

FORSCHUNGSBEIRAT



Themenfelder Industrie 4.0

*Forschungs- und Entwicklungsbedarfe
zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0*

Impressum

Herausgeber

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0

Projektbüro

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München

Autoren

Prof. Hartmut Hirsch-Kreinsen, Technische Universität
Dortmund
Dr. Uwe Kubach, SAP SE
Prof. Rainer Stark, Technische Universität Berlin/
Fraunhofer IPK
Dr. Georg von Wichert, Siemens AG
Simone Hornung, acatech
Lisa Hubrecht, acatech
Joachim Sedlmeir, acatech
Dr. Steffen Steglich, acatech

Redaktion

Karola Klatt

Gestaltung und Produktion

PRpetuum GmbH, München

Bildnachweis

PlargueDoctor – iStock (Titel); zapp2photo – Fotolia (S. 3);
ipopba – iStock (S. 14); PhonlamaiPhoto – iStock (S. 20);
Alexander Limbach – Adobe Stock (S. 24)

Stand

September 2019

Druck

MKL Druck GmbH & Co. KG, Ostbevern



Plattform Industrie 4.0



acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Inhalt

Einleitung	2
1 Wertschöpfungsszenarien für Industrie 4.0	4
1.1 Nachhaltiges Nutzenversprechen durch Virtualisierung von Produkten und Diensten	4
1.2 Datengetriebene Geschäftsmodelle und Veränderung der Erlösgenerierung	5
1.3 Weiterentwicklung von Wertschöpfungsarchitekturen	7
1.4 Entwicklung und Implementierung von Strategien des nachhaltigen Wirtschaftens	9
1.5 Nachhaltigkeit von Smart Contracts und Distributed-Ledger-Technologien	10
2 Perspektiven technologischer Entwicklungen	11
2.1 Flexible, modulare Produktionssysteme und ihre Systemarchitekturen	11
2.2 Künstliche Intelligenz und Autonomie	12
2.3 Sensorik und Aktorik	13
2.4 Kommunikationstechnik	13
3 Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0	15
3.1 Strategische Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen	15
3.2 Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen	16
3.3 Engineering von Industrie 4.0-Lösungen	17
3.4 Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen	18
4 Arbeit und Gesellschaft	21
4.1 Gestaltung rechtlicher Rahmenbedingungen	21
4.2 Kriterien soziotechnischer System- und Arbeitsgestaltung	21
4.3 Dringlichkeit von Kompetenzentwicklung und Qualifizierung	22
4.4 Förderung von Akzeptanz, Ausbau von Partizipation und Wandel von Führungskulturen	23
4.5 Gesellschaftspolitischer Dialog	24
Zusammenfassung	25
Literatur	27
Beteiligte Expertinnen und Experten	29

Einleitung

Die Digitalisierung ermöglicht mit der Realisierung von Industrie 4.0 eine vierte industrielle Revolution. Dieser Umbruch hinsichtlich neuer Technologien, Formen der Arbeit und Unternehmensorganisation, Geschäfts- beziehungsweise Erlösmodellen, Wertschöpfungsnetzwerken bis hin zu dynamischen digitalen Ökosystemen hat das Potenzial, eine gesellschaftlich übergreifende Wirkung zu entfalten, die sich heute noch nicht vollständig erfassen lässt. Der Einsatz von cyber-physischen Systemen (CPS) und deren umfassende Vernetzung ist die Grundlage dieses Wandels. Auf dieser Basis lassen sich Zulieferung, Fertigung, Wartung, Auslieferung und Kundenservice miteinander verknüpfen und starre Wertschöpfungsketten in hochflexible Wertschöpfungsnetzwerke verwandeln. Industrie 4.0 beschreibt hier eine neue Stufe der Produktion sowie Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten hinweg. Intelligente Produkte lenken dabei zum Beispiel aktiv den Produktionsprozess. Geräte lösen selbständig Aktionen aus und legen die nächsten Arbeitsschritte fest. Mithilfe der entstehenden Datenmengen und mittels einer fortgeschrittenen Analytik sowie Künstlicher Intelligenz (KI) können die Prozesse in Echtzeit analysiert und optimiert werden. Kriterien sind beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit oder Ressourcenverbrauch. Darüber hinaus entstehen neue Potenziale für die Konzeption und Umsetzung von innovativen Geschäftsmodellen.

