen, insbesondere der CO₂-Emissionen.

Auch Lieferketten können im Rahmen von Industrie 4.0 nachhaltiger gestaltet werden. Durch den Einsatz intelligenter Technologien wie dem Internet der Dinge (IoT) und der Blockchain können Transportwege optimiert und CO₂-Emissionen reduziert werden. Durch intelligente Algorithmen und Anwendungen, die auf diesen Technologien basieren, können Transportwege optimiert werden. IoT erlaubt die Vernetzung von Geräten und Sensoren. Diese sammeln Daten über den Zustand von Gütern, Fahrzeugen und der Umgebung. Diese Daten werden dann von intelligenten Algorithmen analysiert, um bestehende Prozesse zu verbessern, etwa die Routenplanung oder den Energieverbrauch der Fahrzeuge. Eine bessere Überwachung und Steuerung der Lieferkette durch digitale Vernetzung ermöglicht zudem eine genauere Verfolgung des Warenflusses und der verwendeten Verpackungsmaterialien. Dadurch können Unternehmen ihren Verpackungsbedarf besser planen und optimieren.



Eine Welt, in der wir vieles wegwerfen, nur um es durch Neues zu ersetzen, ist nicht nachhaltig. Aus diesem Grund bemühen wir uns, so viel wie möglich wiederzuverwerten. Hierbei stoßen wir jedoch oft auf Hindernisse.

Co-Entwicklung

Ein bedeutender Trend bei Industrie 4.0-Systemen ist die Co-Entwicklung. Die Idee dabei ist, dass die Bedarfe der Kunden frühzeitig abgefragt und fortwährend in den Entwicklungsprozess integriert werden. Dabei ist wichtig, während des Prozesses flexibel Änderungen und Anpassungen vornehmen zu können sowie das Produktionssystem zu validieren. Letzteres kann zum Beispiel mit Prototypen oder der Systemarchitektur und verschiedenen Stakeholderinnen und Stakeholdern geschehen.

Um den Kunden aktiv in den Entwicklungsprozess einzubeziehen, sind spezifische Visualisierungen und Grafiken erforderlich. Diese visuellen Darstellungen befähigen den Kunden die Entwicklung des Produkts besser zu verstehen und so an wichtigen Entscheidungen teilzunehmen. Zudem fördert es eine engere und intensivere Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen Kunden und Unternehmen, die durch den Einsatz von Validierungsmethoden weiter gestärkt wird.

Mittel fortschrittlicher Visualisierungstechnologien wie Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR) erlebt der Kunde das Produkt in einer virtuellen Umgebung und kann Feedback geben. Dazu zählt auch die Verwendung von Partialmodellen der Systemarchitektur.

Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Entwicklung ist die zunehmende Visualisierung von Systemen, zum Beispiel durch virtuelle Fabriken. Diese entwickelt sich stetig fort, nicht zuletzt, weil immer höhere Rechenleistungen den Detailgrad der Visualisierung weiter verbessern.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass Rückmeldungen von Kunden wie Fragen, Problemmeldungen und Änderungswünsche als wichtige Informationen in die Neukonzeption von Produkten oder Dienstleistungen einbezogen werden sollten.



Ein Trend besteht darin, den Kunden zum Prosumenten zu machen und ihn möglicherweise sogar als Mitentwickler einzubeziehen. Dabei helfen uns saubere Ablaufdiagramme und Funktionsdiagramme. Es ist ein wichtiges Thema, um den Kundenwunsch besser zu verstehen.

Datendurchgängigkeit

Im Kontext der Industrie 4.0-Systeme spielen Interoperabilität und der steigende Digitalisierungsgrad eine entscheidende Rolle bei der Erreichung einer höheren digitalen Durchgängigkeit. Eine wichtige Methode zur Erreichung dieser digitalen Durchgängigkeit ist das Life Cycle Engineering. Das bedeutet, dass Informationen und Daten entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produkts nahtlos ausgetauscht und genutzt werden können. Dabei wird der Lebenszyklus eines Produkts betrachtet, von der Entwicklung über die Produktion bis hin zur Wartung und Entsorgung. Die Integration von digitalen Technologien und Daten optimiert Prozesse und steigert die Effizienz.

Die Auswertung von Daten spielt eine zentrale Rolle im Rahmen des Life Cycle Engineerings. Auf Basis der Analyse und Nutzung von Daten können zum Beispiel Predictive-Maintenance-Modelle entwickelt werden, die den Zustand von Maschinen und Anlagen vorhersagen und rechtzeitig Wartungsarbeiten durchführen. Zudem ermöglichen digitale Zwillinge und digitale Produktpässe eine umfassende Darstellung und Auswertung der kontinuierlich anfallenden Produkt- und Prozessdaten.

Um die digitalen Zwillinge und digitalen Produktpässe effektiv nutzen zu können, müssen einheitliche digitale Datenformate etabliert werden. Denn nur wenn Daten in einem standardisierten Format vorliegen, können sie nahtlos ausgetauscht und verwendet werden.

Ein weiterer Aspekt des Life Cycle Engineerings ist die enge Kopplung von Produkt- und Produktionssystementwicklung. Durch die Integration von digitalen Technologien und Daten können Produktentwicklungsprozesse auf die spezifischen Anforderungen der Produktionssysteme abgestimmt werden. Dies ermöglicht eine effiziente und reibungslose Produktion von hochwertigen Produkten.

Modularität

Im Zusammenhang mit Industrie 4.0-Systemen spielt zunehmend das Konzept der Losgröße 1 eine Rolle. Dieser Trend beschreibt einen Prozess, bei dem Produkte in individuellen Einheiten gefertigt werden, um den spezifischen Kundenbedürfnissen gerecht zu werden. Insbesondere im Sondermaschinenbau ist die Losgröße 1 von großer Bedeutung, da hier maßgeschneiderte Lösungen gefragt sind.

Um die Anforderungen der Losgröße 1 effizient umsetzen zu können, wird in der modularen Produktentwicklung das Baukastenprinzip eingesetzt. Das ermöglicht es, Produkte aus standardisierten Modulen zusammensetzen und damit Flexibilität und Anpassungsfähigkeit zu erhöhen. Flexibilität in der Zusammenstellung der Module und Anpassungsfähigkeit zur Bewältigung der Wandelbarkeit sind entscheidend für den Austausch und die Integration neuer Technologien. Beides unterstützt Unternehmen dabei, Systeme autonom zu gestalten und den dynamischen Marktbedingungen und Produktionsanforderungen gerecht zu werden.

Damit es nicht zu Effizienzverlusten kommt und um eine reibungslose Integration in den modularen Produktionsprozess zu gewährleisten, darf der Baukasten nicht zu viele spezielle Kundenanforderungen beinhalten. Ein zu großer Baukasten kann die Komplexität erhöhen und zu ineffizienten Prozessen führen.



In Zukunft muss eine andere Art von Modularisierung angestrebt werden. Heutzutage erfolgt die Modularisierung oft nach Funktionalitäten, um dem Kunden entsprechende Angebote machen zu können. Zukünftig sollte auch der Produktlebenszyklus in die Modularisierung einbezogen werden.

Resilienz und Robustheit

Lieferketten spielen eine entscheidende Rolle für die Resilienz und Robustheit von Industrie 4.0-Systemen. Traditionell lag der Fokus von Lieferketten oft auf der Kostenoptimierung. Unternehmen erkennen jedoch zusehends, dass es nicht ausreicht, nur die Kosten zu minimieren. Vielmehr wächst das Verständnis dafür, dass eine robuste und widerstandsfähige Lieferkette erforderlich ist, um möglichen Störungen entgegenzuwirken.

Resilienz und Robustheit umfassen dabei verschiedene Aspekte wie die rechtzeitige Verfügbarkeit von Rohstoffen, die Minimierung von Lieferengpässen und die Identifizierung und Bewältigung von Risiken. Durch den Einsatz digitaler Technologien wie IoT, Datenanalyse und KI können Unternehmen ihre Lieferketten besser überwachen, potenzielle Risiken frühzeitig erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen, um diesen entgegenzuwirken.



Das Thema Resilienz lenkt den Fokus weg von reinen Kostenaspekten und internationaler Ausrichtung hin zur Robustheit und Versorgungssicherheit.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Im Kontext von Industrie 4.0-Systemen gewinnt die interdisziplinäre Zusammenarbeit zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der Komplexität und Vielfalt von Industrie 4.0-Projekten ist es notwendig, dass Fachleute aus unterschiedlichen Disziplinen zusammenarbeiten, um gemeinsam innovative Lösungen zu entwickeln. Typischerweise sind daran Disziplinen beteiligt wie die Wirtschaftsinformatik, die Automatisierungstechnik, die Produktentwicklung, die Produktionssystematik, die Betriebswirtschaft, der Maschinenbau, die Softwareentwicklung, die Elektrotechnik oder der Vertrieb, die häufig in den Interviews genannt werden.

Es gibt verschiedene Methoden, um interdisziplinäre Zusammenarbeit zu fördern. Agile Methoden und Prinzipien können Unternehmen dabei unterstützen, flexibel auf Veränderungen zu reagieren und ihre Prozesse kontinuierlich zu verbessern.

Die Entwicklung und Implementierung komplexer Systeme erfordert fundierte Kenntnisse und Methoden des Systems Engineerings. Dies umfasst unter anderem auch die Modellierung, Simulation und Validierung von Systemen sowie die Entwicklung von Softwarelösungen zur Steuerung und Überwachung dieser Systeme.

Ein Charakteristikum von Industrie 4.0-Systemen ist die steigende Anzahl von Stakeholderinnen und Stakeholdern. Aus der Vernetzung und Integration von unterschiedlichen Akteurinnen und Akteuren wie Lieferanten, Kunden, Partnerinnen und Partnern und internen Abteilungen entstehen vielfältige Interessen und Anforderungen. Deren Bedürfnisse gilt es im Sinne einer erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0-Projekten zu berücksichtigen und in den Entwicklungsprozess zu integrieren.

Für eine effektive und effiziente Zusammenarbeit ist es zudem wichtig, sich auf gemeinsame Standards zu einigen. Das trägt zu einer verbesserten Kommunikation und einem reibungslosen Austausch von Informationen und Daten zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen bei.



Eine interdisziplinäre Herangehensweise, die verschiedene Perspektiven wie Wirtschaftsinformatik, Automatisierungstechnik, Produktentwicklung und Produktionssystematik vereint, ist äußerst spannend. Dabei sollte auch Raum für menschliche Aspekte geschaffen werden; durch die Einbindung von betriebswirtschaftlichem Know-how.

5.4. Systems Engineering als verbindendes Element zwischen Autonomie und Wandelbarkeit

Die Analyse der Trends im Engineering (Kapitel 5.3) zeigt, dass bereits komplexe Systeme entwickelt werden. Technologische Fortschritte wie im Bereich der KI führen dazu, dass die Komplexität und Interdisziplinarität weiter zunehmen, sowohl in der Entwicklung als auch im Hinblick auf die Zusammensetzung der Teams. Dieser Umstand ist noch nicht ausreichend von der Forschung abgedeckt. Hier fehlt es derzeit an Einordnungen von Engineering-Methoden in der Herstellung und Nutzung sowie bezüglich Autonomie und Wandelbarkeit (Kapitel 5.1) und branchenspezifischen Besonderheiten (Kapitel 5.2).

Es wurde deutlich, dass sich Produktionssysteme aufgrund verschiedener Treiber zu autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen verändern (siehe Kapitel 4.5). In der Entwicklung ist dafür eine ganzheitliche Betrachtung des Systems nötig und eine frühzeitige und durchgängige Kommunikation und Kooperation verschiedener Fachleute. Dabei müssen sowohl die Produkt- und Produktionssystementwicklung miteinander verzahnt werden als auch die Perspektiven und Ansätze der Fabrikplanung zu Autonomie und Wandelbarkeit orchestriert werden. Das Systems Engineering hat sich dabei in den späteren Phasen der Produktentstehung noch nicht grundsätzlich etabliert, wie etwa in der Produktionssystementwicklung oder der integrativen Betrachtung von Produkt, Produktionssystem und Dienstleistung.

In diesem Kapitel wird zunächst das Systems Engineering definiert. Dann werden dessen wesentliche Eigenschaften aus Sicht der Fachleute genannt. Anschließend wird dies in den Kontext der Entwicklung von Produktionssystemen gesetzt.

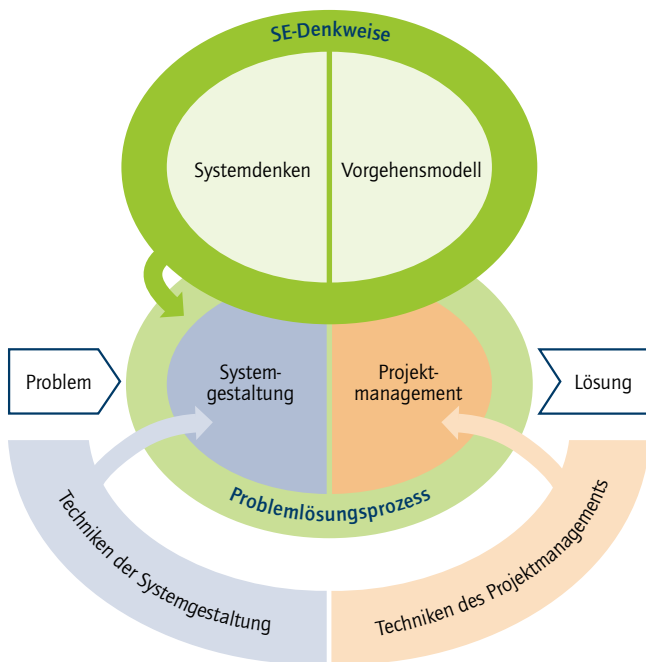
5.4.1. Systems Engineering

In Zukunft werden (Produktions-)Systeme in immer engerer Zusammenarbeit verschiedener Fachgebiete wie der Ingenieurwissenschaften, der Naturwissenschaften, der Informatik, der Soziologie, Psychologie oder Arbeitswissenschaft entstehen. Die zunehmende Integration und Vernetzung dieser Fachgebiete sowie die steigende Komplexität in Planung, Entwicklung, Produktion und Betrieb erfordern ein ganzheitliches und interdisziplinäres Systems Engineering.

Was ist Systems Engineering? Eine Einführung in den Ansatz

Das International Council on Systems Engineering (INCOSE) definiert Systems Engineering als einen Ansatz oder eine Methode zur Gestaltung komplexer Systeme, worunter auch Produktionssysteme fallen.⁷³ Es zeichnet sich durch einen interdisziplinären Ansatz aus, der auf dem Prinzip des Systemdenkens beruht. Systemdenken beschreibt die Fähigkeit, komplexe Systeme als Ganzes zu betrach-

Abbildung 8: Konzept des Systems Engineerings



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Haberfellner 2012

ten und Wechselwirkungen innerhalb der Systeme zu verstehen.⁷⁴ Dementsprechend geht Systems Engineering über die isolierte Betrachtung einzelner Komponenten hinaus und nimmt die vielseitigen Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilen des Systems in den Blick.

Nach Haberfellner et. al. umfasst das Systems Engineering die dargestellten Bereiche der Denkweise von Systems Engineering sowie den Problemlösungsprozess, wie in Abbildung 8 dargestellt. Diese Denkweise umfasst das Systemdenken und das Vorgehensmodell. Das Vorgehensmodell wiederum gliedert den gesamten Entwicklungsprozess in Teilprozesse. Geeignete Instrumente in diesem Prozess sind die Systemgestaltung und das Projektmanagement. Mithilfe des Projektmanagements wird das Projekt organisiert, während im Rahmen der Systemgestaltung inhaltliche Lösungen erarbeitet werden.

Systems Engineering wird von unterschiedlichen Prinzipien geleitet. **Interdisziplinarität** ist wichtig, um unterschiedliche Perspektiven und Sichtweisen einzubeziehen und zu integrieren sowie Informationslücken zu schließen. **Holismus** bringt mit sich, den gesamten System- und Organisationskontext zu berücksichtigen, um die Auswirkungen von Änderungen zu verstehen. **Stakeholderzentrierung** ermöglicht, ein gemeinsames Verständnis der Anforderungen der Stakeholderinnen und Stakeholder zu entwickeln und Konsens darüber herzustellen, wie ein erfolgreiches Ergebnis aussehen könnte. **Wiederverwendung und Standardisierung**

spielen eine wichtige Rolle, um Lösungswissen zu nutzen und Prozesse zu standardisieren. **Risikogetriebene und evidenzbasierte Entscheidungsfindung** erfordert es, Alternativen zu finden und diese in Trade-off-Studien zu priorisieren sowie informelle Netzwerke zu nutzen. Im Rahmen der **frühen Validierung und Verifizierung** werden Prüfkriterien festgelegt und mithilfe von Modellen und Simulationen sowie unter Einbeziehung von Stakeholderinnen und Stakeholdern getestet. Validierung und Verifikation sind wichtig, um sicherzustellen, dass ein Produkt oder eine Dienstleistung die Anforderungen der Stakeholderinnen und Stakeholder erfüllt, und um potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Das **Schnittstellenmanagement** und dessen **Dokumentation** zielt darauf ab, Schnittstellen zu minimieren, ein einheitliches Verständnis zu fördern, Synergien aufzudecken und durch eine konsistente und transparente Aufzeichnung von Anforderungen, Entscheidungen und Vereinbarungen sicherzustellen, dass alle Beteiligten wissen, wie die Systemkomponenten zusammenwirken. **Effektivität steht über Effizienz**, um einen maximalen Wert mit verfügbaren Ressourcen zu erzielen und Alternativen zu bewerten. **Iteration und Anpassbarkeit** sind wichtig, um Systeme iterativ zu entwickeln und Prozesse bedarfsgerecht anzupassen. So kann flexibel auf neue Anforderungen reagiert werden. **Komplexität zur Bewältigung von Komplexität** erfordert komplexe Modelle und Organisationen, um komplexe Systeme abzubilden. Das trägt dazu bei, effektive Lösungen zu finden und die Leistung und Effizienz des Systems zu verbessern. **Top-down- und Up-front-Development** ermöglicht die Entwicklung in geschlossenen Phasen und das Front-Loading, um ein vollständiges Verständnis der Anforderungen zu erreichen.⁷⁵



Beim Systems Engineering geht es für mich um die Gestaltung von Produktions- und Produktsystemen auf übergeordneter Ebene, nicht um die Detaillierung. Das Ziel ist es, ein System zu schaffen, das in der Lage ist, den Kundenwunsch zu erfüllen.

Die wesentlichen Aspekte des Systems Engineerings aus Sicht der Fachleute

Während der Interviews bestätigten die Fachleute einige der oben genannten Prinzipien, zudem kamen weitere Aspekte auf, die für das Systems Engineering aus ihrer Sicht von Relevanz sind. Ein wichtiger Aspekt des Systems Engineerings ist den Fachleuten zufolge die Interdisziplinarität.⁷⁶ Dabei nannten sie verschiedene Disziplinen wie Ingenieurwissenschaften, Informatik oder Betriebswirtschaft, die in den Entwicklungsprozess einbezogen werden müssten. Durch die Zusammenarbeit und den Wissensaustausch verschiedener Disziplinen könnten ganzheitliche Lösungen entwickelt werden, die dazu beitragen, die Komplexität des Systems zu beherrschen.

⁷⁵ Vgl. Mundt et al. 2023.

⁷⁶ Vgl. INCOSE 2023.

⁷⁴ Vgl. Kaffenberger GfSE 2017.

Die Einbindung des Kunden ist nach Meinung der befragten Fachleute ein weiteres zentrales Merkmal des Systems Engineerings.⁷⁷ Der Kunde wird als integraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses betrachtet und aktiv in die Gestaltung des Systems einbezogen. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem Kunden können dessen Bedürfnisse, Anforderungen und Erwartungen besser verstanden und in das Systemdesign integriert werden. Dies ermöglicht die Entwicklung maßgeschneiderter Lösungen, die den Anforderungen des Kunden gerecht werden. So kann eine fortwährende Validierung mit dem Kunden stattfinden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Systems Engineerings, den die Fachleute nannten, ist eine soziotechnische Sichtweise auf das Projekt,⁷⁸ also nicht nur technische Aspekte, sondern auch soziale und organisatorische zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass bei der Entwicklung von Systemen auch die Auswirkungen auf den Menschen, die Organisation und die Gesellschaft berücksichtigt werden. Damit können Lösungen entwickelt werden, die sowohl technisch als auch sozial nachhaltig sind und den Menschen in seinem Arbeitsumfeld unterstützen.

Eine Herausforderung aus Sicht der Fachleute besteht zudem darin, die Produktionssysteme so zu entwickeln, dass sie mit anderen Systemen interagieren und in einen Verbund unabhängiger Systeme integriert werden können. Dies stellt eine der zentralen Herausforderungen für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme und das Spannungsfeld zwischen Autonomie und Wandelbarkeit dar (siehe Kapitel 4.2.1). Dieser Verbund, in dem eine zeit- und ortsabhängige Kooperation zwischen den Systemen stattfindet, wird als System of Systems (SoS) bezeichnet.⁷⁹ Autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme gehören zu diesen Systemen. Ein Beispiel sind verschiedene Maschinen, die als Produktionssystem zusammenarbeiten, oder ein fahrerloses Transportsystem (FTS), das mit der Umgebung und den Maschinen kommuniziert. Deshalb gilt es, die Interaktion zwischen den Systemen über Schnittstellen bereits im Engineering Prozess zu berücksichtigen.