In technischer Hinsicht ist daran neu, dass alle physischen Objekte – nicht nur Papierdokumente wie bisher – einen sogenannten digitalen Zwilling bekommen. Das Konzept des digitalen Zwillings ist zentral für die anstehenden Veränderungen im Zuge der Digitalisierung und der Implementierung von Industrie 4.0. In anwendungsbezogenen Studien und in der akademischen Literatur wird dieser Begriff unterschiedlich gefasst.¹ In der nachfolgenden Zusammenstellung des Forschungsbedarfs zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0 orientieren wir uns an der Definition von Stark und Damerau:

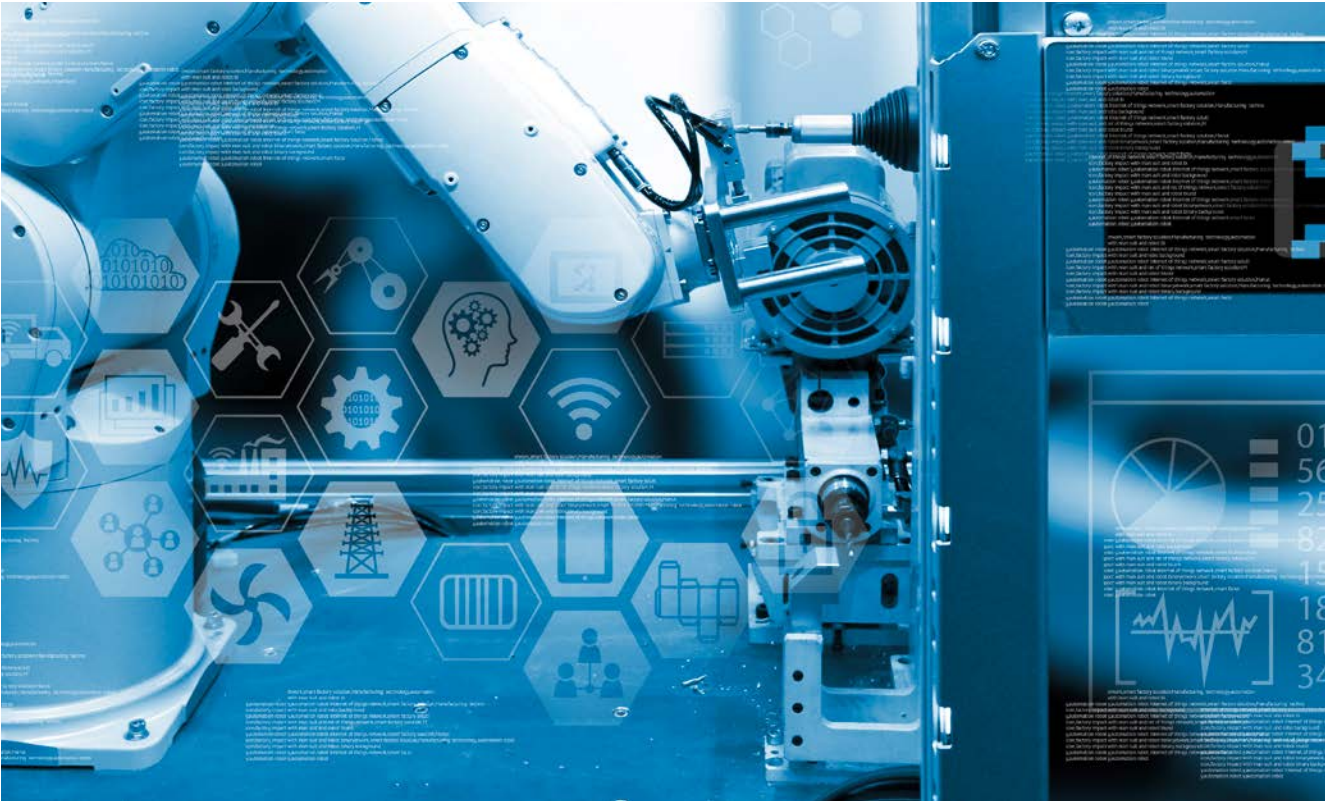
„Ein digitaler Zwilling ist eine digitale Repräsentation eines aktiven spezifischen Produkts (reales Gerät, Objekt, reale Maschine, Dienstleistung oder realer immaterieller Vermögenswert) oder eines spezifischen Produkt-Service-Systems (ein System, das aus einem Produkt und einer damit verbundenen Dienstleistung besteht), das seine ausgewählten Merkmale, Eigenschaften, Zustände und Verhaltensweisen innerhalb eines einzelnen oder über verschiedene Lebenszyklen hinweg anhand von Modellen, Informationen und Daten erfasst.“²