5.4.2. Verknüpfung mit dem Produktionskontext

Die Entwicklung von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen bringt zahlreiche neue Merkmale von Produktionssystemen mit sich, wie etwa die Selbstauskunftsfähigkeit oder Innovationen quasi in Nullzeit (siehe Kapitel 4.2 und 4.3). Dabei ist aber bisher unklar, wie autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme entwickelt werden können. Die bisherige Analyse hat gezeigt, dass die wesentliche Herausforderung aktuell darin besteht, Methoden aus dem Engineering im Produktionskontext mit Methoden des Systems Engineerings zu verbinden. Dieses Kapitel beleuchtet, wie das Engineering künftig gestaltet werden muss, um die Entwicklung dieser Systeme zu fördern sowie die Schlüsselfaktoren des Systems Engi-

neerings und der Engineering-Methoden aus dem Produktionskontext. Abbildung 9 zeigt die Vision der Verzahnung der beiden Bereiche des Systems Engineerings mit den Methoden des Engineerings im Produktionskontext.⁸⁰

Wichtige Aspekte des Systems Engineerings für Produktionssysteme

Um Systeme im Produktionskontext zu entwickeln, wird Erfahrungswissen genutzt und in ein lernendes System eingespeist. Dieses System kennt dann die Anforderungen und Rahmenbedingungen und ist in der Lage, sich selbst zu optimieren und kontinuierlich zu verbessern.

Das System sollte über die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus hinausdenken können, potenzielle Herausforderungen oder Probleme antizipieren und passende Lösungen entwickeln. Dies ermöglicht eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Systeme während ihrer gesamten Lebensdauer.

Ein wesentlicher Faktor eines erfolgreichen Systems Engineerings im Produktionskontext ist, Veränderungen stetig berücksichtigen zu können. Aufgrund des sich rapide ändernden Geschäftsumfelds und der technologischen Entwicklungen müssen Systeme in der Lage sein, sich an neue Anforderungen und Rahmenbedingungen anzupassen. Dies erfordert eine aktive Einbindung des Kunden, ein starkes Co-Design in der Entwicklung und eine kontinuierliche Validierung des Systems im Produktentwicklungsprozess.

These 9: Die Kombination von Methoden des Systems Engineerings und der Produktionssystementwicklung bietet die Möglichkeit, schnell auf sich rasch ändernde Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen zu reagieren.

Anzumerken ist, dass der Kunde in diesem Zusammenhang nicht notwendigerweise der Endkunde des Produkts ist, sondern vielmehr der Kunde und Nutzer der Produktionssysteme oder -anlagen. Systems Engineering zielt darauf ab, die Bedürfnisse und Anforderungen dieser Kunden und Nutzer zu verstehen und in den Entwurf der Systeme zu integrieren.

Die Verwendung modellbasierter Darstellungen im Umfeld des Systems Engineerings erleichtert die Kommunikation und Validierung mit dem Kunden und allen relevanten Fachleuten, indem entsprechende Ablauf- und Funktionsdiagramme den Beteiligten ihre Rollen und Aufgaben zuweisen. Eine gängige Modellierungssprache ist die Systems Modelling Language (SysML), die vielfach in Unternehmen verwendet wird.

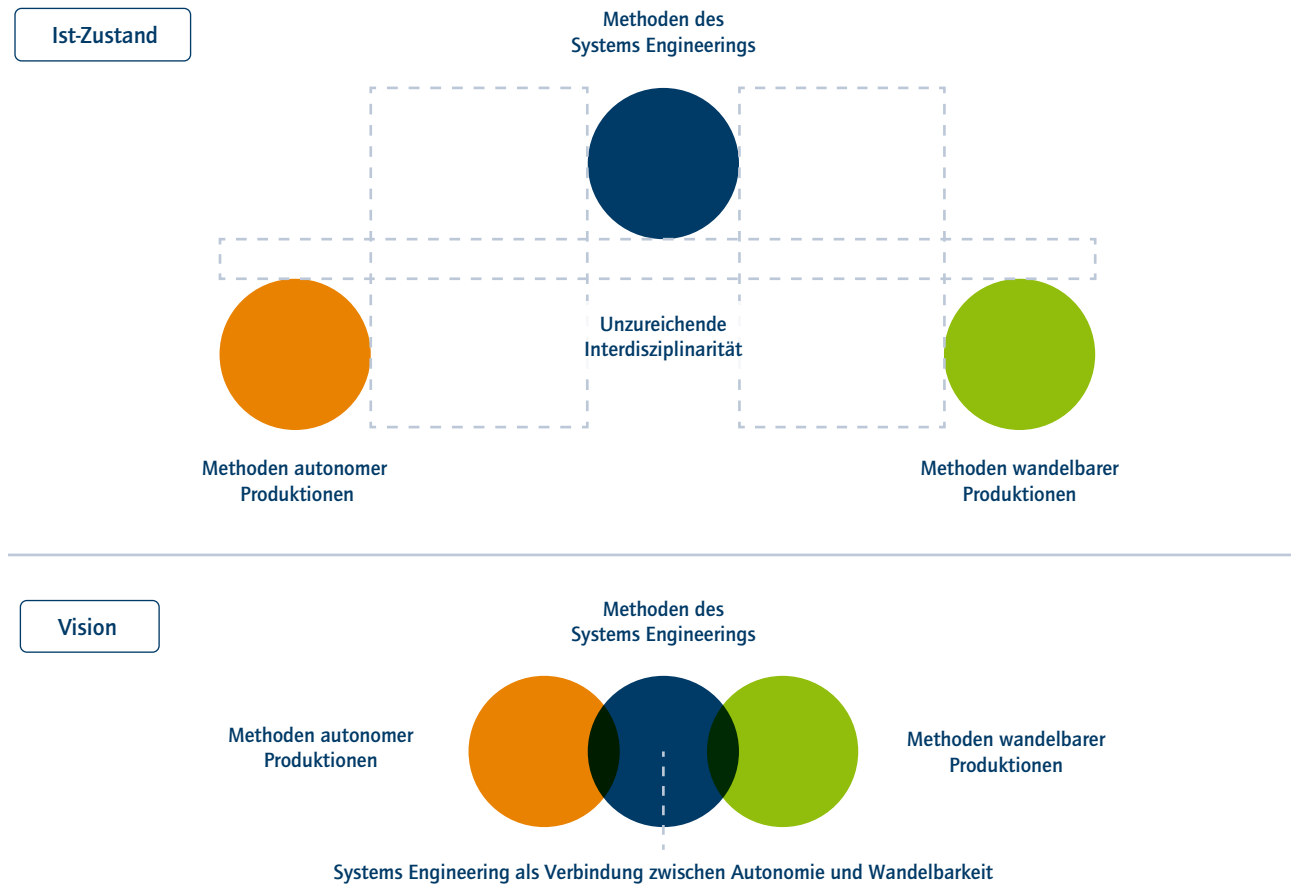
77 Vgl. Kübler et al. 2018.

78 Vgl. INCOSE 2023; Soliman und Saurin 2017.

79 Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

80 Vgl. acatech 2024; Hirsch-Kreinsen et al. 2022.

Abbildung 9: Vision des Engineerings im Produktionskontext und Systems Engineering



Quelle: eigene Darstellung



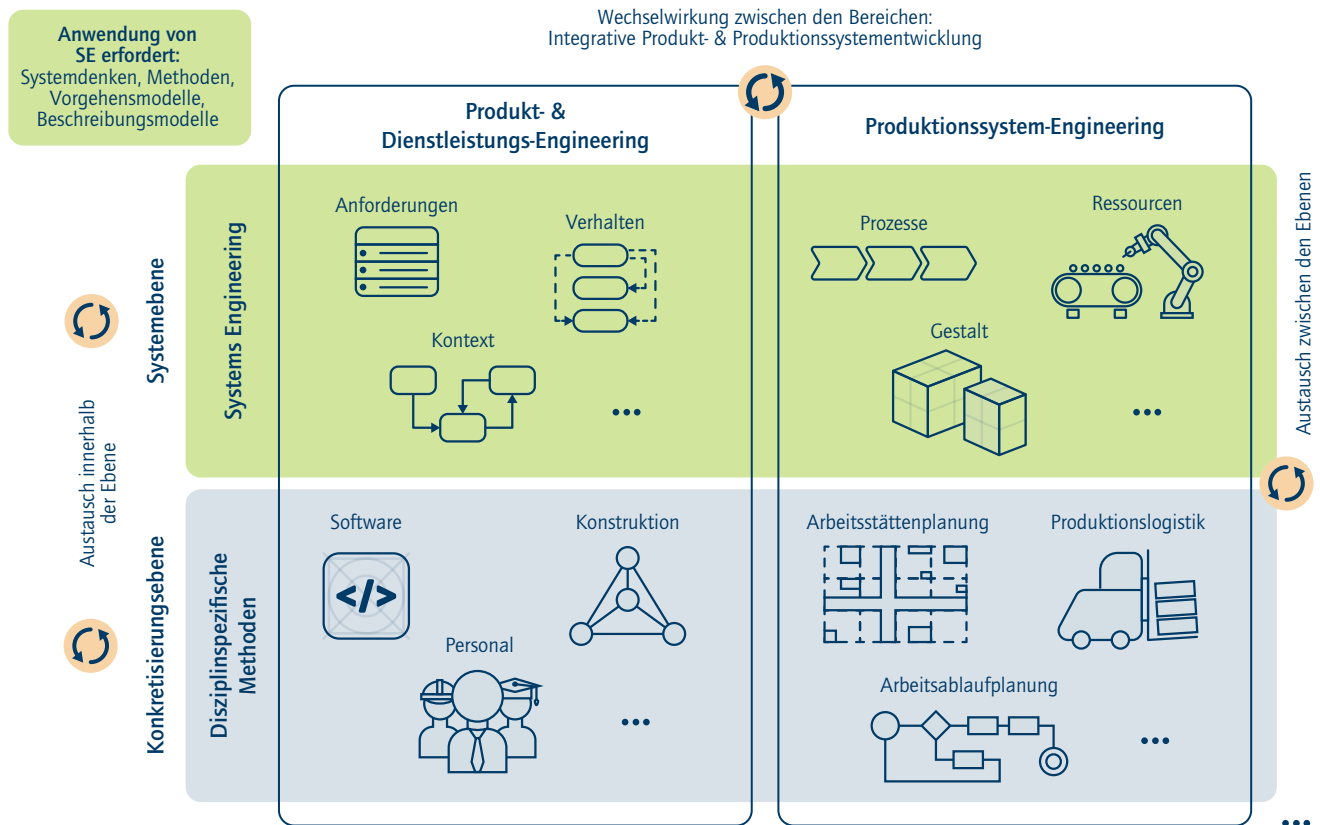
Derzeit halte ich SysML für zu strikt und zu wenig offen. Stattdessen denke ich eher an den Einsatz von Wissensgraphen, die sich gegenseitig bedienen können.

Sicherheit ist ein wichtiger Faktor in der Entwicklung. Autonomie und Wandelbarkeit stellen neue Herausforderungen an die Sicherheit, was von Anfang an mitgedacht werden muss. Hier helfen Methoden wie Modellbasiertes Systems Engineering (MBSE), Risikoanalyseverfahren, spezifische Methoden zur Verifikation sowie fortgeschrittene Simulationstechniken, mithilfe derer das Verhalten der Systeme unter verschiedenen Bedingungen analysiert und getestet werden kann. So hilfreich diese Methoden sind, stoßen sie dennoch manchmal an Grenzen. Dies muss beobachtet und gegebenenfalls an die spezifischen Herausforderungen der autonom wandelbaren Systeme angepasst werden. Möglicherweise müssen auch neue Methoden entwickelt werden, die noch stärker auf die Komplexität und die dynamische Natur der Systeme ausgerichtet sind.

Forschungsbedarf besteht derzeit außerdem bei der Frage, wie ein Modell aussehen könnte, das das interdisziplinäre Engineering von Produktionssystemen ermöglicht und die Daten in Form eines Systemmodells abbildet. Ein solches Modell, das alle Aspekte einer Produktion beinhaltet, dient als einheitlicher Referenzrahmen und unterstützt eine effiziente Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen. Ein derartiges Modell hilft auch, komplexe Zusammenhänge zu verstehen, potenzielle Probleme durch Rückverfolgbarkeit frühzeitig zu erkennen und fundierte Entscheidungen zu treffen. Zukünftige Forschungsbemühungen sollten daher darauf abzielen, ein solches Beschreibungsmodell zu entwickeln, um die Effizienz und Qualität von Produktionssystemen weiter zu verbessern.

These 10: Es fehlt ein Beschreibungsmodell, das es ermöglicht, alle Aspekte einer Produktion interdisziplinär abzubilden (Systemmodell), z. B. zur Erfassung der Ist-Situation und zur Abschätzung der Einflüsse bei Änderungen (Stichwort: Traceability).

Abbildung 10: Integratives Engineering im Produktionskontext mit Systems-Engineering-Elementen



Quelle: eigene Darstellung

Die Verwendung eines gemeinsamen Beschreibungsmodells bietet die Möglichkeit, Daten aus der Produkt- und Produktionssystementwicklung und Autonomie und Wandelbarkeit miteinander zu verknüpfen (siehe Abbildung 10). Dabei kann Systems Engineering als Rahmen für diesen Austausch dienen, in dem Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem abgebildet werden können.

Auf der Systemebene kommen vor allem Systemdenken, Methoden, Vorgehensmodelle und Beschreibungsmodelle, die dem Systems Engineering zuzuordnen sind, zur Anwendung. Das Produkt- und Dienstleistungsengineering umfasst unter anderem Anforderungen, Verhalten und Kontext, während im Produktionssystemengineering Prozesse, Ressourcen und Gestalt verwendet werden. Sobald der Entwurf konkreter wird (Konkretisierungsebene), kommen disziplinspezifische Methoden zum Einsatz. Ein agiles oder iterati-

ves Projektmanagement ermöglicht es, immer wieder zwischen den Ebenen zu wechseln. So entsteht eine Verzahnung zwischen den Bereichen des Produkt- und Dienstleistungs-Engineering und dem Produktionssystemengineering.

Die Kombination aus Methoden des Systems Engineerings und klassischen Methoden zur Entwicklung von Produktionssystemen bieten den Vorteil, dass nicht nur Mitarbeitende eines Unternehmens gemeinsam an Produktionssystemen arbeiten können, sondern dass auch ein Austausch mit den Mitarbeitenden bei den Maschinenzulieferern möglich ist. Im Rahmen von System of Systems (siehe 5.4.1) lässt sich das in das unternehmensinterne Produktionssystem integrieren. Dieses Vorgehen ermöglicht, sowohl an Autonomie als auch Wandelbarkeit zu arbeiten und so dem Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme den Weg zu bereiten.

5.4.3. Die Schlüsselfaktoren des Systems Engineerings für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme

Gemäß der Definition (siehe Kapitel 5.4.1) und Einordnung der Fachleute sind im Systems Engineering die folgenden Punkte besonders relevant. Dabei wird das Systems Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen im Vergleich zum bisherigen Engineering im Produktionskontext betrachtet. Dementsprechend lässt sich ein Wandel des Engineerings von Industrie 4.0-Systemen durch das Systems Engineering beobachten (siehe Abbildung 11). Im Folgenden ist der schrittweise Wandel des Engineerings von einer Vernetzung des Engineerings hin zu einem interdisziplinären Systems Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen dargestellt.

Ganzheitlicher Ansatz

In der Entwicklung autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme wird das gesamte System aus Produkt und Produktionssystem als Einheit betrachtet. Dabei werden Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten berücksichtigt und deren Zusammenspiel optimiert.



Wir müssen produktübergreifend engineeren und nicht mehr so stark in Silos denken.

Interdisziplinarität

Die Entwicklung autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme erfordert die Zusammenarbeit und Integration verschiedener Fachdisziplinen wie der Ingenieurwissenschaften, der Informatik oder der Betriebswirtschaft. So lassen sich innovative Lösungen entwickeln, die der Komplexität von Industrie 4.0-Systemen gerecht werden.

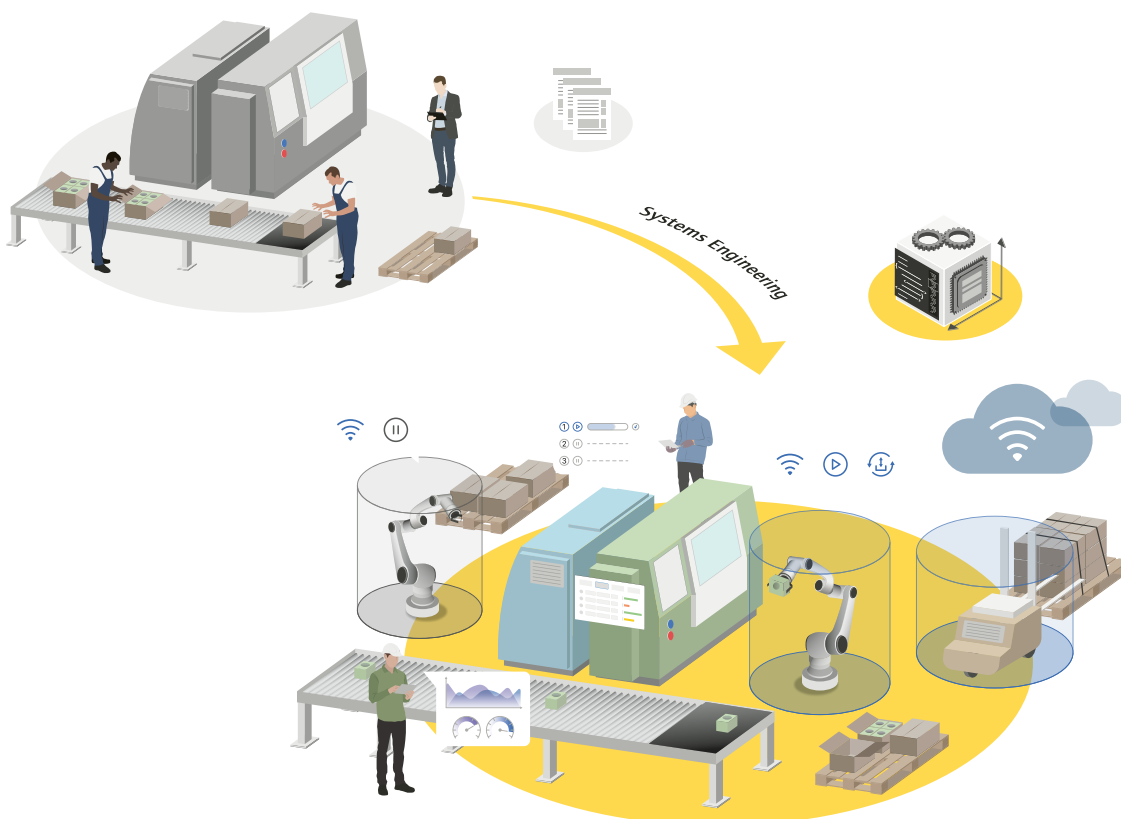


Es braucht Fachkräfte, die abseits von dem reinen technologischen Wissen auch interdisziplinäre Kompetenzen mitbringen.

Kundenintegration

Das Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme nimmt die Einbindung des Kunden in den Fokus. Der Kunde wird als integraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses betrachtet und aktiv in die Gestaltung und Validierung des Systems ein-

Abbildung 11: Wandel des Engineerings von Industrie 4.0-Systemen durch Systems Engineering



bezogen. Dies ermöglicht, seine Anforderungen stärker zu berücksichtigen und maßgeschneiderte Lösungen zu erarbeiten. Dabei ist eine simple Bestandsaufnahme der Anforderungen an das Produkt nicht ausreichend, vielmehr muss der Kunde in den Produktentwicklungsprozess eingebunden werden. Ein Best Practice für eine Validierungsmethode ist beispielsweise die Lead-User-Methode, bei der besonders innovative Kunden identifiziert und in die Produktentwicklung involviert werden⁸¹.



Durch unser Systems Engineering zwingen wir potenzielle Kunden derzeit dazu, sich selbst die Frage zu stellen: Was sind die Unterschiede in meinem Produkt? Oftmals sind die unterschiedlichen Produkte, die eine wandlungsfähige Produktionsanlage benötigen, jedoch nicht klar definiert.

Dynamische Anpassungsfähigkeit

Im Gegensatz zum bisherigen Engineering im Produktionskontext berücksichtigt das Systems Engineering mit der Transparenz und Rückverfolgbarkeit der Wechselwirkungen auf Gesamtsystemebene, dass autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme dynamisch anpassbar gestaltet werden müssen. Aufgrund der sich schnell ändernden Rahmenbedingungen und technologischen Entwicklungen müssen diese Systeme in der Lage sein, sich flexibel an neue Anforderungen anzupassen und sich kontinuierlich zu verbessern.



Als großer Fan der modellgetriebenen Entwicklung in der Informatik finde ich Advanced Systems Engineering großartig. Mit diesen Modellen lassen sich großartige Dinge erreichen, einschließlich der Ableitung des Produktionssystems aus dem Produkt und der Prüfung auf Autonomie und Anpassungsfähigkeit des Produktionssystems.

Integration digitaler Technologien

Das Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme erfordert den Einsatz fortschrittlicher digitaler Technologien wie IoT, KI oder Big-Data-Analysen. Mittels dieser Technologien können Systeme umfassend vernetzt und überwacht werden, die wiederum das Engineering einer effizienten und intelligenten Produktion ermöglichen. Dabei ist es zudem entscheidend, die Potenziale und Auswirkungen von verschiedenen Lösungen zu vergleichen und mögliche Wechselwirkungen sichtbar zu machen.

Außerdem erfordert die Entwicklung und Inbetriebnahme autonomer Produktionsanlagen eine Erweiterung der traditionellen Fabrikplanung um Aspekte des Software-Engineerings und der Automatisierungstechnik. Datenmanagement, das Verständnis und die Integration komplexer Softwarestrukturen sowie die Berücksichtigung von Automatisierungsfragen sind entscheidend für hochentwickelte, effiziente und flexible Produktionsprozesse.



Es besteht durchaus der Anspruch, dies möglicherweise sogar bis zu einem gewissen Grad zu automatisieren. Das bedeutet, dass ich die Informationen aus dem Model-based Systems Engineering nutze, um generisch meine CAD-Modelle oder meine mechanische Konstruktion abzuleiten.

Soziotechnische Aspekte

Fachleute weisen darauf hin, dass Systeme, wie wir sie heute kennen und auch für die Zukunft planen, grundsätzlich als soziotechnische Systeme mit vielschichtigen Wechselwirkungen wahrgenommen werden müssen. In der Literatur sind unterschiedliche Rahmenwerke und Ansätze der soziotechnischen Betrachtungsweise zu finden. Dabei hat sich insbesondere die integrative Betrachtungsweise der drei Dimensionen Mensch, Technologie und Organisation als sinnvoll erwiesen.⁸²

Gerade im Kontext von Industrie 4.0 und Transformationsprozessen ist eine solche Betrachtung relevant, da sich durch innovative Schlüsseltechnologien wie KI und IoT, die Systeme sowie die gesamte Entwicklung in der Industrie 4.0 maßgeblich verändern.⁸³ Beim Engineering von Produkt- und Produktionssystem ist die ganzheitliche Betrachtung des Gesamtsystems als soziotechnisches System ein entscheidender Erfolgsfaktor.⁸⁴

Die Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen und Dimensionen sind überaus vielschichtig und komplex. Mit zunehmender Vernetzung von cyber-physischen Systemen und der Integration smarter Technologien in den Arbeitsalltag nimmt auch die Bedeutung des Menschen stark zu. Die Veränderungen erfordern nämlich, dass organisatorische Prozesse und Strukturen so gestaltet werden, dass sie das Engineering sowie die Implementierung und Nutzung der Technologie unterstützen.⁸⁵

81 Vgl. Backhaus und Voeth 2015.

82 Vgl. Ulich 2013; Schallmo et al. 2023.

83 Vgl. Winkelhaus et al. 2021.

84 Vgl. acatech 2018.

85 Vgl. Winkelhaus et al. 2021.

Interessant ist hierbei, dass die befragten Fachleute nicht die technische Umsetzung als zentrale Herausforderung einstufen, sondern eher die interdisziplinären Anteile – also beispielsweise die Fragen, wie Synergien gestärkt und Konflikte zwischen den einzelnen Ebenen vermieden werden können. Die Berücksichtigung dieser Ebenen soll sicherstellen, dass das Engineering zukünftiger Systeme nicht nur technisch robuste Systeme hervorbringt, sondern diese auch in realen sozialen und organisatorischen Kontexten funktionieren.

Derzeit fehlt es an noch an Forschungsergebnissen, die Autonomie und Wandelbarkeit betrachten. Zwar bilden vorhandene Daten eine solide Grundlage. Sie reichen jedoch nicht aus, um die einzigartigen Anforderungen und Herausforderungen zu adressieren, die mit der Entwicklung von wirklich autonomen und flexibel anpassbaren Produktionssystemen einhergehen.

Dies umfasst etwa die Entwicklung und Validierung von Methoden und Prozessen, die speziell darauf ausgelegt sind, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Effizienz bei der kontinuierlichen Anpassung an sich ändernde Produktionsbedingungen und -anforderungen zu gewährleisten. Nur eine stärkere Fokussierung auf diese Schlüsselaspekte kann das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen entscheidend voranbringen und deren Potenzial voll ausschöpfen.

5.5. Ein Blick auf Standards, Richtlinien und Normen

Die Zusammenarbeit zwischen Organisationen und Unternehmen orientiert sich häufig an Standards, Richtlinien und Normen. Sie bilden eine gemeinsame Basis, aufgrund der Daten ausgetauscht und die Entwicklungszusammenarbeit strukturiert werden können. Deshalb wirft dieses Kapitel Licht auf Normen und Richtlinien, die das Systems Engineering für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme unterstützen.

Bestehende Normen und Richtlinien sind keine geeigneten Instrumente für aktuell und künftig benötigte Planungsprozesse

Die ISO 15288⁸⁶ und die VDI 2206⁸⁷ sind etablierte Normen und Richtlinien, die sich mit dem Engineering und der Entwicklung von Systemen befassen. Allerdings weisen beide Normen Defizite auf, wenn es um die Integration der Produktionssystementwicklung geht.

Die ISO 15288 fokussiert sich auf die Entwicklung von Systemen durch Systems Engineering, ohne speziell auf Produktionssysteme einzugehen.

So mangelt es auch an einem umfassenden Beschreibungsmodell, das alle Aspekte einer Produktion interdisziplinär abbildet. Ebenso fehlen klare Schnittstellen, die eine nahtlose Verbindung zwischen Systems Engineering und Engineering im Produktionskontext herstellen.

Ähnlich verhält es sich mit der Richtlinie VDI 2206, die die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme auf Basis des V-Modells darstellt. Allerdings liefert auch diese Richtlinie keine Instrumente, um die Produktionssystementwicklung in den Gesamtprozess zu integrieren.

Diese Leerstellen führen dazu, dass bei der Entwicklung von Produktionssystemen häufig verschiedene Normen und Richtlinien kombiniert werden müssen, um alle relevanten Aspekte abzudecken. Eine einheitliche Methode oder ein Modell, das alle Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Disziplinen des Engineering-Prozesses berücksichtigt, existiert bislang nicht.

Um diesen Mangel zu beheben, sollten sich zukünftige Entwicklungen und Forschungsarbeiten darauf konzentrieren, ein integriertes Beschreibungsmodell für die Entwicklung von Produktionssystemen für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme zu schaffen und in Form einer Norm oder Richtlinie zu etablieren. Dabei sollten bestehende Normen wie die VDI 5200⁸⁸ zur Digitalen Fabrik oder die geplante VDI 5000 zum Digitalen Fabrikzwilling berücksichtigt werden.

These 11: Es fehlt eine Vorgehensweise für Planungsprozesse in der Smart Factory in Anlehnung an die VDI 5200 für die Fabrikplanung.

Standards bilden die Grundlage für ein erfolgreiches Engineering

Die immense Vielfalt der bestehenden Standards zum Datenaustausch stellt nach Meinung der Fachleute eine Herausforderung in Industrie 4.0-Systemen dar. Nicht jeder Kunde verwendet den gleichen Standard, sodass enormer Aufwand für die Vereinheitlichung und Zusammenführung der Standards betrieben werden muss. Diese Vielfalt erschwert die Kommunikation zwischen Kunden und Unternehmen und erfordert Anpassungen von Dritten.

Um effizient arbeiten zu können, ist es wichtig, einheitliche Standards zu etablieren. Die befragten Fachleute sehen darin einen Innovationstreiber. Denn einheitliche Standards gestatten Unternehmen und Kunden eine reibungslose Zusammenarbeit und steigern die Effizienz.

86 Vgl. ISO/IEC/IEEE 15288.

87 Vgl. VDI-Richtlinie VDI2206a.

88 Vgl. VDI-Richtlinie VDI5200-1.

In diesem Zusammenhang haben sich einige Standards weitgehend etabliert.⁸⁹ Dazu gehören Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA), Manufacturing Test Protocol (MTP) und Asset Administration Shell (AAS). Diese Standards werden von vielen Unternehmen eingesetzt und ermöglichen eine bessere Kommunikation und Integration von Systemen.

Darüber hinaus gibt es weitere Standards wie Automation ML (IEC 62714) oder AS (Automation System) die ebenfalls in der Industrie 4.0 eingesetzt werden. Diese Standards tragen zur Vereinheitlichung bei und ermöglichen eine nahtlose Integration unterschiedlicher Systeme und Geräte.

Der Trend geht hin zu einer Vereinheitlichung von Tools und Schnittstellen. Mithilfe einheitlicher Standards können Unternehmen effizienter arbeiten.



Es ist wichtig, Standards frühzeitig einzuführen und einen einheitlichen Standard zu etablieren, um die Zusammenarbeit zu ermöglichen.

5.6. Zusammenfassung

Frage 2 (Kapitel 5): Wie sieht das Engineering von Produktionssystemen in der heutigen Zeit aus und welche Herausforderungen ergeben sich dabei insbesondere im Hinblick auf autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme?

Das Engineering von Produktionssystemen ist ein komplexer Prozess, bei dem sowohl die Perspektive des Herstellers als auch die des Nutzers berücksichtigt werden muss. Der Hersteller konzentriert sich auf die Entwicklung und Produktion des Systems selbst, während der Nutzer das System als Werkzeug zur Herstellung eigener Produkte betrachtet. Für beide Fälle gibt es entsprechende Entwicklungsmethoden. Klassische Produktentwicklungsmethoden kommen dann zum Einsatz, wenn das Produktionssystem aus Sicht des Herstellers betrachtet wird. Aus Perspektive des Nutzers hingegen ist die Fabrikplanung zentral, bei der ein Produktionssystem aus verschiedenen Maschinen und Systemen zusammengestellt wird. Innerhalb der Entwicklung von Produktionssystemen gibt es Ansätze zur Planung autonomer und wandelbarer Produktionssysteme, jedoch keine übergreifenden Ansätze für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme.

Das Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz, der auf dem Systemdenken basiert. Die Einbeziehung des Kunden ermöglicht es, maßgeschneiderte Lösungen zu entwickeln und soziotechnische Aspekte zu berücksichtigen, um sowohl technisch als auch sozial nachhaltige Systeme zu schaffen. Mithilfe dieser Herangehensweise können komplexe Herausforderungen effizient bewältigt und innovative Lösungen entwickelt werden.

Beim Systems Engineering für Produktionssysteme werden Erfahrungswerte genutzt und in ein lernendes System eingespeist. Dieses lernende System kennt die Anforderungen und Rahmenbedingungen der Produktionssysteme und optimiert sich selbst, denkt über Lebensphasen hinaus und erkennt potenzielle Herausforderungen. Auch sollte es in der Lage sein, Veränderungen zu berücksichtigen und sich an diese dynamisch anzupassen. Kunden und Nutzer der Produktionssysteme müssen in diese Überlegungen aktiv eingebunden werden. Dabei erleichtern modellbasierte Darstellungen die Kommunikation und Validierung. Dem Einsatz des Systems Engineerings in der Entwicklung autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme sind jedoch Grenzen gesetzt, da die dynamische Entwicklung von Produktionssystemen häufig nicht explizit berücksichtigt wird oder klare Schnittstellen zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung fehlen.

Das Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme zeichnet sich aus durch einen ganzheitlichen Ansatz, Interdisziplinarität, Kundenintegration, dynamische Anpassungsfähigkeit und die Integration digitaler Technologien. Es betrachtet das gesamte System bestehend aus Produkt und Produktionssystem, arbeitet interdisziplinär, bindet den Kunden aktiv ein, passt sich dynamisch an und nutzt fortschrittliche digitale Technologien. Dadurch können innovative Lösungen entwickelt werden, die den Anforderungen von Industrie 4.0-Systemen gerecht werden.

Eine Herausforderung von Industrie 4.0-Systemen ist die Vielfalt der bestehenden Standards, die die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen Kunden und Unternehmen erschwert. Einheitliche Standards sind wichtig, um Effizienz zu steigern. Standards wie OPC UA, MTP und AAS werden bereits eingesetzt, um die Kommunikation und Integration von Systemen zu verbessern. Weitere Standards wie Automation ML, AS und DexP tragen zur Vereinheitlichung bei.

⁸⁹ Vgl. Kern 2021; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2017.

Eine ganzheitliche Betrachtung der Systeme als soziotechnische Systeme, die die Wechselwirkungen zwischen Mensch, Technologie und Organisation berücksichtigt, ist entscheidend für den Erfolg der Projekte. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass mit zunehmender Vernetzung und Integration smarter Technologien die Bedeutung des Menschen zunimmt. Demensprechend müssen organisatorische Prozesse das Engineering und die Nutzung der Technologie flankieren. Synergien, Konflikte und Herausforderungen, die im Zusammenspiel der Dimensionen entstehen, müssen verhandelt werden. Ein Faktor, der dazu positiv beiträgt, ist die effektive und effiziente Verankerung der Systeme in realen sozialen und organisatorischen Kontexten.

Die meisten Fachleute, die im Bereich Industrie 4.0 tätig sind, sind mit dem Begriff des Systems Engineerings vertraut, gaben aber auch zu Protokoll, dass sie es derzeit nicht einsetzen, da bewährte Methoden aus ihrer Sicht ausreichen.

Generell fehlt es an einer engen Verbindung zwischen dem Systems Engineering und dem Engineering von Produktionssystemen; die Schnittmenge beider Disziplinen ist bisher begrenzt, daher ist eine intensivere Zusammenarbeit zwischen ihnen notwendig.

6. Best Practices aus Unternehmen

Dieses Kapitel gewährt Einblicke in aktuelle Lösungen und Ansätze im Bereich des Systems Engineerings autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme. Hierzu werden konkrete Beispiele von führenden Industrieunternehmen, die ihre Produktion im Sinne der Zukunftsfähigkeit weiterentwickelt haben, vorgestellt (siehe Kapitel 6.1). Diese Best Practices verdeutlichen nicht nur die Herausforderungen und Motivationen, die Unternehmen dazu bewegen, ihre Produktionssysteme weiterzuentwickeln, sondern bieten auch Einblicke in Lösungsansätze und die verschiedenen Herangehensweisen an das Thema. Auffällig ist: Die Beispiele aus der Industrie werden gerne geteilt und zugänglich gemacht, aber fokussieren vor allem die technischen Lösungen und die daraus resultierende Umgestaltung der Produktion. Einblicke in den Engineering-Prozess werden nur selten gewährt. Die Aufbereitung in dieser Expertise basiert auf schriftlichen Quellen (siehe Verweise) sowie auf den Gesprächen mit den Fachleuten. Die Auswahl der Beispiele ergab sich aus den in den Interviews genannten Best Practices und den verfügbaren Informationen aus öffentlichen Quellen. Die Beispiele geben einen Einblick in Aktivitäten von Unternehmen unterschiedlicher Standorte, Unternehmensgrößen und Herausforderungen.

Es ist wichtig zu betonen, dass die Best-Practice-Beispiele fortschrittlich sind, aber nur Teilaspekte autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme widerspiegeln. Es besteht eine gewisse Diskrepanz zwischen dem Stand der Forschung und den Entwicklungen in der Industrie: Während die Forschung daran arbeitet, ein umfassendes Verständnis und integrierte Ansätze für die Autonomie und Wandelbarkeit solcher Systeme zu entwickeln, präsentiert die Industrie hoch entwickelte, spezialisierte Lösungen.

In den Befragungen nannten die Fachleute einige Faktoren, die aus ihrer Sicht entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0-Lösungen sind. Im Folgenden findet sich eine Auswahl dieser Faktoren. Dabei wird der Bezug zu den Prinzipien des Systems Engineerings hergestellt (siehe Kapitel 6.2).

Abschließend werden die Kompetenzen diskutiert, die für die erfolgreiche Entwicklung autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme notwendig sind (siehe Kapitel 6.3).

Insgesamt wird in diesem Kapitel die folgende Forschungsfrage beantwortet:

Frage 3 (Kapitel 6): Welche Best Practices bestehen in der Industrie und welche Kompetenzprofile werden für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen benötigt?

6.1. Beispiele aus Industrieunternehmen

Im Folgenden werden vier Beispiele aus Industrieunternehmen beschrieben. Diese umfassen die Smart Factory im Werkzeugbau bei KAMAX, die *Fabrik der Zukunft* der Porsche AG in Zuffenhausen, die Matrixproduktion im Fluss der Siemens AG und die *Datenfabrik.NRW*.

6.1.1. Smart Factory im Werkzeugbau bei KAMAX

Das Unternehmen KAMAX ist Hersteller von Verbindungselementen und Bolzen für die Automobilindustrie. Weniger darauf ausgerichtet, eine Smart Factory aufzubauen, als vielmehr mit dem Ziel, die bisherige Lieferzeit von sechs bis acht Wochen drastisch zu reduzieren, hat das Unternehmen KAMAX beispielhaft eine Fabrik für den Werkzeugbau entwickelt, die sich durch Wandelbarkeit auszeichnet. Das Ergebnis ist ein vollständig digitalisierter Geschäftsprozess von der Auftragserstellung über die Produktentwicklung, die Konstruktion, die Fertigung bis hin zur Abwicklung von Einzelaufträgen mit einer Durchlaufzeitreduktion auf unter zehn Prozent. Der Fokus in diesem Best Practice liegt auf der Wandelbarkeit. Hier wird aktuell keine Kombination aus Autonomie und Wandelbarkeit eingesetzt.

Herausforderungen und Motivation

Die Fähigkeit zur Lieferung kundenindividueller Produkte in Losgröße 1 und just-in-time ist entscheidend für den zukünftigen Markterfolg von KAMAX. Das Unternehmen muss aufgrund seiner geringen Größe mit begrenzter Logistik und Personal viele Kunden bedienen und hat sich das Ziel gesetzt, die Lieferzeiten erheblich zu reduzieren. Gleichzeitig soll weiterhin höchste Produktqualität und kosteneffiziente Produktion gewährleistet werden. Herausfordernd ist hierbei die zum Einsatz kommende Umformtechnik bei den in der Produktion genutzten Werkzeugen. Hier herrschen zwei wesentliche Herausforderungen: Die Lieferzeit ist entscheidend für den Erfolg, insbesondere bei Neuanläufen. Außerdem erfolgt die Lösungsfindung und werkzeugseitige Umsetzung einer optimalen Umformstrategie oft iterativ. Diese Abhängigkeiten wollte man bei der Entwicklung der Smart Factory adressieren, gleichzeitig die Qualitätsstandards beibehalten sowie Lieferzeiten reduzieren.

Lösungsansatz

Um das Problem zu lösen, betrachtete das Unternehmen es ganzheitlich, was in folgenden Maßnahmen resultierte:

- **Standardisierung und Modularisierung:** Die Entwicklung eines einheitlichen Werkzeugstandards ermöglicht die Modularisierung der Werkzeuge. Dies erleichtert die Anpassung an unterschiedliche Anforderungen und beschleunigt die Produktion.

- **Automatisierung der Produktionsprozesse:** Durch Automatisierung können Produktionsprozesse effizienter gestaltet und Fehler minimiert werden.
- **Digitale Transformation der Geschäftsprozesse:** Eine durchgängige Digitalisierung der Geschäftsprozesse verbessert die Effizienz und die Kommunikation in der gesamten Wertschöpfungskette.
- **Entwicklung eines Wissensmanagementsystems:** Die Überführung von implizitem Wissen in explizite Regeln und die standardisierte Vorgehensweise werden durch ein Wissensmanagementsystem ermöglicht, das maschinell lesbar ist und Informationen verwertbar aufbereitet.
- **Iterative Prozesse mit Predictive Quality Analytics:** Die Optimierung von Iterationsschleifen erfolgt in Echtzeit durch ein Predictive Quality Analytics System, um Fertigungsabweichungen zu kompensieren und die Standmenge zu erhöhen.

Engineering der Smart Factory

In der Konzeption hat das Unternehmen einen ganzheitlichen Ansatz gewählt, bei dem die Verknüpfung von Produktentstehung und Produktionssystemgestaltung im Mittelpunkt steht. Um diesem Ansatz gerecht zu werden, mussten die Systeme und insbesondere die Schnittstellen aller beteiligten Fachabteilungen harmonisiert werden. Dabei stand die vertikale und horizontale Integration sowohl für kaufmännische als auch Produkt-Engineering-Daten und Produktionssystem-Planungssysteme im Fokus. Standardisierte Schnittstellen und der Einsatz neuer Systeme zur Schließung von Lücken trugen dazu bei, den Informationsfluss zu verbessern. An diesem Beispiel zeigt sich, dass die interdisziplinäre Verflechtung der Fachbereiche im Unternehmen und Kooperation sowie Kommunikation aller Bereiche im Engineering-Prozess entscheidend sind.⁹⁰

6.1.2. Fabrik der Zukunft Porsche Zuffenhausen

Mit der *Fabrik der Zukunft* entwickelte die Porsche AG einen zukunftsfähigen Produktionsstandort, der den Herausforderungen einer Produktion von modernen Elektrofahrzeugen gerecht wird und gleichzeitig die besonderen bestehenden räumlichen Restriktionen aufgrund des historischen Standorts adressiert.