Der Fortschritt im Kontext von Industrie 4.0 stellt eine Herausforderung für den Wirtschaftsstandort Deutschland dar. Es gilt, im globalen Wettbewerb voranzugehen und die eigene Rolle als Leitmarkt und Leitanbieter von Industrie 4.0-Lösungen zu festigen. Gleichzeitig drohen Risiken, im globalen Wettbewerb zurückzufallen.

Vor diesem Hintergrund und mit Blick in die Zukunft wird deutlich, dass die digitale Transformation noch längst nicht abgeschlossen ist. Es bedarf fundierter Analysen, die sowohl den Status quo als auch bestehende Defizite sowie die Entwicklungschancen und -risiken kenntlich machen, um diesen Wandel gezielt und erfolgreich zu gestalten. Dazu ist eine gemeinsame Anstrengung der Stakeholder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft erforderlich. Der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 hat das Ziel, dazu einen entscheidenden Beitrag zu leisten. Er bildet das strategische Beratungsgremium der Plattform Industrie 4.0. Zu seinen Aufgaben gehört es, zukünftige Forschungs- und Handlungsbedarfe zum Thema Industrie 4.0 frühzeitig zu erkennen.

1 Vgl. unter anderem Negri et al. 2017, Stark/Damerau 2019.

2 Siehe Stark/Damerau 2019.



Der Beirat identifiziert aktuell vier Themenfelder, in die sich zukünftige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe einteilen lassen und die für eine erfolgreiche Gestaltung von Industrie 4.0 und des deutschen Innovationssystems entscheidend sein werden. Diese Impulse richten sich an Politik, Forschungseinrichtungen und Unternehmen und beziehen sich auf die Bereiche:

1. Wertschöpfungsszenarien für Industrie 4.0
2. Perspektiven technologischer Entwicklungen
3. Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0
4. Arbeit und Gesellschaft

Im Zuge der Realisierung von Industrie 4.0 darf sich der Fokus nicht einseitig auf den Einsatz der dafür notwendigen Schlüsseltechnologien verengen. Über die Potenziale

zur Optimierung bestehender Fertigungsroutrinen und -prozesse hinaus bestehen auch Chancen für die Fortentwicklung methodischer Ansätze zur gezielten Implementierung von Industrie 4.0. Dabei sind vollkommen neue Ansätze für datengetriebene Geschäftsmodelle, Plattformmärkte und digitale Ökosysteme zu berücksichtigen und zu entwerfen. Begleitet werden müssen diese Veränderungen zudem durch eine sozio-technische Gestaltung der Industrie 4.0-Systeme sowie die Schaffung rechtlicher beziehungsweise institutioneller Rahmenbedingungen. Im Zentrum von Industrie 4.0 steht der Mensch. Seine Rolle ist die des Gestalters und Entscheiders. Menschen müssen in den Wandel partizipativ einbezogen werden, sodass sie sich souverän in Industrie 4.0-Umgebungen bewegen können und effektiv und sicher darin arbeiten.