Herausforderungen und Motivation

Ziel des Projekts war die Transformation des historischen Porsche-Standorts Zuffenhausen zu einem Zentrum für die Produktion von Elektrofahrzeugen. Dabei stellten räumliche Gegebenheiten des Standorts das Unternehmen Porsche vor besondere Herausforderungen. Die städtische Lage erforderte die Verteilung der Produk-

tion auf verschiedene Produktionsstandorte. Das machte den effizienten Transport von Komponenten und Fahrzeugen über das weitläufige Gelände nötig, ohne sie dabei Witterungseinflüssen auszusetzen oder den öffentlichen Straßenverkehr zu beeinträchtigen, und erforderte innovative logistische Lösungen. Zudem verfolgte Porsche das Ziel, eine nachhaltige *Zero Impact Factory* zu realisieren.

Lösungsansatz

In weniger als vier Jahren bewerkstelligte Porsche mit Hilfe von 21 verschiedenen Projekten und mit über 6.000 Umzügen die *Fabrik der Zukunft*. Eine Besonderheit ist die Einführung des elektronischen Arbeitsabschlussblatts (eWBK). Diese digitale Version der traditionellen papierbasierten Arbeitsanweisungen steht im Mittelpunkt von Porsches Fertigung und Qualitätskontrolle. Das Porsche Fertigungs- und Prüfsystem (PFPS) steuert das eWBK und orchestriert effektiv Prozesse, Automatisierungen, Fahrzeugdiagnosen und Testergebnisse.

Das eWBK erhöht die Transparenz und die Vernetzung auf dem Produktionsboden und konzentriert sich auf die Bedürfnisse der Mitarbeitenden. Es stellt sicher, dass jeder Porsche individuell gefertigt wird und die Qualitätsstandards des Unternehmens gewährleistet werden. Das eWBK hat auf Basis von Feedback und Bedürfnissen der Mitarbeitenden mehrere Updates und Erweiterungen durchlaufen. Unter anderem wurden zuletzt Tablets und Smartwatches bereitgestellt, um einen nahtloseren Zugriff auf Informationen zu ermöglichen.

Das benutzerfreundliche Schnittstellendesign, inspiriert von intuitiver Smartphone-Nutzung, erleichtert den Zugriff auf notwendige Informationen und Aufgaben und bietet eine direkte Verbindung zwischen den Mitarbeitenden, dem Fahrzeug und der Fabrik. Im nächsten Schritt kommen Innovationen hinzu, wie etwa die Eye-Tracking-Technologie, um eine noch reaktionsschnellere und intuitivere Interaktion mit den Produktionssystemen zu schaffen.

Zudem wird der Standort klimaneutral betrieben und setzt auf energieeffiziente, ökologische Architektur und grüne Energie. Der verbrauchte Strom stammt aus erneuerbaren Quellen und Blockheizkraftwerken, die mit Biogas betrieben werden. Diese liefern Wärme und zusätzlichen Strom. Darüber hinaus tragen elektrifizierte Logistikfahrzeuge und Bahntransporte auf Basis grüner Energie zur Verringerung der Emissionen in der Logistik bei.

In der Produktion des Taycan werden auch autonome Ansätze wie fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) integriert. Dabei werden 27 FTF auf einer Strecke von 750 Metern mit täglich bis zu 1600 Materialtransporten durch eine zentrale Flottenleitsteuerung koordiniert. Weiterhin sind verschiedene Herausforderungen, wie Aufzüge, Hochregale, automatische Tore oder kreuzende Fremdsysteme berücksichtigt.⁹¹

90 Vgl. Ludwig et al. 2021.

91 Vgl. Porsche AG 2024.

Engineering

Beim Engineering dieses Produktionsstandortes setzte Porsche auf neue Technologien des integriert intelligenten Fertigungswesens. Gleichzeitig wurden die Bedürfnisse der Mitarbeitenden berücksichtigt. Somit vereint das Konzept digitale Innovationen, ökologische Verantwortung und effizienten Ressourceneinsatz und stellt die Mitarbeitenden in den Mittelpunkt des Produktionsprozesses. Um dies zu gewährleisten, war es notwendig, das Gesamtsystem zu betrachten, die Wechselwirkungen der einzelnen Teilsysteme zu berücksichtigen und Fachleute aus den Bereichen Arbeitsplanung, Städteplanung, Logistik, IT sowie Energiemanagement in die Konzipierung und Entwicklung einzubeziehen.⁹²

Exemplarisch ist das am Engineering des FTF zu sehen, denn dies wurde vor dem eigentlichen Bau vollständig digital modelliert und simuliert. Anschließend wurde es auf einer Testfläche und in einer Cloud-Infrastruktur getestet. Das Ergebnis war, dass die Software bereits wenige Monate nach Beginn des Projekts einsatzbereit war.⁹³

6.1.3. Matrixproduktion im Fluss der Siemens AG

Die Matrixproduktion im Fluss der Siemens AG ist ein Beispiel für eine langfristige und erfolgreiche Kooperation zwischen anwendungsorientierter Forschung und Industrieunternehmen, um innovative Lösungen in der Produktionssystemgestaltung umzusetzen.

Herausforderungen und Motivation

Ziel der Einführung der Matrixproduktion bei Siemens in Karlsruhe war, innovative Produktionsstrategien zu entwickeln und umzusetzen, um den stetig steigenden Anforderungen in der Fertigungsbranche gerecht zu werden. Dabei sollten neue emergente Techniken wie Digitalisierung und automatisierte Intralogistik (zum Beispiel fahrerlose Transportfahrzeuge) in die Umsetzung einbezogen werden.

Die Entscheidung zur Umsetzung einer hybriden Fertigungsstrategie am Siemens-Standort Karlsruhe stellte das Unternehmen vor zahlreiche Herausforderungen. Die Anforderungen an die Produktion erhöhten sich, da traditionelle Lean-Produktionslinien in Kombination mit einer Matrixproduktion eingeführt werden sollten. Um diese neue Strategie erfolgreich zu realisieren, war eine interdisziplinäre Herangehensweise erforderlich. Ein Team des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) wurde beauftragt, die notwendigen Maßnahmen zu analysieren und zu planen.

Lösungsansatz

Siemens Karlsruhe ist einer der größten Standorte von Siemens in Deutschland. Dort werden Produkte aus den Bereichen Elektrifizierung, Automatisierung und Digitalisierung hergestellt. Die neue hybride Fertigungsstrategie zielt darauf ab, Lean-Prinzipien auf festverketteten Produktionslinien zu nutzen und gleichzeitig dort ein Matrixstrukturkonzept einzuführen, wo eine hohe Variabilität erforderlich ist. Mit diesem Ansatz nahm man am Standort Karlsruhe eine Vorreiterrolle innerhalb des Siemens-Konzerns ein. Um sicherzustellen, dass die neuesten Entwicklungen in der Produktionstechnik einfließen, wurde die Expertise des Fraunhofer IPA hinzugezogen.

Engineering

Ein interdisziplinäres Team, bestehend aus Fachleuten unter anderem aus den Bereichen Fabrikplanung, Produktionsmanagement, digitale Werkzeuge für die Produktion sowie Robotik- und Assistenzsysteme, analysierte verschiedene Aspekte der Produktionsorganisation. Dies umfasste die Bereiche Produktionsplanung und -steuerung (PPS), IT-Architektur, Logistik, Fertigung und Montage. Darüber hinaus wurden Machbarkeitsstudien zur Automatisierung des Materialtransports und zum Einsatz künstlicher Intelligenz durchgeführt.

Basierend auf den Analyseergebnissen definierten die Fachleute des Fraunhofer IPA gemeinsam mit den Verantwortlichen bei Siemens in gemeinsamen Workshops eine Vision. Auf dieser Grundlage leiteten sie eine Roadmap für die Umsetzung ab, die alle entwicklungsbezogenen Schritte und deren wechselseitige Abhängigkeiten beinhaltete.

Eine agile Vorgehensweise und die frühzeitige Validierung von Lösungsansätzen zum Beispiel in Form von Proof of Concept waren ein wichtiger Bestandteil des Engineering-Prozesses. Damit einher ging auch die stetige Anpassung der Roadmap im interdisziplinären Team. Dieser umfassende Ansatz ermöglichte es, eine bereichsübergreifend akzeptierte Definition der Zielzustände zu erstellen und Handlungsfelder mit konkreten Entwicklungsschritten für die Integration der Matrixproduktion zu identifizieren. In anschließenden Projekten begann die gemeinsame Umsetzung.⁹⁴

92 Vgl. Porsche AG 2019a, 2019b, 2020.

93 Vgl. Porsche AG 2024.

94 Vgl. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA 2023a, 2023b.

6.1.4. Datenfabrik.NRW

Die *Datenfabrik.NRW* ist ein Gemeinschaftsprojekt mit Vertreterinnen und Vertretern aus Industrie und ausgewählten Forschungsinstituten, das vom Land Nordrhein-Westfalen unterstützt wird. Hier werden Anwendungsfälle untersucht, die wegweisend für die Produktion von morgen sein sollen. Im Mittelpunkt steht der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI). Im Zuge dessen werden sogenannte Leuchtturmfabriken als Best Practices aufgebaut. Diese Beispiele sollen Unternehmen Orientierung auf dem Weg zur eigenen Produktion geben. Die Projekte in den jeweiligen Unternehmen zeigen Lösungen für aktuelle Herausforderungen vieler Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Dazu gehören beispielsweise die datenbasierte Erstellung von Arbeitsplänen, die Planung und Steuerung der Produktion sowie die Bündelung von Frachten für die Inbound-Logistik. Zwei dieser Leuchttürme sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden: die Projekte der Firmen CLAAS und Schmitz Cargobull.

Beispiel CLAAS

Herausforderungen und Motivation

Ziel des Projektes ist, die Digitalisierung in der Produktion der CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH weiter voranzutreiben. Eine der größten Herausforderungen liegt darin, diese Modernisierung parallel zum laufenden Tagesgeschäft zu realisieren.

Die derzeitigen Rahmenbedingungen weisen bereits einen hohen Grad an Komplexität auf. Beispielsweise ist bei der Herstellung großer Mähdrescher die Höhe der Fabrik ein begrenzender Faktor. Außerdem ist die Zeit, die für den Umbau zur Verfügung steht, limitiert, da jede Verzögerung die Wiederaufnahme der Produktion gefährdet.

Der Planungsprozess zur Digitalisierung der Produktion erfordert eine umfassende Integration verschiedener Bereiche, darunter Produktentwicklung, Fabrik- und Produktionsplanung sowie die Bereitstellung und Vernetzung von Daten durch die IT-Infrastruktur. Die nahtlose Verfügbarkeit und Konsistenz dieser Daten sind von entscheidender Bedeutung, um einen reibungslosen Ablauf der Planung zu gewährleisten und die betriebliche Effizienz zu steigern.

Lösungsansatz und Engineering

Um dieses Ziel zu erreichen, hat CLAAS viele kleine Use Cases definiert. Am Ende des Projekts sollen es insgesamt bis zu 60 Use Cases sein. Dabei werden die Themenfelder Fabrikplanung, Produktion und Logistik ganzheitlich betrachtet. Auch die Bereiche Strategie, IT und Organisation werden berücksichtigt. Ein Use Case von CLAAS ist die Pumpenüberwachung, die einen möglichen Ausfall der Pumpe frühzeitig prognostiziert, so dass Stillstandszeiten minimiert werden können.

Modernisierungen wurden Schritt für Schritt angegangen. Dabei war es dem Team wichtig, keine zusätzlichen Prozesse im Engineering einzuführen, sondern bestehende Prozesse zu verbessern.

Betriebspausen oder Stillstände werden gezielt für Veränderungen genutzt, Verbesserungen in einem Bereich auf andere Bereiche übertragen. Methoden, die sich in bestimmten Bereichen als erfolgreich und zielführend erwiesen haben, wurden auch in anderen Bereichen eingeführt. Digitale Modelle wurden gezielt für einzelne Anwendungsfälle eingesetzt und schrittweise mit dem Ziel einer hohen Durchgängigkeit weiterentwickelt.

Die Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams hat sich als zielführend erwiesen: Fachleute aus der Produktion, IT-Fachleute und Fachleute der Produktentwicklung arbeiten eng zusammen. Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die enge Zusammenarbeit der Claas-Fachleute mit den Projektpartnerinnen und -partnern der *Datenfabrik.NRW* sowie die hohe Transparenz gegenüber den Mitarbeitenden.⁹⁵

Claas verwendet auch in der Produktion autonome Systeme in der Form von fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Diese werden genutzt, um die Mähdrescher von einer Station zur nächsten fortzubewegen. Insgesamt tragen die FTS bis zu 20 Tonnen und sind mit den anderen FTS synchronisiert, um sich von Station zu Station in der Produktion zu bewegen.⁹⁶

Beispiel Schmitz Cargobull

Herausforderungen und Motivation

Ein weiteres Unternehmen, das an dem Projekt *Datenfabrik.NRW* teilnimmt, ist Schmitz Cargobull. Dieses Unternehmen konzentriert sich darauf, die digitale Transformation in Form eines ganzheitlichen Ansatzes in der Fertigung voranzutreiben. Konkret geht es um die Planung des neuen Montagebands. Das wird bereits in der Planungsphase virtuell dargestellt werden, um mögliche Probleme frühzeitig und effizienter identifizieren zu können. Das Ziel ist, die Produktivität der Fertigung zu erhöhen, Fehler durch Früherkennung zu vermeiden und dadurch Folgekosten zu reduzieren.

Lösungsansatz und Engineering

In der Logistik, dem Supply Chain Management und dem Materialfluss im Werk sollten Reaktionszeiten verkürzt, Flächen effizienter genutzt und die Anzahl der Transporte reduziert werden. Die Modernisierung der gesamten Produktion und die CO₂-Bilanz der Produktion standen dabei besonders im Vordergrund. Darüber hinaus hält man mit aktuellen technologischen Entwicklungen Schritt und integriert entsprechend KI-Anwendungen in den Prozess.

Zur Umsetzung wurden Dienstleistende für die 3D-Planung eingebunden, um die bestehenden Fabrikhallen mithilfe von KI-Anwendungen digital abzubilden. Diese 3D-Modelle dienen als Grundlage für die Planung, als Basis dafür, Fehler auszuschließen, und für die Abstimmung mit dem Management.

⁹⁵ Vgl. Ten-Cate et al. 2022a.

⁹⁶ Vgl. CLAAS KGaA mbH 2024.

Abbildung 12: Erfolgsfaktoren für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen



Quelle: eigene Darstellung

Auch bei der Arbeitsplatzgestaltung wurden Modelle eingesetzt, um Mitarbeitende frühzeitig einzubinden und die Akzeptanz zu erhöhen. Das so genannte Cardboard Engineering wird durch eine virtuelle Arbeitsplatzgestaltung ersetzt. Im Cardboard Engineering werden Arbeitsplätze mit Pappe nachgebaut, um zum Beispiel Ergonomiebewertungen des Aufbaus und Tätigkeiten des Arbeitsplatzes zu untersuchen. Im Rahmen der virtuellen Arbeitsplatzgestaltung werden diese Tätigkeiten mit Virtual Reality durchgeführt und dadurch aufwendige Papp-Aufbauten eingespart.

Darüber hinaus umfasst die Innovation im Bereich Manufacturing die Arbeitsvorbereitung und -ausführung, die Qualität und die Instandhaltung. Der ganzheitliche Ansatz der *Datenfabrik.NRW* hilft Schmitz Cargobull, die digitalen Potenziale zu erkennen, aber auch die grundsätzlichen unternehmensinternen Prozesse zu reflektieren, zu bewerten und zu verbessern.

Ein Vorteil für Schmitz Cargobull bei der Umsetzung der digitalen Transformation der Produktion ist, dass das Unternehmen zeitgleich seinen Standort ausbauen möchte. Daher konnten konkrete Planungen zur Digitalisierung und Automatisierung der Produktion direkt umgesetzt werden.

Dazu wurde ein Projektteam gebildet, das sich ausschließlich mit der Werkerweiterung beschäftigt. Unterstützt wird das Team durch die Einbindung von Mitarbeitenden aus allen anderen Bereichen:

Logistik, Arbeitsplanung, Fertigungssteuerung, Qualitätssicherung und Instandhaltung.⁹⁷

6.2. Erfolgsfaktoren für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen

Im Rahmen der Befragung der Fachleute wurden neben konkreten Beispielen innovativer Projekte aus der Industrie auch einzelne Erfolgsfaktoren genannt. Diese Nennungen sind in Abbildung 12 aufgeführt. Die Erfolgsfaktoren werden den Grundprinzipien des Systems Engineerings zugeordnet (vgl. Kapitel 5.4.1). Dabei ist zu beachten, dass die Grenzen oftmals fließend sind. Ein Erfolgsfaktor können mehrere Prinzipien zugeordnet werden. Ein Beispiel ist der von den Fachleuten genannte Erfolgsfaktor, agile Vorgehensweisen anzuwenden. Dies kann dem Prinzip der frühen Validierung und Verifikation oder dem der Iteration und Anpassbarkeit zugeordnet werden. Der Grund dafür ist, dass eine agile Vorgehensweise frühe Verifikation und Validierung erfordert, aber auch Iterationen im Entwicklungsprozess nach sich zieht. Hier zeigt sich, wie wichtig die SE-Prinzipien für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen sind.

97 Vgl. Ten-Cate et al. 2022b.

6.3. Kompetenzprofile

Ziel dieses Kapitels ist, Kompetenzprofile für in der Entwicklung tätige Mitarbeitende zu definieren. Dazu werden zunächst die für Systems Engineering und Industrie 4.0 relevanten Einzelkompetenzen betrachtet. Anschließend werden die Kompetenzen für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen herausgearbeitet. Die Angaben der Fachleute ergänzen diese Ergebnisse im gesamten Unterkapitel.

In einem ersten Schritt werden die Kompetenzen im Bereich Industrie 4.0 betrachtet. Die Fachleute aus den Großunternehmen sahen vor allem Bedarfe in technologie- und datenorientierten Bereichen und nannten Kompetenzen wie interdisziplinäres Denken und Handeln. Die Fachleute aus KMU betonten dagegen etwas stärker prozess- und kundenorientierte Kompetenzen wie Dienstleistungsorientierung sowie infrastruktur- und organisationsbezogene Kompetenzen wie zum Beispiel soziale beziehungsweise kommunikative Fähigkeiten.⁹⁸

Im Folgenden sind die wichtigsten Kompetenzen dargestellt. Das Kompetenzradar spiegelt die Ausprägungen für ein Soll-Profil einer Ingenieurin oder eines Ingenieurs wider. Abbildung 13 und die folgende Aufzählung zeigen die Kompetenzen, die im Bereich Industrie 4.0 benötigt werden.

Industrie 4.0-Kompetenzen

- Schnelle Reaktion (auf Kundenanforderungen)
- Flexibilität (in der Produktion)
- Fähigkeit zum Austausch mit Maschinen
- Beherrschung komplexer Arbeitsinhalte
- Dienstleistungsorientierung
- Fähigkeit zur Koordination von Arbeitsabläufen
- Sozial / Kommunikationskompetenz
- Eigenverantwortliche Entscheidungen
- Problemlösungs und Optimierungskompetenz
- Mitwirkung an Innovationsprozessen
- Führungskompetenz
- Zunehmendes Prozess-Know-How
- Interdisziplinäres Denken und Handeln

Die Kompetenzen des Systems Engineerings gliedern sich im Allgemeinen in vier Kompetenzbereiche: Basiskompetenzen, Sozialkompetenzen, Managementkompetenzen und technische Kompetenzen.⁹⁹ Im Folgenden werden die Basiskompetenzen beschrieben.¹⁰⁰ Diese sind zudem für das Engineering von Bedeutung.

Systems Engineering-Basiskompetenzen

- Systemdenken
- Lebenszyklusdenken
- Kundenorientierung
- Systemmodellierung und -analyse

Kompetenzen im Bereich Systems Engineering sind insbesondere für das Management relevant, während Industrie 4.0-Kompetenzen auch für Mitarbeitende in der Produktion von Bedeutung sind. Die genaue Verteilung der Verantwortlichkeiten hängt jedoch von der jeweiligen Unternehmensstruktur ab. Grundsätzlich gilt: Je mehr Verantwortung eine Person übernimmt, desto mehr sind interdisziplinäre Kompetenzen gefragt.

Systemdenken als Basiskompetenz beschreibt die generelle Fähigkeit, vernetzt zu denken. Lebenszyklusdenken im Kontext des Systems Engineerings ist ein Ansatz, bei dem ein System über seinen gesamten Lebensweg betrachtet wird. Das bedeutet, dass von der ersten Idee über die Entwicklung, Fertigung, Nutzung bis hin zur Außerbetriebnahme und Entsorgung alle Phasen einbezogen werden.

Eine wichtige Fähigkeit, um erfolgreich im Systems Engineering zu arbeiten, ist die Fähigkeit, sich in die Situation der Mitarbeitenden hineinzusetzen. Soziale und kommunikative Kompetenzen wie aktives Zuhören sind dabei hilfreich. Ein gutes Zeitmanagement, die Fähigkeit, auch übergeordnete Ziele nicht aus den Augen zu verlieren sowie Pläne einzuhalten, Kreativität und ein allgemeines technisches Grundverständnis sind weitere wichtige Eigenschaften. Es gibt jedoch kein fixes Set an Fähigkeiten, die Mitarbeitende im Systems Engineering mitbringen sollten. Insofern ist die folgende Übersicht in Abbildung 14 als Orientierung gedacht.