1 Wertschöpfungsszenarien für Industrie 4.0

Im Zuge der Realisierung von Industrie 4.0, der Entstehung von dynamischen digitalen Ökosystemen und des Einsatzes der dafür notwendigen Schlüsseltechnologien werden nicht nur Potenziale zur Optimierung bestehender Fertigungsverfahren und -prozesse geschaffen. Vielmehr eröffnen sich auch Möglichkeiten zur Konzeption und Implementierung von innovativen, datengetriebenen und plattformbasierten Geschäftsmodellen, die durch neue Formen des Nutzenversprechens, der Erlös- beziehungsweise Umsatzgenerierung sowie der Wertschöpfungsarchitektur geprägt sind. In diesem Kontext werden im folgenden Abschnitt wesentliche Herausforderungen und Forschungsbedarfe auf Basis einer Status-quo-Bewertung und der Identifikation von existierenden Defiziten abgeleitet. Für die Forschungsbedarfe innerhalb dieses Themenfelds erfolgt eine inhaltliche Untergliederung in die fünf Bereiche: nachhaltiges Nutzenversprechen durch Virtualisierung von Produkten und Diensten, datengetriebene Geschäftsmodelle und Veränderung der Erlösgenerierung, Weiterentwicklung von Wertschöpfungsarchitekturen, Entwicklung und Implementierung von Strategien des nachhaltigen Wirtschaftens in digitalen Wertschöpfungsnetzen sowie Nachhaltigkeit von Smart Contracts und Distributed-Ledger-Technologien (DLT).

1.1 Nachhaltiges Nutzenversprechen durch Virtualisierung von Produkten und Diensten

Produkt-Service-Systeme als ganzheitliches Leistungsangebot, Kundennutzen, Nutzerintegration in Leistungserstellung

Entwicklung, Implementierung und Virtualisierung von Produkt-Service-Systemen als ganzheitliches Leistungsangebot

Durch die Digitalisierung und Implementierung von Industrie 4.0 erschließen sich neue Potenziale für die Schaffung von hybriden Leistungsbündeln, sogenannten Produkt-Service-Systemen (PSS).³ Dabei wird ein physisches Produkt durch datenbasierte Dienstleistungen komplementiert, wodurch sich ein neues, ganzheitliches Nutzenversprechen entwickelt (Everything-as-a-Service, XaaS). Umgekehrt ent-

stehen als Folge der „Produktifizierung“ – beispielsweise durch die Abbildung eines Dienstleistungsangebots in Form einer skalierbaren Serviceapplikation – neue Innovationspotenziale.⁴ Für deren Realisierung werden besondere Anforderungen an die notwendige Infrastruktur hochverteilter Systeme gestellt, unter anderem erhöhte Rechnerleistung, schnelle und sichere Kommunikation wie auch Echtzeitfähigkeit mit geringen Latenzen⁵.

In vielen Bereichen wird dieser Ansatz schon heute umgesetzt. Beispiele hierfür sind etwa Pay-per-Hour-Modelle für essenzielle Teilgewerke von Maschinen. Dennoch existieren immer noch Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in diesem Bereich, die eine skalierbare und großflächige Verbreitung von Innovationen bremsen.

Forschungsbedarf

- **Anforderungen an die Interoperabilität** physischer Komponenten und Spezifikation von Konzepten zur Gewährleistung des sicheren und zuverlässigen Datenbeziehungsweise Informationsaustauschs zwischen ihnen

Entwicklungsbedarfe

- Konzepte, Methoden und Werkzeuge, um die Entwicklung neuer Komponenten und Produkte als **ganzheitliche Dienstleistungssysteme** (beziehungsweise PSS) zu unterstützen
- Methoden und Werkzeuge zur **integrierten Entwicklung von Infrastrukturen** für ganzheitliche PSS

Konzipierung eines ausdifferenzierten, nachhaltigen Kundennutzens

Im Rahmen von Industrie 4.0 eröffnet sich nicht nur die Möglichkeit, durch den Einsatz von CPS und der virtuellen Abbildung von Betriebsmitteln eine Optimierung in Form von Effizienz- und Produktivitätssteigerungen zu realisieren. Vielmehr werden zusätzlich insbesondere über Big-Data-Ansätze⁶ und KI-Technologien⁷ Erkenntnisse über

³ Vgl. Meier/Uhlmann 2017.

⁴ Vgl. fortiss 2016.

⁵ Der Begriff „taktiles Internet“ steht für die extrem kurze und für den Menschen nicht wahrnehmbare Reaktionszeit einer über das Internet gesteuerten Anwendung. Erst mit dieser Anforderung werden Industrie 4.0-Anwendungen und das Internet der Dinge möglich.

⁶ Vgl. BDVA 2017.