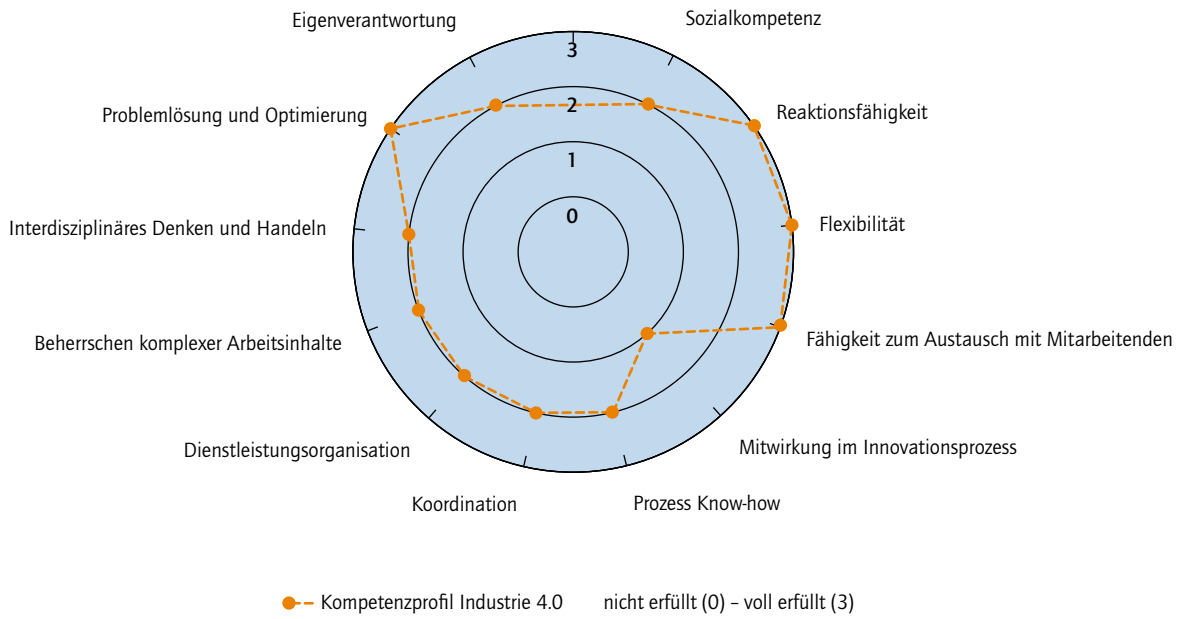
Sowohl Fachleute, die im Systems Engineering als auch in der Industrie 4.0 tätig sind, sollten bestenfalls folgende Kompetenzen mitbringen: interdisziplinäres Denken, Problemlösungs- und Optimierungskompetenz sowie die Fähigkeit zur Koordination von Arbeitsabläufen. Diese Fähigkeiten sind entscheidend, um komplexe Herausforderungen erfolgreich zu bewältigen und die Effizienz zu steigern.

98 Vgl. acatech 2016.

99 Vgl. Könemann et al. 2022.

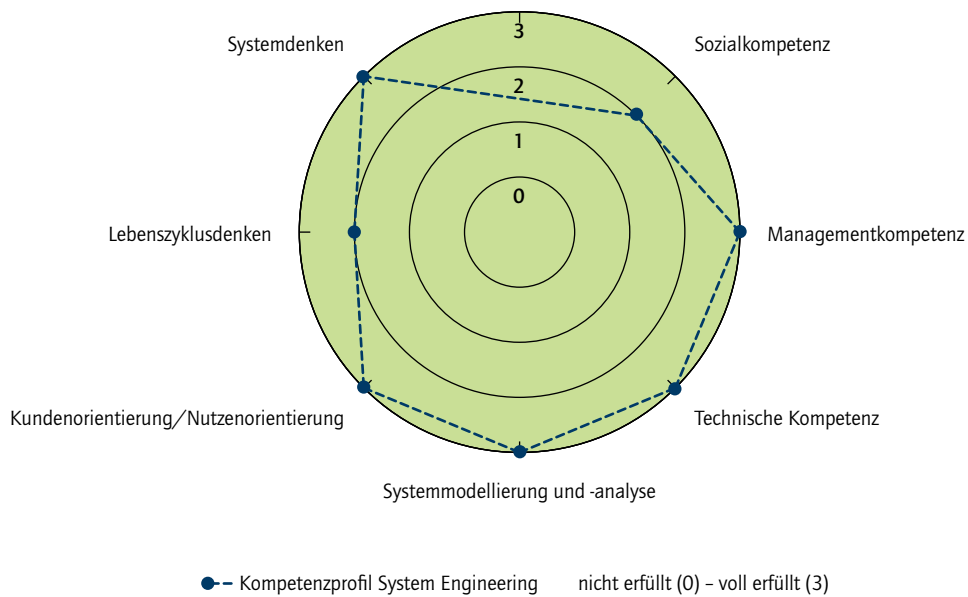
100 Vgl. INCOSE 2018; Könemann et al. 2022.

Abbildung 13: Kompetenzradar für Industrie 4.0 (Beispiel Soll-Profil für Ingenieurinnen und Ingenieure)



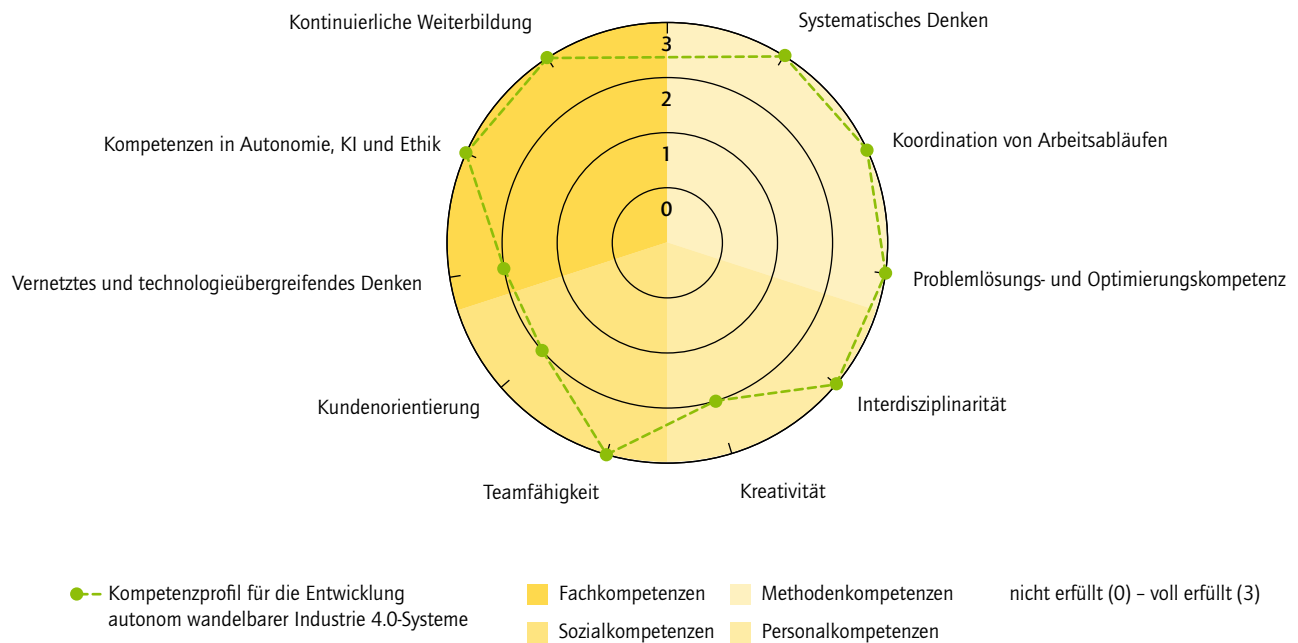
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 14: Kompetenzradar für Systems Engineering (Beispiel Soll-Profil für Ingenieurinnen und Ingenieure)



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 15: Kompetenzradar für die Entwicklung autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme
(Beispiel Soll-Profil für Ingenieurinnen und Ingenieure)



Quelle: eigene Darstellung

Um den Anforderungen an die Entwicklung autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme gerecht zu werden, sind aus Sicht der befragten Fachleute die in Abbildung 15 aufgeführten Kompetenzen entscheidend.¹⁰¹ Diese werden nach dem T-Profil in Personal, Sozial-, Methoden- und Fachkompetenz unterteilt.¹⁰²

Personalkompetenz

- **Interdisziplinarität:** Fähigkeit, über Fachgrenzen hinweg zu arbeiten und verschiedene Disziplinen zu integrieren.
- **Kreativität:** Fähigkeit, innovative Lösungsansätze zu entwickeln und neue Ideen einzubringen.

Sozialkompetenz

- **Teamfähigkeit:** Fähigkeit, in interdisziplinären Teams zu arbeiten.
- **Kundenorientierung:** Fähigkeit, für die Beratung und Orientierung hin zum Kunden.

Fachkompetenz

- **Kontinuierliche Weiterbildung:** Bereitschaft, sich mit aktuellen Themen und Entwicklungen auseinanderzusetzen und die eigenen Fähigkeiten anzupassen.
- **Kompetenzen in Autonomie, Künstlicher Intelligenz und Ethik:** Verständnis für die Auswirkungen und Herausforderungen dieser Bereiche im Kontext des Systems Engineerings.
- **Vernetztes und technologieübergreifendes Denken:** Fähigkeit, über Technologien hinauszudenken und verschiedene Technologien zu verbinden.

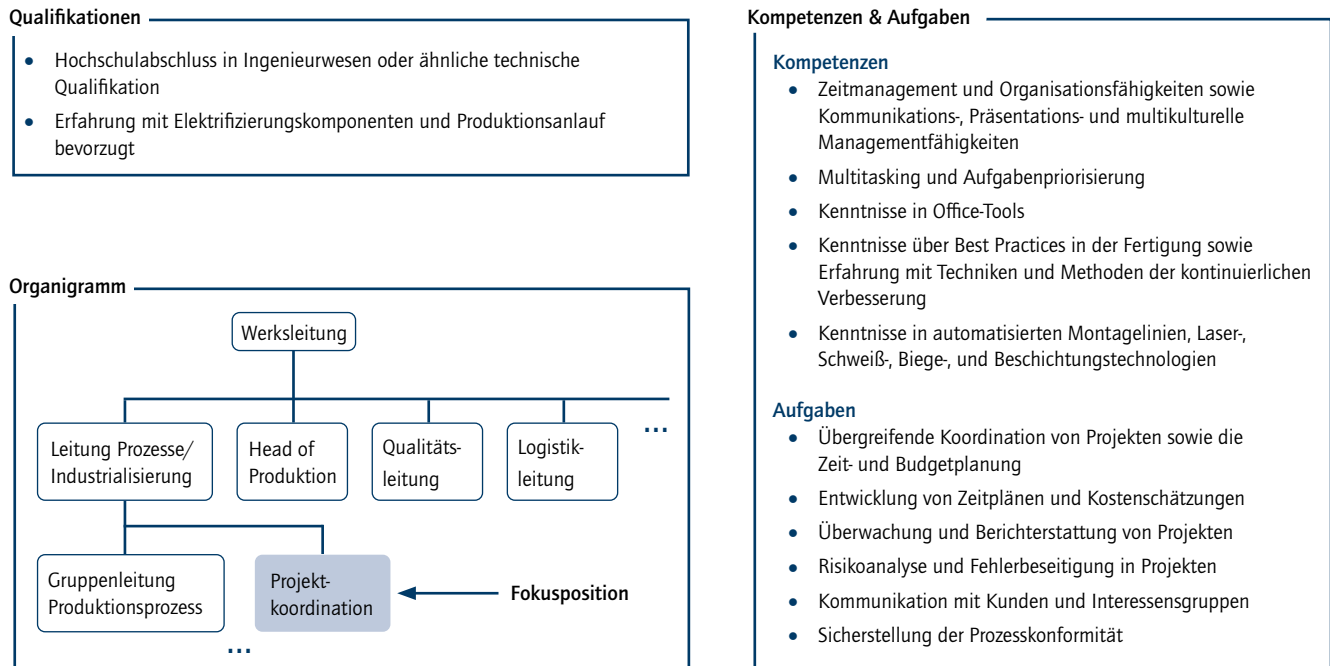
Methodenkompetenz

- **Problemlösungs- und Optimierungskompetenz:** Fähigkeit, effektive Lösungen für Probleme zu finden und bestehende Prozesse, Systeme oder Produkte zu verbessern.

101 Vgl. Hirsch-Kreinsen 2022, 2023.

102 Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

Abbildung 16: Beispiel eines Kompetenzprofils für eine Projektkoordination



Quelle: eigene Darstellung

- **Koordination von Arbeitsabläufen:** Fähigkeit, effektiv und effizient den Ablauf von Aufgaben, Ressourcen und Zeitplänen zu organisieren und zu überwachen.
- **Systemisches Denken:** Verständnis für komplexe Systeme und deren Zusammenhänge.

Trainings und Weiterbildungen, insbesondere im Bereich der Soft Skills, können den für das Engineering Verantwortlichen dabei helfen, ihre Kompetenzen zu verbessern. Dies kann beispielsweise durch Schulungen zu Kommunikationstechniken und anderen relevanten Themen erfolgen.

Da es die Rolle der Systemingenieurin und des Systemingenieurs in der Praxis häufig nicht gibt, werden die Kompetenzen überwiegend entsprechend dem Organigramm in den Unternehmen koordiniert und einer anderen Rolle zugeordnet. Ein Beispiel hierfür sind Projektkoordinatorinnen oder Projektkoordinatoren, die über entsprechende Managementkompetenzen, interdisziplinäre Kompetenzen und technische Kompetenzen verfügen müssen. Die Projektkoordination ist in diesem Fall für den Aufbau eines Industrie 4.0-Produktionssystems im Unternehmen verantwortlich. In Abbildung 16 ist ein Steckbrief als Kompetenzprofil für eine entsprechende Position dargestellt.

Darüber hinaus sind für die Entwicklung von Industrie 4.0-Systemen sowohl abstrakte Kompetenzen als auch spezifisches Fachwissen in den Disziplinen erforderlich: Auch wenn interdisziplinäres Denken wichtig ist, bleiben fachliche Kenntnisse in Bereichen wie Datenverarbeitung, Regelungstechnik und Elektrotechnik unverzichtbar, um den komplexen Anforderungen in der Praxis gerecht zu werden und Synergien zwischen den Disziplinen zu ermöglichen.

6.4. Zusammenfassung

Frage 3 (Kapitel 6): Welche Best Practices bestehen in der Industrie und welche Kompetenzprofile werden für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen benötigt?

In der Industrie gibt es verschiedene Best Practices für fortschrittliche Produktionsansätze und Kooperationen, wie die vier vorgestellten Beispiele von KAMAX, Porsche AG, Siemens AG und *Datenfabrik.NRW* verdeutlichen. Dabei zeigt sich, dass sowohl die Ausgangssituation und Motivation als auch die Umsetzung und der Fokus der Lösungen sehr unterschiedlich sein können. Die Systeme zeigen zwar bestimmte Vorzeigeprojekte im Sinne der Digitalisierung, Autonomie oder Wandelbarkeit, aber aktuell noch keine Implementierung von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen.

Für das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen werden spezifische Kompetenzprofile benötigt, die Industrie 4.0-Kompetenzen wie schnelle Reaktion, Flexibilität, Maschinenkommunikation, Dienstleistungsorientierung, soziale und kommunikative Fähigkeiten sowie interdisziplinäres Denken umfassen. Systems Engineering erfordert Basiskompetenzen wie Systemdenken, Lebenszyklusdenken, Kundenorientierung und Systemmodellierung sowie Management- und technische Kompetenzen. Zudem sind Kompetenzen wie Problemlösung, Koordination und in-

terdisziplinäres Arbeiten von Bedeutung. Speziell für autonom wandelbare Systeme sind Personal-, Sozial-, Methoden- und Fachkompetenz entscheidend, einschließlich Interdisziplinarität, Kreativität, Teamfähigkeit, Kundenorientierung und kontinuierliche Weiterbildung, sowie Verständnis für Autonomie, KI und Ethik. Weiterbildungen im Bereich der Softskills unterstützen die Entwicklung dieser Kompetenzen und fördern die Kommunikation sowie andere relevante Fähigkeiten.

7. Chancen und Barrieren

In diesem Kapitel wird das Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen analysiert. Im ersten Teil werden die vielfältigen Chancen des Systems Engineerings im Produktionskontext beleuchtet (siehe Kapitel 7.1). Hierzu werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie Unternehmen von Effizienzsteigerungen, Kosteneinsparungen, Qualitätsverbesserungen und Innovationspotenzialen profitieren können. Im Anschluss werden mögliche Barrieren bei der Implementierung des Systems Engineerings autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme untersucht (siehe Kapitel 7.2). Schließlich werden die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für das Engineering solcher Systeme für Wirtschaft und Wissenschaft aus den vorherigen Kapiteln und Ergebnissen betrachtet (siehe Kapitel 7.3).

Insgesamt wird in diesem Kapitel die folgende Forschungsfrage beantwortet:

Frage 4 (Kapitel 7): Welche Chancen, Herausforderungen und Forschungsbedarfe ergeben sich für das Systems Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen?

7.1. Chancen für Unternehmen durch das Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme

Die Integration des modernen Systems Engineerings von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen bietet verschiedene Chancen für Unternehmen. Diese werden im Folgenden dargestellt und aus der Literatur, den Interviews sowie den Best Practices abgeleitet. Um Chancen zu realisieren, ist ein (abteilungs-)übergreifendes Systemverständnis vonnöten.¹⁰³ Verschiedene Trends (siehe Kapitel 5.3) tragen zu diesen Chancen bei.¹⁰⁴

Obwohl verschiedene Chancen wie etwa Effizienzsteigerungen aufgezeigt wurden, bleibt es eine Herausforderung, aus diesen allgemeinen Konzepten direkte Schlussfolgerungen für Autonomie und Wandelbarkeit abzuleiten. Die Interviews und die Literaturrecherche geben zwar Einblick in die Potenziale neuer Technologien, jedoch sind diese Erkenntnisse eher generischer Natur. Hier wird deutlich, dass weitere Forschung notwendig ist. Zudem müssen die diskutierten Vorteile auch in anwendbaren Konzepten münden.

Effizienzsteigerung

Durch den Einsatz neuer Technologien wie KI können mit Methoden des Systems Engineerings auch Effizienzsteigerungen in der Entwicklung von Produktionssystemen geschaffen werden. Durch Automatisierung und mit Hilfe von KI wird der Mensch zukünftig bei wissensintensiven Ingenieur Tätigkeiten von Assistenzsystemen unterstützt werden. Die befragten Fachleute identifizierten verschiedene Potenziale, wie zum Beispiel die Aufbereitung von Wissen oder die Ableitung von CAD-Modellen aus dem Systemmodell. So können Ressourcen optimiert und die Produktivität gesteigert werden.

Ein spezifisches Beispiel für Wandelbarkeit und Autonomie ist die Implementierung selbstlernender Algorithmen in Produktionsanlagen. Diese Algorithmen passen Produktionsprozesse dynamisch und ohne menschliches Eingreifen an Veränderungen von Nachfrage oder Materialflüssen an. Beispielsweise kann ein autonom wandelbares Produktionssystem, welches mit KI und IoT-Sensoren ausgestattet ist, Ausfälle vorhersagen und präventive Wartungsarbeiten autonom planen und durchführen. Das steigert Effizienz und Produktivität signifikant, da Ausfallzeiten minimiert und die Lebensdauer der Anlagen optimiert werden.

Kosteneinsparungen

Durch die Implementierung effizienter Prozesse und den optimierten Einsatz von Ressourcen können Unternehmen ihre Entwicklungskosten senken. Ein besseres Systemverständnis führt zu weniger Fehlern und damit zu Kosteneinsparungen. Auch hier können Technologien wie KI unterstützen. Dazu gehören Assistenzsysteme, die während der Entwicklung auf Fehler hinweisen oder das Systemmodell auf Inkonsistenzen überprüfen. Darüber hinaus spielt auch der Fokus auf Nachhaltigkeit eine wesentliche Rolle bei der Kostenreduktion, da hier der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird.

Ein spezifischer Fall, der die Kosteneinsparungspotenziale in der Produktion verdeutlicht, ist der Einsatz autonomer Robotersysteme, die sich selbstständig auf neue Produktionsaufgaben einstellen können. Zum Beispiel können diese Robotersysteme mithilfe von maschinellem Lernen und Sensorik Veränderungen im Produktionsprozess erkennen und ihre Aktionen autonom daran anpassen. Das steigert die Effizienz und minimiert Materialverschwendung. Ein solches System könnte automatisch die Bearbeitungsgeschwindigkeit oder den Werkzeugwechsel an die aktuelle Auftragslast und spezifischen Anforderungen jedes einzelnen Teils anpassen.

¹⁰³ Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

¹⁰⁴ Vgl. Bretz 2021a, 2021b; Backhaus und Voeth 2015; Dumitrescu et al. 2021; Gausemeier et al. 2013.

Darüber hinaus ermöglichen autonom wandelbare Systeme, Produktionslinien schnell und effizient an kurzfristige Trends oder Nachfrageänderungen anzugleichen, ohne dass Unternehmen signifikante Einbußen in der Produktionszeit oder zusätzliche Kosten für manuelle Umrüstungen in Kauf nehmen müssen. Ein Beispiel hierfür ist die modulare Produktionsumgebung, in der einzelne Module autonom agieren und bei Bedarf neu konfiguriert werden können.

Qualitätssicherung

Der Einsatz von KI in der Qualitätssicherung transformiert Industrie 4.0-Systeme in selbstoptimierende Einheiten, die autonom Qualitätskontrollen durchführen. Ein prägnantes Beispiel hierfür ist die Implementierung von Bilderkennungssoftware, die in Echtzeit Produktfehler erkennt und selbstständig Anpassungen im Produktionsprozess vornimmt, um diese Fehler zu minimieren. Diese Systeme können lernfähig gestaltet werden, sodass sie mit jedem erkannten Fehler besser werden. Dies führt zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Produktqualität, reduziert Ausschuss und erhöht dadurch die Kundenzufriedenheit sowie die Wettbewerbsfähigkeit.

Flexibilität und Anpassungsfähigkeit

Das Systems Engineering von Industrie 4.0-Systemen fördert Flexibilität und Anpassungsfähigkeit. Die Einführung eines Systemmodells und die Modularisierung einer Produktionsanlage trägt dazu bei, dass Komponenten austauschbar und die Systeme flexibler werden. Ein agiler Systems-Engineering-Ansatz erhöht die Interdisziplinarität und führt so zu schnelleren Lösungen. Außerdem kann früher auf Kundenwünsche während des Engineerings eingegangen werden. Die Reaktionszeit auf sich ändernde Anforderungen und Markttrends verkürzt sich und das Unternehmen wird damit insgesamt anpassungsfähiger.

Höheres Innovationspotenzial

Die gemeinsame Entwicklung und der Einsatz von KI bei der Gestaltung von Industrie 4.0-Systemen eröffnen neue Möglichkeiten für Innovationen. Unternehmen können gemeinsam mit Partnerinnen und Partnern, externen Fachleuten aus der Entwicklung und mithilfe technologischer Werkzeuge neue Ideen und Entwicklungen vorantreiben. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit verbindet unterschiedliche Perspektiven und Fachgebiete und kann wesentlich dazu beitragen, ein breiteres Spektrum an Ideen und Ansätzen zu erarbeiten. Dieser Austausch schafft die Grundlage für mögliche Innovationen, da er unterschiedliche Sichtweisen und Kompetenzen zusammenführt.

Ein Beispiel für Innovation durch Autonomie ist die Nutzung von KI für die Designautomatisierung. KI-Algorithmen, die auf generativem Design basieren, können Tausende von Designoptionen generieren und dabei evaluieren, was die beste Lösung hinsichtlich bestimmter Kriterien wie Festigkeit, Gewicht oder Materialkosten ist. Das ermöglicht es Ingenieurteams, innovative Produktkonzepte zu erkunden, die manuell nicht realisierbar wären, und kann die Entwicklung innovativer Produkte enorm verbessern.

Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung von KI-gestützten, adaptiven Wartungsstrategien. Sie verdeutlichen sehr gut, wie Autonomie und Flexibilität zusammenspielen. Auf Basis der kontinuierlichen Analyse von Betriebsdaten können diese Systeme eigenständig den optimalen Zeitpunkt für Wartungsarbeiten bestimmen und so Ausfallzeiten minimieren. Gleichzeitig passen sie Wartungspläne flexibel an den aktuellen Zustand der Anlagen und die Produktionsanforderungen an. Das steigert Effizienz und Lebensdauer der Anlagen erheblich.

Verbesserte disziplinübergreifende Zusammenarbeit

Das Systems Engineering von Industrie 4.0-Systemen trägt zur Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit bei. Durch die Einführung einer gemeinsamen Sprache und die Verwendung eines Systemmodells wird die Kommunikation und Kooperation zwischen den verschiedenen Disziplinen gefördert und gestärkt. Dies erleichtert den Austausch von Informationen und die Zusammenarbeit an gemeinsamen Zielen bei der Entwicklung von Produktionssystemen. Die Kompetenzen der einzelnen Fachleute führen so zu einer besseren Gesamtlösung. Beispielsweise kann ein autonomes Diagnosesystem präzise Informationen über den Zustand von Maschinen liefern und so die Basis für eine effektive Zusammenarbeit zwischen Mitarbeitenden der Wartungstechnik sowie Produktionsingenieurinnen- und -ingenieuren schaffen.

Die neuen Entwicklungen im Bereich der KI können dazu beitragen, die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu verbessern. Müheliche Dokumentationen kann die KI übernehmen und Transparenz und Rückverfolgbarkeit deutlich erhöhen.

Ein konkretes Beispiel für die Integration von Autonomie und Wandelbarkeit ist der Einsatz kollaborativer Roboter (Cobots) in der Fertigung. Diese Cobots sind so konzipiert, dass sie autonom neben menschlichen Arbeitskräften agieren und sich an verschiedene Aufgaben und Arbeitsumgebungen anpassen können. Ihre Programmierung und Überwachung übernehmen interdisziplinäre Teams, die ihre Expertise einbringen, um die Cobots für eine breite Palette von Anwendungen zu optimieren.

Erhöhung des Kundennutzens

Der Einsatz von KI, Datendurchgängigkeit und Co-Engineering bei der Entwicklung von Industrie 4.0-Systemen ermöglicht Unternehmen, ihren Kunden einen höheren Nutzen zu bieten. Die frühzeitige Berücksichtigung der Bedürfnisse aller Stakeholderinnen und Stakeholder in der Entwicklung in einem durchgängigen Systemmodell schafft Übersicht und eine gemeinsame Kommunikationsbasis. Mithilfe von Tests, Validierung und Kundeneinbindung (Co-Engineering) lassen sich personalisierte Lösungen und eine optimierte Kundenbetreuung realisieren. Neue Geschäftsmodelle, wie zum Beispiel Pay-per-Use, können die Kundenbindung stärken und neue Marktchancen eröffnen.

Unterstützung für nachhaltige Entwicklung und Systeme

Unternehmen müssen zunehmend gesetzliche Vorgaben im Nachhaltigkeitsbereich erfüllen.¹⁰⁵ Industrie 4.0-Systeme können nachhaltige Praktiken fördern. Dies ergibt sich bereits aus den Eigenschaften dieser Systeme (siehe Kapitel 4.2.2). Durch den Einsatz resilienter und robuster Technologien sowie KI können Unternehmen ihre Umweltauswirkungen reduzieren und nachhaltiger wirtschaften. Wenn schon in der Engineering-Phase entsprechende Ziele und Parameter berücksichtigt werden, können weitere Ressourcen eingespart und der Weg hin zu einer CO₂-neutralen Produktion geebnet werden.

Industrie 4.0-Systeme, die auf Autonomie und Wandelbarkeit ausgelegt sind, leisten auch einen positiven Beitrag zur Nachhaltigkeit. Ein Beispiel ist die Implementierung von Systemen zur Energieverbrauchsoptimierung, die mithilfe von KI den Energieverbrauch in Echtzeit überwachen und anpassen. Diese Systeme analysieren Produktionsdaten, identifizieren ineffiziente Prozesse und nehmen automatisch Anpassungen vor, um Energie zu sparen. Zusätzlich ermöglicht die Autonomie dieser Systeme eine dynamische Anpassung an die Produktionserfordernisse, was den Gesamtenergieverbrauch minimiert und Unternehmen einen Schritt näher an eine CO₂-neutrale Produktion bringt.



Wenn das Produkt intelligent wird, haben wir auch die Chance, das zugehörige Produktionssystem intelligent zu machen.

7.2. Barrieren im Engineering zukunftsfähiger Produktionssysteme

Im Rahmen dieser Expertise wurden neun Barrieren für das Engineering zukunftsfähiger Produktionssysteme identifiziert:

Komplexität der Integration

Industrie 4.0-Systeme integrieren eine Vielzahl von Technologien, Plattformen und Fachdisziplinen. Die Komplexität der Integration stellt eine Herausforderung dar, insbesondere wenn bestehende Systeme in die neuen Lösungen eingebunden werden müssen und Aspekte wie autonom wandelbare Systeme entwickelt werden.

Fehlende digitale Durchgängigkeit

Eine fehlende digitale Durchgängigkeit (auch Traceability) kann zu Informationsverlusten führen, wenn Informationen nicht ordnungsgemäß erfasst werden. Weiterhin kann eine fehlende Traceability es erschweren, den Entwicklungsprozess nachzuvollziehen und Änderungen zu verfolgen. Dies kann die Fehlerbehebung und das Risikomanagement beeinträchtigen, da der Ursprung von Problemen oder die Auswirkungen von Änderungen schlechter identifizierbar sind.

Fehlende Vernetzung von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung

Die traditionelle Trennung zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung ist eine Herausforderung für die Implementierung autonom wandelbarer Systeme. Denn diese Systeme erfordern eine integrative Herangehensweise, also eine enge Abstimmung zwischen Mitarbeitenden aus Produktentwicklung und Gestaltung und die Integration von verschiedenen Entwicklungsmethoden, insbesondere im Hinblick auf Autonomie und Wandelbarkeit.

Datensicherheit und Datenschutz

In Industrie 4.0-Umgebungen sind Zuverlässigkeit und Sicherheit essentiell für autonome und wandelbare Systeme. Mit der zunehmenden Vernetzung und Datenerfassung in Produktionssystemen wird die Sicherheit sensibler Daten zu einer zentralen Herausforderung. Es ist zwingend notwendig, angemessene Sicherheitsmaßnahmen zu implementieren, um Daten vor Bedrohungen zu schützen.

Unklare Nutzenpotenziale

Die Schwierigkeit, den konkreten Nutzen von Investitionen in autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme zu quantifizieren, stellt eine bedeutende Barriere dar. Unternehmen benötigen klare Entscheidungshilfen, die eine Kosten-Nutzen-Analyse erleichtern und somit die Investitionsbereitschaft erhöhen, besonders bei begrenzten Ressourcen.

Fachkräftemangel

Der Mangel an Fachkräften mit dem nötigen Know-how im Bereich Systems Engineering und Industrie 4.0 kann die Einführung verzögern oder gar verhindern. Unternehmen stehen vor der Herausforderung, Mitarbeitende mit den erforderlichen Fähigkeiten zu finden oder vorhandenes Personal insbesondere auf interdisziplinärer und kreativer Ebene zu schulen.

Fehlendes Beschreibungsmodell und Vorgehensweisen

Es mangelt an standardisierten Vorgehensweisen und Beschreibungsmodellen für das Engineering autonom wandelbarer Systeme. Dies erschwert die Planung und Umsetzung von Projekten, da keine etablierten Richtlinien oder Rahmenwerke existieren, die als Grundlage für die interdisziplinäre Arbeit dienen könnten.

Rechtliche und regulatorische Barrieren

Rechtliche und regulatorische Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf den Datenschutz und die Datenhoheit, müssen bei der Entwicklung autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme berücksichtigt werden. Hier fehlt es an methodischer Unterstützung.

Mangelnde Standardisierung

Das Fehlen von Standards im Bereich der autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systeme kann die Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemkomponenten beeinträchtigen. Das Fehlen gemeinsamer Standards erschwert die nahtlose Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Teilsystemen. Klare Schnittstellen sind jedoch für die Entwicklung der verschiedenen Teilsysteme eines System of Systems (siehe 5.4.1) von entscheidender Bedeutung. Ohne die Standardisierung dieser Schnittstellen können die Teilsysteme nicht kompatibel entwickelt werden.

In Abbildung 17 wird der Zusammenhang zwischen den Kapiteln 5.3, 7.1 und 7.2 als Verknüpfung zwischen den Trends, Chancen und Barrieren im Engineering dargestellt.



Neue Technologien auf dem Markt sind schön, aber die Herausforderung ist, sie direkt im Unternehmen nutzbar zu machen.

7.3. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für das (modellbasierte) Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme

Industrie 4.0 und der Einsatz autonomer, wandelbarer Systeme entwickeln sich schnell und stetig weiter, was kontinuierliche Verbesserung des Systems Engineerings erforderlich macht. Das Verständnis aktueller Herausforderungen und zukünftiger Trends ist entscheidend, um die Entwicklung und Implementierung dieser Systeme effizient zu gestalten. Durch die Identifizierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs können gezielte Maßnahmen ergriffen werden, um die Effizienz, Qualität und Flexibilität des Systems Engineerings zu verbessern. Durch die Analyse der aktuellen Praxis und die Berücksichtigung zukünftiger Anforderungen soll ein umfassendes Verständnis des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs geschaffen werden, um die Weiterentwicklung des Systems Engineerings voranzutreiben.

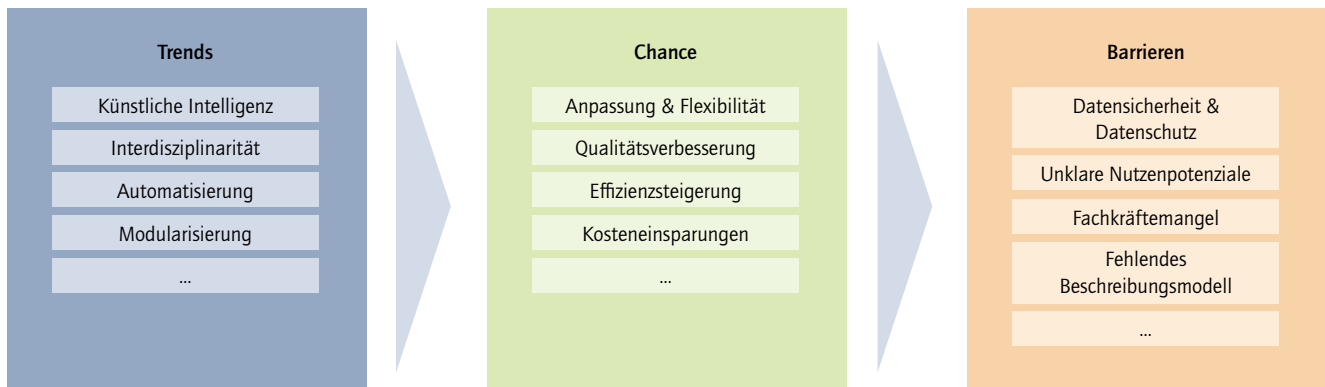
Beschreibungsmodell für interdisziplinäre Abbildung

Für das Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme ist die Entwicklung eines interdisziplinären Beschreibungsmodells vonnöten, das eine ganzheitliche Abbildung aller Aspekte der Produktion ermöglicht. Forschungsbedarf besteht in der Schaffung eines solchen Modells, das die Komplexität der Systeme handhabbar macht und dabei hilft, kritische Verbesserungsbereiche und Technologieauswahl strukturiert anzugehen. Dabei sollte das Beschreibungsmodell in Form eines Systemmodells und einer Systemarchitektur im Sinne des Model-Based Systems Engineerings angelegt sein. Die Herausforderung liegt darin, die größten Hebel für Verbesserungen in der Produktion zu identifizieren und geeignete Technologien unter Berücksichtigung von Green- und Brownfield-Planungen einzubeziehen. Neben dem Beschreibungsmodell fehlt zudem eine klar vorgegebene Vorgehensweise in Form einer Norm oder Richtlinie, vergleichbar mit der VDI 5200 zum Thema Fabrikplanung.

Einsatz künstlicher Intelligenz im Engineering

Weiterer Forschungsbedarf im Engineering von Industrie 4.0-Systemen besteht dahingehend, wie KI erfolgreich und gewinnbringend eingesetzt werden kann. Mithilfe von KI-Algorithmen lassen sich komplexe Prozesse analysieren und optimieren. Außerdem kann KI die Entscheidungsfindung erleichtern, weil sie dabei hilft, große Datenmengen zu analysieren und darauf basierend fundierte Empfehlungen für das Engineering abzuleiten. Zu diesem Zweck müssen neue Algorithmen und Modelle entwickelt werden, die speziell auf die Anforderungen im Engineering-Kontext zugeschnitten sind. Darüber hinaus sind die Auswirkungen des Einsatzes von KI auf die Arbeitsweise und die Rolle der Ingenieurinnen und Ingenieure zu untersuchen. Forschungsbedarf besteht auch bei der Integration von KI in bestehende Engineering-Systeme und -Prozesse. Dazu sind geeignete Schnittstellen und Methoden nötig, die eine nahtlose Zusammenarbeit zwischen KI-Systemen und den Nutzern im Engineering ermöglichen.

Abbildung 17: Ableitung von Trends, Chancen und Barrieren im Engineering



Quelle: eigene Darstellung

Steigerung des Digitalisierungs- und Automatisierungsgrades

Um den Grad der Digitalisierung und Automatisierung zu steigern, ist es erforderlich, Technologien zu entwickeln, die eine Integration von digitalen Systemen über verschiedene Ebenen der Produktion hinweg ermöglichen. Die Forschung muss sich zudem mit der Frage beschäftigen, welches Maß an Wandelbarkeit und Autonomie in unterschiedlichen Branchen sinnvoll und wirtschaftlich umsetzbar ist, und ob es universelle oder branchenspezifische Standards geben sollte.

Voraussetzungen im Engineering-Umfeld für Wandelbarkeit

Um autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme effizienter zu gestalten, ist es entscheidend, die Faktoren zu verstehen, die ihre Flexibilität und Anpassungsfähigkeit während des Engineering-Prozesses bestimmen. Dazu müssen Schlüsselfaktoren im Engineering identifiziert werden, die die Wandelbarkeit von Produktionssystemen beeinflussen. Um eine flexible Gestaltung von Produkten und Produktionssystemen zu gewährleisten, sollten zudem neue diesbezügliche Ansätze und Methoden erforscht werden. Dazu gehört auch die Entwicklung flexibler Engineering-Methoden und -Werkzeuge, die eine schnelle Anpassung und Konfiguration von Produkten und Produktionssystemen ermöglichen. Weiterhin sollten Ansätze und Methoden zur flexiblen, digitalen und integrativen Gestaltung von Produkten und Produktionssystemen erforscht werden. So etwa besteht in Zukunft ein erhöhter Bedarf an Konzepten, die es gestatten, Produktvarianten effizient anzupassen und individualisierte Produkte in der Produktion zu realisieren. Digitale Technologien wie virtuelle Prototypen, Simulationen und KI können hierbei eine wichtige Rolle spielen. Dabei hat diese Expertise aufgezeigt, dass viele Bausteine im Engineering-Umfeld bereits vorhanden sind und lediglich eine zielgerichtete Kombination der Bausteine erforderlich ist. Das Rad muss meist nicht neu erfunden werden, vielmehr können erprobte Ansätze genutzt werden, zum Beispiel die in den oben beschriebenen Best Practices. Es wurde deutlich, dass es viele Ansätze gibt, die nicht immer als Systems Engineering bezeichnet werden, aber entsprechende zentrale Charakteristika aufweisen.

Verbesserung des Transfers zwischen Forschung und Anwendung

Zwischen der akademischen Forschung und der tatsächlichen Umsetzung in den Unternehmen besteht eine Lücke, die es zu schließen gilt. Dafür müssen Forschungsergebnisse effektiv in die Praxis transferiert werden. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die akademische Forschung die Herausforderungen der Unternehmen adressiert und der tatsächliche Nutzen der Erkenntnisse für die Unternehmen gewährleistet ist. Dazu gehört zum einen die Zusammenarbeit zwischen anwendungsorientierter Forschung und Industrieunternehmen sowie die Bereitstellung von praxisorientierten Leitfäden, Best Practices und Handlungsoptionen, die Unternehmen in der Umsetzung unterstützen. Darüber hinaus ist wichtig, Barrieren im Transfer zwischen Forschung und Praxis abzubauen, die einer erfolgreichen Umsetzung entgegenstehen. Ein weiterer Schlüsselfaktor sind Netzwerke und Partnerschaften zwischen Unternehmen, um gemeinsam zu lernen und Ressourcen zu bündeln.

Verbindung von Produkt und Produktionssystem

Es besteht Forschungsbedarf bei der integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem. Dabei sollten die wechselseitigen Einflüsse und Abhängigkeiten von Produktentwicklung und Produktionsprozessen analysiert werden, um Entwicklungsschritte nachvollziehbar zu machen (Traceability). Ändert man beispielsweise ein Bauteil, sollte sofort erfasst werden können, welche Auswirkungen das auf den Produktionsablauf haben könnte.

Auch sollten passende Methoden, Werkzeuge und Kommunikationsstrukturen für eine effektive Zusammenarbeit entwickelt werden. Denn eine enge Verbindung von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung kann Unternehmen widerstandsfähiger, innovativer sowie effizienter machen und die Qualität der Produkte verbessern.

Frühzeitige Einbindung von weiteren Stakeholderinnen und Stakeholdern in die Produktentwicklung

Auch sollte sich die Forschung der wichtigen Frage widmen, mithilfe welcher Methoden und Ansätze Kunden frühzeitig in Entwicklungs- und Validierungsprozesse einbezogen werden können. In dieser Expertise wurde aufgezeigt, dass direktes Feedback und aktive Beteiligung des Kunden (auch innerhalb einer Organisation) maßgeblich für die erfolgreiche und zielgruppengerechte Entwicklung von Systemen und Lösungen sind. Dies ist insbesondere bei der Entwicklung von produkt- und kundenindividuellen Industriegütern und Werkzeugmaschinen der Fall. Feedback- und Kommunikationsprozesse unterstützen die frühzeitige und stetige Validierung von sich teilweise auch ändernden Kundenanforderungen. In diesem Zusammenhang sollte auch untersucht werden, wie sich eine frühe Kundenintegration auf den Produktentwicklungsprozess, insbesondere das Model-Based Systems Engineering, die Produktqualität und die Markteinführung auswirkt.

Ausrichtung auf Kreislaufwirtschaft

Forschungsbedarf besteht auch in der Frage, wie Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen verankert werden können: beispielsweise in Form von modularen Systemen, die eine einfache Demontage und Wiederverwendung von Komponenten ermöglichen, oder in Form von Materialflusssimulationen, die die Recyclingfähigkeit verbessern oder Abfall reduzieren.

Augenmerk auf Resilienz bereits im Engineering-Prozess

Im Hinblick auf den Beitrag autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme für höhere Resilienz von Produktionssystemen und Lieferketten besteht ebenfalls Forschungsbedarf. Notwendig ist die Erforschung von Ansätzen, die autonom wandelbare Systeme in die Lage versetzen, Risiken und Störungen in der Lieferkette zu erkennen und darauf eigenständig zu reagieren. Hierbei sollte untersucht werden, wie solche Systeme Resilienzmerkmale entwickeln und anwenden können.

Etablierung von Standards und Modellierungssprachen

Standards und Modellierungssprachen in der Produktion sind ein zentraler Faktor für autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme. Mithilfe standardisierter Formate und Methoden lassen sich Prozesse effizienter gestalten und die Kommunikation zwischen verschiedenen Systemen und Akteurinnen und Akteuren verbessern. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Frage, welche Standards und Modellierungssprachen und -methoden bestenfalls in der Produktion angewandt oder entwickelt werden sollten. Dabei müssen verschiedene Aspekte wie Datenformate, Schnittstellen, Prozessmodelle, Informationssicherheit und Validierung berücksichtigt werden. Insbesondere sollte das Augenmerk darauf liegen, wie sich die Etablierung von Standards auf Produktivität, Flexibilität und Skalierbarkeit der Produktionsprozesse auswirkt. Im Hinblick auf

die Anpassbarkeit an das Unternehmen und die Komplexität der Produktionssysteme ist zu klären, welche Sprachen, Methoden und Werkzeuge am besten geeignet sind und wie der Datenaustausch innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerks erfolgen kann. Dabei spielt zum Beispiel die Benutzerfreundlichkeit der Modellierungssprache und -methode eine Rolle.

7.4. Zusammenfassung

Frage 4 (Kapitel 7): Welche Chancen, Herausforderungen und Forschungsbedarfe ergeben sich für das Systems Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen?

Systems Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen birgt für Unternehmen zahlreiche Chancen auf Effizienzsteigerungen, Kosteneinsparungen und Qualitätssicherung. Der Einsatz von KI kann die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Produktion verbessern und das Innovationspotenzial durch interdisziplinäre Zusammenarbeit steigern. Personalisierte Lösungen und neue Geschäftsmodelle können den Kundennutzen erhöhen und für mehr Nachhaltigkeit sorgen.

Es kommen jedoch auch neue Herausforderungen auf die Unternehmen zu. Die neun identifizierten Herausforderungen umfassen die Komplexität der Integration neuer Technologien, fehlende digitale Durchgängigkeit, organisatorische Trennung von Produkt- und Produktionssystementwicklung, Datensicherheit und Datenschutz, unklare Nutzenpotenziale, Fachkräftemangel, fehlende Beschreibungsmodelle und Vorgehensweisen, rechtliche und regulatorische Barrieren sowie mangelnde Standardisierung.

Die Idee autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme erscheint derzeit eher als Zukunftsmodell, dessen praktische Umsetzung noch aussteht. In den Interviews mit den Fachleuten wurde deutlich, dass es zwar viele unterschiedliche Perspektiven und Interesse an dem Thema gibt, es jedoch noch an praktischen Erfahrungen mangelt. Um aus der Vision dieser Systeme greifbare Realität werden zu lassen, ist daher unter anderem vertiefende Forschung notwendig.

Die zahlreichen und vielschichtigen Herausforderungen, die der Einsatz von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen mit sich bringt, machen deutlich, wie relevant weitere Forschung in diesem Bereich ist. Beispielsweise ist ein interdisziplinäres Beschreibungsmodell vonnöten, das Produktionsprozesse umfassend abbildet und sich an Green- und Brownfield-Planungen orientiert. Gleichzeitig bedarf es eines Ansatzes, der die Methoden zur Entwicklung autonomer und wandelbarer Produktionssysteme zusammenführt. Auch sollte der Einsatz von KI im Rahmen der Prozessoptimierung und Entscheidungsfindung stärker beleuchtet werden. Hier stellt sich beispielsweise die Frage, wie Algorithmen und Modelle bestmöglich gestaltet werden und wie eine nahtlose Integration von KI in bestehende Systeme gelingen kann.

Auch sollte sich die Forschung der Frage widmen, wie der Digitalisierungs- und Automatisierungsgrad in der Produktion erhöht werden kann, wie digitale Technologien integriert und Standards etabliert werden können. Dabei ist eine gute und regelmäßige Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie entscheidend, um Forschungsergebnisse in die Praxis zu überführen und Netzwerke zwischen Unternehmen zu fördern.

Weitere Forschungsbedarfe wurden in folgenden Bereichen identifiziert, die auf Resilienz, Nachhaltigkeit, Kundenbedürfnisse und Prozesseffizienz abzielen: die integrative Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen, die frühe Kundenintegration, die Ausrichtung auf Kreislaufwirtschaft sowie die Etablierung von Modellierungssprachen und Standards.

8. Zukunft gestalten

In diesem Kapitel werden auf Basis der Erkenntnisse dieser Expertise drei Handlungsfelder für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik¹⁰⁶ abgeleitet, die darauf abzielen, das Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme voranzutreiben. Das erste Handlungsfeld adressiert die Zusammenarbeit und den Austausch zwischen den verschiedenen Ingenieursdisziplinen (siehe Kapitel 8.1). Das zweite Handlungsfeld richtet sich an die Weiterentwicklung der Engineering-Methoden, um den Anforderungen und Herausforderungen autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme gerecht zu werden (siehe Kapitel 8.2). Das dritte Handlungsfeld behandelt Wissensvermittlung, Know-how-Transfer und die Ausbildung von Fachkräften als Treiber notwendiger Entwicklungen (siehe Kapitel 8.3). Abschließend geht es um die Notwendigkeit der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Engineerings in den Unternehmen (siehe Kapitel 8.4).

8.1. Handlungsfeld – Kollaboration zwischen den Engineering-Bereichen ausbauen

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Unternehmen spielt eine wichtige Rolle für ein übergreifendes Verständnis der Herausforderungen. Sie kann dazu beitragen, Teillösungen in Gesamtlösungen zu überführen und Synergien auszuschöpfen. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor dafür ist eine gemeinsame Vision.

Daher sollte die Forschung die Frage beleuchten, wie die verschiedenen Disziplinen und Communities des Systems Engineerings, der Produktionssystementwicklung und der Entwicklung autonomer und wandelbarer Produktionssysteme enger miteinander vernetzt werden können. Ein gemeinsames Systemmodell kann dazu beitragen, Komplexität zu reduzieren und frühzeitig Fehler zu identifizieren. Gleichzeitig ermöglicht eine frühe Integration der Produktionssystementwicklung, die Konstruktion fristgerecht fertigzustellen, Nacharbeitungsaufwände zu reduzieren und den Umbau insbesondere im Brownfield zu erleichtern. Deshalb bedarf es einer integrativen Entwicklung von Produktionssystemen, die Elemente des Systems Engineerings berücksichtigt.

8.2. Handlungsfeld – Weiterentwicklung von Engineering-Methoden

Darüber hinaus sollten Entwicklungsmethoden im Engineering branchenspezifisch oder -übergreifend weiterentwickelt werden. Die Forschung muss sich daher auch der Frage widmen, wie Wandelbarkeit und Autonomie bereits in der Produktentstehung integriert werden können, um zukunftsfähige Produktionssysteme zu entwickeln. Weiterhin bedarf es einer Methodik, mittels derer Unternehmen geeignete Technologien zur Optimierung ihrer Produktion auswählen können. Außerdem sollte ein Vorgehensmodell erarbeitet werden, das eine integrative Entwicklung von Industrie 4.0-Systemen mit Methoden des Systems Engineerings beinhaltet und die Autonomie und Wandelbarkeit dieser Systeme berücksichtigt. Außerdem sollte man die Entwicklung geeigneter Feedback- und Kommunikationsmechanismen zur frühzeitigen Validierung berücksichtigen, um die Anforderungen und Veränderungen der Kundenanforderungen an Produktionssysteme zu erfassen. Eine detaillierte Auflistung weiterer Forschungsbedarfe ist in Kapitel 7.3 zu finden.

8.3. Handlungsfeld – Investition in Wissen und Bildung

Investitionen in Wissen und Bildung sind notwendig, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden. Dabei spielen Interdisziplinarität, Kreativität, systemisches Denken und Softskills eine entscheidende Rolle. Damit möglichst viele Fachkräfte Fähigkeiten in diesen Bereichen entwickeln, müssen die akademische Welt und Unternehmen eng zusammenarbeiten.

So sollten diese Kompetenzen bereits im Studium, etwa in Form von interdisziplinären Studiengängen gefördert werden. Für mehr Interdisziplinarität ist ein Ausbau der Lehre erforderlich. Softskills wie Neugier und Teamfähigkeit sollten genauso aufgebaut werden wie ein Verständnis für Systeme und ihre Logik. Zudem sollte das Systems Engineering als eigenes Lehrfach an Universitäten etabliert werden.

¹⁰⁶ Die Handlungsfelder lassen sich nicht trennscharf den einzelnen Bereichen zuordnen. Zum Beispiel ist im dritten Handlungsfeld die Politik dazu aufgefordert, die Rahmenbedingungen zu schaffen, um interdisziplinäre Studiengänge zu ermöglichen. Unternehmen werden aufgefordert, in Weiterbildungsmaßnahmen zu investieren, und die Wissenschaft wird dazu aufgerufen, Studiengänge zu überarbeiten, um den technologischen Wandel in den Lehrprogrammen abzubilden.

Außerdem braucht es Fachleute mit Kompetenzen zum Beispiel in den Bereichen Autonomie, KI und Ethik. Dabei sollten sich Ausbildungen und Studiengänge kontinuierlich an aktuellen Themen orientieren. Unternehmen sollten auch die Weiterbildung in Hard-skills und Softskills übernehmen.

Vernetztes und technologieübergreifendes Denken wird eine entscheidende Kompetenz der Zukunft sein. Investitionen in Start-ups können dazu beitragen, innovative Talente und Wissen zu gewinnen.



Wir müssen am Standort Deutschland sehr darauf achten, die richtigen Talente im Engineering zusammenzubringen.

8.4. Abschließende Betrachtungen für Unternehmen

Die vorliegende Expertise befasst sich mit dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf für das Systems Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme. Es ergeben sich drei zentrale Ergebnisse (siehe Abbildung 18).

- **Aktueller Stand autonom wandelbarer**

Industrie 4.0-Systeme: Autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme sind zu verstehen als Weiterentwicklung von Industrie 4.0. Aktuell werden sie noch nicht eingesetzt, dennoch ist ein zukünftiger Einsatz durch eine zunehmende Digitalisierung zu erwarten. Diese eröffnet Chancen, den Mangel an Fachkräften zu kompensieren. Angesichts der Verkürzung der durchschnittlichen Wochenarbeitszeit in Deutschland in den letzten Jahren und des Nachwuchsmangels in den Ingenieurwissenschaften ist dies von großer Bedeutung. Der Einsatz autonom wandelbarer Systeme erfolgt zukünftig in ausgewählten Bereichen der Fabrik, in denen ein wirtschaftlicher Betrieb sinnvoll ist.

- **Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme:**

Bei der Entwicklung von Produktionssystemen können zwei Sichtweisen unterschieden werden: die des Herstellers, der das System in das Produktionssystem des Kunden integriert, und die des Nutzers, der Werkzeugmaschinen in sein eigenes Produktionssystem integriert, um dann

ein eigenes Produkt herzustellen. Beim Engineering als Hersteller kommen häufig Methoden des Systems Engineerings zum Einsatz, da die Produktionssysteme in Form einer Produktentwicklung entworfen werden. Das Engineering als Nutzer unterscheidet sich insofern, dass hier klassische Fabrikplanungsmethoden ohne Systems Engineering eingesetzt werden. Außerdem ist zu beachten, dass bei der Produktionssystementwicklung als Nutzer die Produktentwicklung und die Produktionssystementwicklung in weiten Teilen der Industrie unabhängig voneinander erfolgen. Gleichzeitig werden Methoden für Autonomie oder Wandelbarkeit eingesetzt, nicht jedoch gemeinsame Methoden, die Autonomie und Wandelbarkeit berücksichtigen. Auch besteht Verbesserungspotenzial bei der Kombination von Methoden des Systems Engineerings und der Produktionssystementwicklung. Die effiziente und effektive Kombination der beiden Methoden ist notwendig, um auf sich stetig ändernde Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen reagieren zu können.

- **Forschungsbedarf im Engineering von autonom**

wandelbaren Industrie 4.0-Systemen: Um die Etablierung zukunftsfähiger Produktionssysteme weiter zu unterstützen, ist die Entwicklung verschiedener methodischer Hilfsmittel notwendig. Angesichts der Vielzahl technischer Möglichkeiten liegt die Herausforderung darin, geeignete Technologien zur Optimierung des Produktionssystems einzusetzen. Daher bedarf es einer Methodik, die Unternehmen bei der Auswahl dieser Technologien anwenden können. Darüber hinaus sollte das Engineering durch einen integrativen Ansatz ergänzt werden. Ziel ist, ein Beschreibungsmodell zu entwickeln, das alle Aspekte einer Produktion interdisziplinär in Form eines Systemmodells abbildet und so die Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung erleichtert. So können die Vorteile des Systems Engineerings mit den Methoden der Produktionssystementwicklung kombiniert werden und gleichzeitig eingesetzt werden, um Methoden für Autonomie und Wandelbarkeit zu kombinieren. Das vereinfacht beispielsweise, die Ist-Situation zu analysieren und den Einfluss von Produktänderungen auf das Produktionssystem abzuschätzen. Unternehmen sollten auch den Austausch mit anderen Unternehmen und Forschungseinrichtungen durch Netzwerke gezielt nutzen, um Kräfte und Kompetenzen zu bündeln.

Abbildung 18: Handlungsoptionen zur Verbesserung des Engineerings von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen

Aktueller Stand autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	Engineering autonom wandelbarer Industrie 4.0-Systeme	Forschungsbedarf im Engineering von autonom wandelbaren Industrie 4.0-Systemen
<p>These 1: Die Produktion verändert sich zunehmend in Richtung Digitalisierung. Die Digitalisierung kompensiert dabei die geringe Verfügbarkeit von Arbeitskräften auf dem Arbeitsmarkt, die vor allem durch den Nachwuchsmangel und die Reduzierung der durchschnittlichen Arbeitszeit verursacht wird.</p>	<p>These 3: Für die Entwicklung von Produktionssystemen werden Methoden der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung eingesetzt. Die Methoden integrieren verschiedene Fachdisziplinen. Eine übergreifende Zusammenarbeit scheitert in vielen Unternehmen.</p>	<p>These 4: Es existieren sowohl Methoden zur Entwicklung autonomer Systeme als auch Methoden zur Entwicklung wandelbarer Systeme. Weiterer Forschungsbedarf besteht für Engineering-Methoden von autonom wandelbaren Produktionssystemen.</p>
<p>These 2: Autonom wandelbare Industrie 4.0-Systeme werden in spezifischen Bereichen eingesetzt, um wirtschaftliche Vorteile zu erzielen. Der Einsatz in der gesamten Fabrik ist selten.</p>	<p>These 6: Die Nutzerorientierung und die Kundeneinbindung zu Validierungszwecken sind besonders im Engineering von Produktionssystemen relevant, um Produktionssysteme optimal auf das Produkt abzustimmen.</p>	<p>These 8: Es bedarf einer Methodik zur Auswahl der vielversprechendsten Technologien in der Produktion, um herauszufinden, welche Technologien den größte Hebel für die eigene Produktion bieten.</p>
<p>These 5: In der Automobilindustrie liegt der Schwerpunkt auf wandelbaren Produktionssystemen, während insbesondere im Maschinenbau autonome Systeme im Vordergrund stehen.</p>	<p>These 7: Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung erfolgt in weiten Teilen der Industrie unabhängig voneinander.</p>	<p>These 10: Es fehlt ein Beschreibungsmodell, das es ermöglicht, alle Aspekte einer Produktion interdisziplinär abzubilden (Systemmodell), z. B. zur Erfassung der Ist-Situation und zur Abschätzung der Einflüsse bei Änderungen (Stichwort: Traceability).</p>
	<p>These 9: Die Kombination von Methoden des Systems Engineering und der Produktionssystementwicklung bietet die Möglichkeit, schnell auf sich rasch ändernde Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen zu reagieren.</p>	<p>These 11: Es fehlt eine Vorgehensweise für Planungsprozesse in der Smart Factory in Anlehnung an die VDI 5200 für die Fabrikplanung.</p>

Quelle: eigene Darstellung

9. Literaturverzeichnis

Abele et al. 2011

Abele, E.; Albrecht, F.; Schröder, L.: „Wandlungsfähige Produktion in der Medizintechnik“. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 106 (5), 2011, S. 306–309. DOI: 10.3139/104.110559.

acatech 2016

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften(Hrsg.): *Kompetenzen für Industrie 4.0. Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze*, 2016. URL: <https://www.acatech.de/publikation/kompetenzen-fuer-industrie-4-0-qualifizierungsbedarfe-und-loesungsansaeetze/> [Stand: 13.05.2024].

acatech 2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0*, 2018. URL: <https://www.acatech.de/publikation/wandlungsfae-hige-menschenzentrierte-strukturen-in-fabriken-und-netzwerken-der-industrie-4-0/> [Stand: 13.05.2024].

acatech 2024

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *3 Fragen an Rainer Stark zum Engineering von Industrie 4.0-Lösungen (Themenfeld 3/ Themenfelder Industrie 4.0)*, 2024. URL: <https://www.acatech.de/3-fragen-an-rainer-stark-zu-handlungsbedarfen-in-der-industrie-4-0-themenfeld-3-themenfelder-industrie-4-0/>, [Stand:13.05.2024].

Backhaus und Voeth 2015

Backhaus, K.; Voeth, M. (Hrsg.): *Handbuch Business-to-Business-Marketing. Grundlagen, Geschäftsmodelle, Instrumente des Industriegütermarketing*, 2015. URL: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1006851> [Stand: 13.05.2024].

Bauernhansl et al. 2016

Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*, 2016. URL: https://wgp.de/wp-content/uploads/WGP-Standpunkt_Industrie_4-0.pdf [Stand: 13.05.2024]

Begg 2023

Begg, R.: *Full Automation: The Path to Lights-Out Production*. URL: <https://www.machinedesign.com/community/editorial-comment/article/21270004/full-automation-the-path-to-lightsout-production> [Stand: 15.05.2024].

Beyerer et al. 2021

Beyerer, J.; Deserno, T.; Straube, S.; Tchouchenkov, I.; Wedler, A.: *Kompetent im Einsatz. Variable Autonomie Lernender Systeme in lebensfeindlichen Umgebungen*, 2021. URL: <https://www.acatech.de/publikation/kompetent-im-einsatz-variable-autonomie-lernender-systeme-in-lebensfeindlichen-umgebungen/> [Stand 15.05.2024].

Bikner-Ahsbahs et al. 2015

Bikner-Ahsbahs, A.; Knipping, C.; Presmeg, N.: *Approaches to Qualitative Research in Mathematics Education*. Dordrecht: Springer Netherlands 2015.

Bischoff et al. 2015

Bischoff, J.; Taphorn, C.; Wolter, D.; Braun, N.; Fellbaum, M.; Goloverov, A.: *Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand. Studie*, 2015. URL: https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wertsch%C3%B6pfungskette-Erschlie%C3%9Fender-Potenziale.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [Stand: 14.05.2024].

BMBF 2016

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): *Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand. Gute Geschäfte, zufriedene Kunden, erfolgreicher Mittelstand – Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*, 2016. <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wertsch%C3%B6pfungskette-Erschlie%C3%9Fender-Potenziale.html> [Stand: 14.05.2024].

Bracht et al. 2018

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: *Digitale Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018.

Bretz 2021a

Bretz, L.: „Herausforderungen und Chancen bei der Einführung von Systems Engineering“. In: *ATZ Extra* 26 (S6), 2021, S. 12–15. DOI: 10.1007/s35778-021-0496-x.

Bretz 2021b

Bretz, L.: *Rahmenwerk zur Planung und Einführung von SE und MBSE*, 2021. URL: <https://d-nb.info/1245445944/34> [Stand: 14.05.2024].

BMWi 2017

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Industrie 4.0 Plug-and-Produce for Adaptable Factories: Example Use Case Definition, Models, and Implementation*, 2017. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Industrie-4-0-Plug-and-Produce.html> [Stand: 14.05.2024].

BMWi 2019

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Leitbild 2030 für Industrie 4.0. Digitale Ökosysteme global gestalten*, 2019. URL <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2019/10/kapitel-1-5-leitbild-2030-fuer-industrie-4-0.html> [Stand: 14.05.2024].

BMWi 2020

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *KI in der Industrie 4.0. Orientierung, Anwendungsbeispiele, Handlungsempfehlungen*. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/ki-in-der-industrie-4-0-orientierung-anwendungsbeispiele-handlungsempfehlungen.html> [Stand 14.05.2024].

CLAAS KGaA mbH 2024

CLAAS KGaA mbH (2024): CLAAS baut für die Zukunft. Online verfügbar unter <https://www.claas.de/unternehmen/claas-erleben/maehdrescher-produktion-harsewinkel>, zuletzt geprüft am 15.04.2024.

Delorme 2023

Delorme, C.: *Arbeitswelt im Wandel – neue Studie untersucht Zukunftsperspektiven*, 2023. URL: <https://www.stepstone.de/e-recruiting/blog/arbeitsmarkt-2023-hr-perspektive/> [Stand: 14.05.24].

Demeester et al. 2011

Demeester, F.; Dresselhaus, M.; Essel, I.; Jatzkowski, P.; Nau, M.; Pause, B.: „Referenzsysteme für wandlungsfähige Produktion“. In: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (Hrsg.): *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven*, 2011, S. 449–477.

DLR 2020

Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR): *U-Shift*. Hg. v. Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR), 2020. URL: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/u-shift> [Stand: 14.05.2024].

Dombrowski und Krenkel 2021

Dombrowski, U.; Krenkel, P.: *Ganzheitliches Produktionsmanagement*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2021.

Dumitrescu et al. 2018

Dumitrescu, R.; Westermann, T.; Falkowski, T.: „Autonome Systeme in der Produktion“. In: *I4OM* 2018 (6), 2018, S. 17–20. DOI: 10.30844/I4OM_18_6_17-20.

Dumitrescu et al. 2021

Dumitrescu, R.; Albers, A.; Riedel, O.; Stark, R.; Gausemeier, J.: *Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering*, 2021. URL: <https://www.acatech.de/publikation/engineering-in-deutschland/> [Stand: 14.05.2024]

Engels 2023a

Engels, Barbara: „Künstliche Intelligenz in der deutschen Wirtschaft: Ohne Digitalisierung und Daten geht nichts“. In: *Wirtschaftsdienst* 103 (8), 2023, S. 525–529. DOI: 10.2478/wd-2023-0151.

Engels 2023b

Engels, Barbara: *Mit Daten nichts am Hut? Datennutzungspotenziale für Unternehmen*, 2023. URL: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/policy_papers/PDF/2023/IW-Policy-Paper_2023-Mit-Daten-nichts-am-Hut.pdf [Stand 14.05.2024].

European Commission 2023

European Commission: *A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age*. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_510 [Stand: 14.05.2024].

Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017

Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum: *Fachforum autonome Systeme. Chancen und Risiken für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft*. URL: <https://www.acatech.de/publikation/fachforum-autonome-systeme-chancen-und-risiken-fuer-wirtschaft-wissenschaft-und-gesellschaft-abschlussbericht/download-pdf?lang=de> [Stand: 14.05.2024].

Fraunhofer IPA 2023a

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (Fraunhofer IPA) (2023a): *Auf die Themen fokussieren, die wirklich wichtig sind*, 2023. URL: <https://interaktiv.ipa.fraunhofer.de/digitale-transformation/auf-die-themen-fokussieren-die-wirklich-wichtig-sind/> [Stand: 14.05.2024].

Fraunhofer IPA 2023b

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (Fraunhofer IPA): *Go with the Flow: Matrixproduktion im Fluss*, 2023. URL: <https://interaktiv.ipa.fraunhofer.de/resiliente-wertschoepfung/go-with-the-flow-matrixproduktion-im-fluss/> [Stand: 14.05.2024].

Gausemeier et al. 2013

Gausemeier, J.; Czaja, A. M.; Wiederkehr, O.; Dumitrescu, R.; Tschirner, C.; Steffen, D.: „Studie: Systems Engineering in der industriellen Praxis“. In: *Paderborner Workshop: „Entwurf mechatronischer Systeme“*, 9, 2013.

Gausemeier et al. 2019

Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Echterfeld, J.; Pfänder, T.; Steffen, D.; Thielemann, F.: *Innovationen für die Märkte von morgen. Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen*. München: Hanser 2019.

Geissbauer et al. 2022

Geissbauer, R.; Bruns, M.; Wunderlin, J.: *PwC Digital Factory Transformation Survey 2022*, 2022. URL: <https://www.pwc.de/de/strategie-organisation-prozesse-systeme/operations/smart-manufacturing/digital-factory-transformation-survey-2022.html> [Stand: 14.05.2024].

Grundig 2021

Grundig, C. G.: *Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen*, 2021. URL: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446470064> [Stand: 14.05.2024].

Haberfellner 2012

Haberfellner, R.: *Systems Engineering \x0D\x0A. Grundlagen und Anwendung*. Zürich: Orell Füssli 2012.

Hermes et al. 2006

Hermes, René; Pfeifer, Thilo; Schmitt, Robert (2006): Definition: Autonomie, Autonome Produktionszelle. In: Tilo Pfeifer und Robert Schmitt (Hg.): *Autonome Produktionszellen. Komplexe Produktionsprozesse flexibel automatisieren*. [Online-ausg.]. Berlin [u. a.]: Springer (VDI-Buch), S. 1–5.

Hirsch-Kreinsen 2022

Hirsch-Kreinsen, H.: *Industry 4.0: Options for Human-Oriented Work Design*, 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2413-4155/5/1/9/pdf> [Stand: 14.05.2024].

Hirsch-Kreinsen 2023

Hirsch-Kreinsen, H. (2023): *Künstliche Intelligenz und Wandel des Innovationssystems*, 2023. URL: https://sfs.sowi.tu-dortmund.de/storages/sfs-sowi/r/Publikationen/Beitraege_aus_der_Forschung/BadF_Band214.pdf [Stand: 14.05.2024].

Hirsch-Kreinsen et al. 2022

Hirsch-Kreinsen, H.; Kubach, U.; Stark, R.; von Wichert, G.; Litsche, S.; Sedlmeir, J.; Steglich, S.: *Themenfelder Industrie 4.0 – Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0. Unter Mitarbeit von acatech*, 2022. URL: <https://www.acatech.de/publikation/themenfelder-i40-akt/download-pdf/?lang=de> [Stand: 14.05.2024].

INCOSE 2018

The International Council on Systems Engineering (INCOSE): *Systems Engineering Competency Framework*, 2018. URL: https://www.incose.org/docs/default-source/professional-development-portal/isecf.pdf?sfvrsn=dad06bc7_4 [Stand: 14.05.2024].

INCOSE 2023

The International Council on Systems Engineering (INCOSE): *INCOSE Systems Engineering Handbook. 5th ed.* Newark: John Wiley & Sons Incorporated 2023.

ISO/IEC/IEEE 15288 2023

ISO/IEC/IEEE 15288: *Systems and software engineering*, 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/81702.html> [Stand: 15.05.2024]

Kaffenberger GfSE 2017

Kaffenberger, R. GfSE (Gesellschaft für Systems Engineering e.V.): *INCOSE Systems Engineering Handbuch. Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-Prozesse und -Aktivitäten: INCOSE-TP-2003-002-04 2015*. München: GfSE e.V 2017.

Kagermann et al. 2013

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, 2023. URL: https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/umsetzungsempfehlungen_industrie4_0.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Stand: 14.05.2014].

Kern 2021

Kern, W.: *Modulare Produktion. Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau*. Heidelberg: Springer Verlag 2021.

Kitchenham und Charters 2007

Kitchenham, B.; Charters, S.: „Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering version 2.3“. *Engineering* 45.4ve, 2007, S. 1051..

Könemann et al. 2022

Könemann, U.; Wilke, D.; Anacker, H.; Dumitrescu, R.: "Identification of stakeholder-specific Systems Engineering competencies for industry." *2022 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2022.

Krauß et al. 2023

Krauß, J.; Schmetz, A.; Fitzner, A.; Ackermann, T.; Pouls, K. B.; Hülsmann, T.: *Der Digitale Zwilling in der Batteriezellenfertigung // Der Digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung. Potenziale für eine effiziente und nachhaltige Produktion. Unter Mitarbeit von Fraunhofer-Gesellschaft. Hg. v. Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB*, 2023. URL: <http://dx.doi.org/10.24406/publica-496> [Stand: 14.05.2024].

Kübler et al. 2018

Kübler, K.; Scheifele, S.; Scheifele, C.; Riedel, O.: "Model-Based Systems Engineering for Machine Tools and Production Systems (Model-Based Production Engineering)". In: *Procedia Manufacturing* 24, 2018, S. 216–221. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.036.

Kuntze und Mai 2020

Kuntze, P.; Mai, C.: *Arbeitsproduktivität – nachlassende Dynamik in Deutschland und Europa*, 2020. URL: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/WISTA-Wirtschaft-und-Statistik/2020/02/arbeitsproduktivitaet-022020.html> [Stand 14.05.2024]

Lochmahr und Ewig 2023

Lochmahr, A.; Ewig, M.: *Praxishandbuch digitale Automobillogistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2023.

Ludwig et al. 2021

Ludwig, C.; Farrenkopf, T.; Panske, T.; Gensert, H.: Smart Factory im Werkzeugbau bei KAMAX. In: *I4OM* 4, 2021, S. 29–33. DOI: 10.30844/I4OM_21-4_S29-33.

Marko 2022

Marko, A. (2022): *Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken. Ein Bitkom-Studienbericht*, 2022. URL: <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-01/221125StudieIndustrie40-1.pdf> [Stand: 14.05.2024]

Mathis-Ullrich und Scheikl 2021

Mathis-Ullrich, F.; Scheikl, P. M.: Robotik im Operationssaal – (Ko-)Operieren mit Kollege Roboter. In: *Der Gastroenterologe: Zeitschrift für Gastroenterologie und Hepatologie*, 16 (1), 2021, S. 25–34. DOI: 10.1007/s11377-020-00496-x.

Mayring 2014

Mayring, P.: *Qualitative Content Analysis*, 2014. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-395173> [Stand: 14.05.2024]

Mundt et al. 2023

Mundt, Enrik; Wilke, Daria; Anacker, Harald; Dumitrescu, Roman: Principles for the effective application of Systems Engineering: A systematic literature review and application use case. *IEEE SMC*, Maui, Hawaii, 2023.

Neugebauer et al. 2016

Neugebauer, R.; Hippmann, S.; Leis, M.; Landherr, M.: Industrie 4.0 – From the Perspective of Applied Research. In: *Procedia CIRP* 57, 2016, S. 2–7. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.002.

Nyhuis et al. 2007

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Briek, M.: Adequate and economic factory transformability and the effects on logistical performance. In: *Int J Flex Manuf Syst* 19, 3, 2007, S. 286–307. DOI: 10.1007/s10696-007-9027-3.

Pistorius 2020

Pistorius, J.: *Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion. Grundlagen • Potenziale • Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2020.

Porsche AG 2019a

Porsche AG: *Die Fabrik der Zukunft – smart, lean und green. Mit der Premiere des ersten vollelektrischen Sportwagens von Porsche gehen auch große Veränderungen des Traditionsstandorts in Stuttgart einher*, 2019. URL: <https://newsroom.porsche.com/de/unternehmen/porsche-taycan-zuffenhausen-zero-impact-fabrik-der-zukunft-produktion-4-0-elektromobilitaet-18489/fabrik-der-zukunft-smart-lean-green-18594.html> [Stand 14.05.2024].

Porsche AG 2019b

Porsche AG: *Ein Werk entsteht. Während in Zuffenhausen tagtäglich 250 zweitürige Sportwagen der Baureihen 718 und 911 – und damit mehr als jemals zuvor – produziert werden, entsteht parallel dazu eine neue Fabrik im Werk*, 2019. URL: <https://newsroom.porsche.com/de/unternehmen/porsche-taycan-zuffenhausen-zero-impact-fabrik-der-zukunft-produktion-4-0-elektromobilitaet-18489/taycan-werk-18599.html> [Stand: 14.05.2014].

Porsche AG 2020

Porsche AG: *Alles auf einer Karte. Kein Fahrzeug geht ohne sie durch die Produktion: die Wagenbegleitkarte. Ein Hilfsmittel im Wandel der Zeiten*, 2020. URL: <https://newsroom.porsche.com/de/2020/unternehmen/porsche-wagenbegleitkarte-entwicklung-21519.html> [Stand: 14.05.2024].

Porsche AG 2024

Porsche AG (2024): Porsche führt MHP FleetExecuter am Standort Zuffenhausen ein. Online verfügbar unter <https://newsroom.porsche.com/de/2024/unternehmen/porsche-mhp-fleetexecuter-standort-zuffenhausen-35572.html>, zuletzt aktualisiert am 25.03.2024, zuletzt geprüft am 15.04.2024.

PEM RWTH Aachen 2023

Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) RWTH Aachen: *PEM erforscht industrietaugliche Automatisierung der Batteriedemontage*, 2023. URL: <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Der-Lehrstuhl/Presse-Medien/Aktuelle-Meldungen/~bdpecl/PEM-und-Partner-erforschen-industrietaug/> [Stand: 14.05.2024].

Rudnicka 2023

Rudnicka, J.: Index der Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigen in Deutschland von 1991 bis 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/974210/umfrage/produktivitaet-je-erwerbstaetigen-in-deutschland/> [Stand 14.05.2024].

Rudnicka 2024

Rudnicka, J.: Index der Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigenstunde in Deutschland von 1991 bis 2022, 2024. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/974199/umfrage/produktivitaet-je-erwerbstaetigen-stunde-in-deutschland/> [Stand: 14.05.2024].

Schallmo et al. 2023

Schallmo, D. R. A.; Lang, K.; Werani, T.; Krümay, B.: *Digitalisierung. Fallstudien, Tools und Erkenntnisse für das digitale Zeitalter*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler 2023.

Scholz-Reiter und Freitag 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M. (2007): Autonomous Processes in Assembly Systems. In: *CIRP Annals* 56 (2), S. 712–729. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.002.

Schuh et al. 2017

Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; ten Hompel, M.; Wahlster, W.: *Industrie 4.0 Maturity Index – Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten*, 2017. URL: <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-die-digitale-transformation-von-unternehmen-gestalten/download-pdf?lang=de> [Stand: 14.05.2024].

Schumacher und Bauer 2023

Schumacher, Simon; Bauer, Dennis (2023): Autonome Produktion. In: Thomas Bauernhansl, Birgit Vogel-Heuser und Michael ten Hompel (Hg.): *Handbuch Industrie 4.0. Band 1: Produktion*. Unter Mitarbeit von Andreas Bildstein. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 95–122.

Soliman und Saurin 2017

Soliman, M.; Saurin, Tarcisio A.: "Lean production in complex socio-technical systems: A systematic literature review". In: *Journal of Manufacturing Systems* 45, 2017, S. 135–148. DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.09.002.

Statista 2023a

Statista Bestand an offenen Arbeitsstellen im Jahresdurchschnitt bis 2023. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2903/umfrage/jahresdurchschnittswerte-des-bestands-an-offenen-arbeitsstellen/> [Stand: 14.05.2024]

Statista 2023b

Statista Industrie 4.0 – Umfrage zur Bedeutung in Deutschland 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/830769/umfrage/bedeutung-von-industrie-4-0-in-deutschland/> [Stand: 14.05.2024]

Statistisches Bundesamt 2008

Statistisches Bundesamt: *Klassifikation. Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige*, 2008. URL: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/klassifikation-wz-2008.html> [Stand: 14.05.2024].

Statistisches Bundesamt 2021

Statistisches Bundesamt: *Industrie 4.0: Roboter und 3D-Drucker immer weiter verbreitet. Pressemitteilung Nr. 180 vom 12. April 2021*. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/04/PD21_180_52911.html, [Stand: 14.05.2024]

Statistisches Bundesamt 2023a

Statistisches Bundesamt: *Produktionsindex, 2023*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeiten-des-Gewerbe/Methoden/Erlaeuterungen/produktionsindex.html> [Stand 14.05.2024].

Statistisches Bundesamt 2023b:

Statistisches Bundesamt: *Produktionsindex, produzierendes Gewerbe, 2023*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Produktion/kpi111.html#355020> [Stand: 14.05.2024]

Statistisches Bundesamt 2023c

Statistisches Bundesamt: *Wöchentliche Arbeitszeit, 2023* URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Qualitaet-Arbeit/Dimension-3/woechentliche-arbeitszeit.html> [Stand: 15.05.2024].

Ten-Cate et al. 2022a

Ten-Cate, Corinna; Eickmann, Verena; Marquardt, Wolfgang; Westermann, Ricarda: *Ein Schlüssel ist, die Projekte für alle Mitarbeitenden transparent zu machen, 2022...* URL: <https://www.datenfabrik-nrw.de/unsere-leuchtturmfabriken/projekt-claas/> [Stand 15.05.2024].

Ten-Cate et al. 2022b

Ten-Cate, Corinna; Eickmann, Verena; Marquardt, Wolfgang; Westermann, Ricarda: *Wir wollen die Potenziale der digitalen Transformation in unserer Fertigung nutzen, 2022*. URL: <https://www.datenfabrik-nrw.de/unsere-leuchtturmfabriken/projekt-schmitz-cargobull/> [Stand 15.05.2024]

Ulich 2013

Ulich, E.: „Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme – eine Erinnerung“. In: *Journal Psychologie des Alltagshandelns*, 2013, S. 4–12.

VDI-Richtlinie VDI2206a 2021

VDI-Richtlinie VDI2206a: *VDI-Richtlinie 2206:2021: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Berlin: Beuth Verlag 2021.

VDI-Richtlinie VDI2221-1 2019

VDI-Richtlinie VDI2221-1: *VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag 2019.

VDI-Richtlinie VDI4499-1 2008

VDI-Richtlinie VDI4499-1: *VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1: Digitale Fabrik – Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag 2019.

VDI-Richtlinie VDI5200-1 2011

VDI-Richtlinie VDI5200-1, 02.2011: *VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1: Fabrikplanung – Planungsvorgehen*. Berlin: Beuth Verlag 2011.

VDMA Batterieproduktion 2023

VDMA Batterieproduktion (Hrsg.): *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030*. URL: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/e847dbb9-6a0d-483c-a9bf-b7ce6611135e/details> [Stand 15.05.2024]

Vogel-Heuser et al. 2017

Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI Springer Reference) 2017.

Vogel-Heuser und Bengler 2023

Vogel-Heuser, B.; Bengler, K.: „Von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0 – Idee, Konzept und Wahrnehmung“. In: *HMD*. DOI: 10.1365/s40702-023-01002-x.

Wannenwetsch 2021

Wannenwetsch, Helmut (2021): *Industrie 4.0, Produktion 4.0 und Einkauf 4.0*. In: Helmut Wannenwetsch (Hg.): *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 571–602.

Wiendahl 2009

Wiendahl, H.: „Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen“. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (1-2), 2009, S. 32–37. DOI: 10.3139/104.110002.

Wiendahl et al. 2014

Wiendahl, H.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München, Wien: Hanser 2014.

Winkelhaus et al. 2021

Winkelhaus, S.; Sutter, A.; Grosse, E.; Morana, S.: *Soziotechnische Systeme: Der Mensch in der Industrie 4.0*. In: *I4OM* 2021 (3), 2021, S. 45–48. DOI: 10.30844/I4OM_21-3_S45-48.

Zidi et al. 2023

Zidi, Hedi; Zidi, Slim; Hamani, Nadia; Kermad, Lyes (2023): *Identification and Analysis of Interactions Between Reconfigurable Supply Chain Enablers in Industry 4.0 Using DEMATEL Method*. In: Francesco Gabriele Galizia und Marco Bortolini (Hg.): *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 235–246.

Mitglieder des Forschungsbeirats

Vertreterinnen und Vertreter der Wissenschaft

Prof. Reiner Anderl, TU Darmstadt
Prof. Julia Arlinghaus, Fraunhofer IFF / Universität Magdeburg
Prof. Thomas Bauernhansl, Universität Stuttgart / Fraunhofer IPA
Prof. Manfred Broy, TU München
Prof. Angelika Bullinger-Hoffmann, TU Chemnitz
Prof. Claudia Eckert, TU München / Fraunhofer AISEC
Prof. Alexander Fay, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Prof. Oliver Günther, Universität Potsdam
Prof. Hartmut Hirsch-Kreinsen, TU Dortmund
Prof. Katharina Hölzle, Fraunhofer IAO, Universität Stuttgart
Prof. Gerrit Hornung, Universität Kassel
Prof. Martin Krzywdzinski, WZB Berlin
Prof. Gisela Lanza, KIT – Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Peter Liggesmeyer, TU Kaiserslautern / Fraunhofer IESE
Prof. Boris Otto, Fraunhofer ISST / TU Dortmund
Prof. Frank Piller, RWTH Aachen
Prof. Thomas Schildhauer, Alexander von Humboldt Institut für Internet und Gesellschaft / Institute of Electronic Business
Prof. Rainer Stark, TU Berlin
Prof. Wolfgang Wahlster, DFKI – Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

Vertreterinnen und Vertreter der Industrie

Klaus Bauer, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG
Nicole Dreyer-Langlet, Airbus Operations GmbH
Dr. Jan-Henning Fabian, ABB AG
Dr. Ursula Frank, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG
Dr. Daniel Hug, Robert Bosch GmbH
Prof. Torsten Kröger, Intrinsic
Dr. Uwe Kubach, SAP SE
Dieter Meuser, German Edge Cloud GmbH & Co.KG
Dr. Björn Sautter, Festo AG & Co. KG
Dr. Harald Schöning, Software AG
Dr. Georg von Wichert, Siemens AG