⁷ Vgl. BDVA/euRobotics 2019.

spezifische Nutzungsgewohnheiten gewonnen und so Potenziale geschaffen, Kunden ein individualisiertes Leistungsangebot zur Verfügung zu stellen sowie Anpassungen auf Basis von Nutzungs- und Anwendungsdaten vorzunehmen. Offen bleibt derzeit jedoch noch vielfach, wie dieser Nutzen ausgestaltet werden kann.

Forschungsbedarfe

- Konzepte, Methoden und Werkzeuge, die unter Einsatz von Big Data und KI die **automatische Erstellung von hochindividualisierten PSS** ermöglichen
- Methodik zur **Ausdifferenzierung eines nachhaltigen Kundennutzen**, insbesondere in dynamischen digitalen Wertschöpfungsnetzen

Entwicklungsbedarfe

- Konzipierung und Implementierung von Methoden, Prozessen und Werkzeugen, die die **Fertigung sehr kleiner Losgrößen zu ähnlichen Kosten** wie in der **Massenproduktion** erlauben
- Methode zur Förderung einer nachhaltigen **Kundenakzeptanz** für neuartige Kundenlösungen

Nutzerintegration in die Leistungserstellung

Auf Grundlage der Implementierung von Industrie 4.0 werden digitalisierte, vernetzte und intelligente Produkte (sogenannte Smart Products) geschaffen, die über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg Daten generieren. Die bei den Kunden vor Ort im Zuge der Nutzung der Produkte gesammelten Daten können durch Rückkopplung zur Verbesserung der Produkte beziehungsweise der PSS verwendet werden, wodurch die Nutzer aktiv in die Leistungserstellung und -optimierung eingebunden werden können. Insbesondere durch den Einsatz von KI und das maschinelle Lernen lassen sich diese Nutzungs- beziehungsweise Präferenzdaten so verarbeiten, dass automatisch individualisierte Services oder komplett neue Dienstleistungsangebote realisiert werden. Bislang sind die Informationsschleifen vom Kunden zum Hersteller noch nicht hinreichend geschlossen, da Felddaten noch kaum erfasst werden oder noch nicht automatisiert an Hersteller zurückfließen können.

Forschungsbedarfe

- Verfahren zur Steigerung der Anwendungsbereitschaft der Nutzer (siehe Kapitel 4.4), unter anderem durch
 - die Klärung der offenen Fragestellungen im Hinblick auf Datensouveränität,
 - die Berücksichtigung / Analyse der Auswirkungen der Nutzerintegration im Hinblick auf Wettbewerbssicherung
- Erforschung **neuer Geschäftsfelder und Geschäftsmodelle**, die auf **mehreren vernetzten und kommunizierenden Produkten basieren**, wobei jedes Produkt selbst ein PSS darstellt

Entwicklungsbedarfe

- Methodik zur **stärkeren Integration des Nutzers in der Leistungsbeschreibung** über zurückgespielte Auswahl-, Nutzungs- und Anwendungsdaten (siehe Kapitel 4.1)
- Verfahren zur Steigerung der Anwendungsbereitschaft der Nutzer (siehe Kapitel 4.4), unter anderem durch
 - die Schaffung von bedienungsfreundlichen Benutzeroberflächen und Interaktionsmöglichkeiten,
 - die Berücksichtigung von sicherheits- und zuverlässigkeitsrelevanten Aspekten,
 - die Entwicklung und Implementierung von geeigneten Anreiz- beziehungsweise Vergütungsmodellen

1.2 Datengetriebene Geschäftsmodelle und Veränderung der Erlösgenerierung

Dynamische Erlösgenerierung im gesamten Produktlebenszyklus, Daten als Wirtschaftsgut

Flexible und dynamische Erlösgenerierung über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg

Die Digitalisierung und Realisierung von Industrie 4.0 bringt Potenziale zur Konzeption und Umsetzung von neuartigen, flexiblen Bepreisungs- beziehungsweise Erlösmodellen für Produkte, Dienstleistungen und PSS mit sich. Dabei entwickeln sich datengetriebene Geschäftsmodelle zu wissensgetriebenen Modellen. Auch eine Erlösgenerierung über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg wird ermöglicht, zum Beispiel im Zuge einer nachträglichen

Leistungserweiterung, die sich durch (gegebenenfalls kostenpflichtige) Updates unter anderem „Over-the-Air“, das heißt drahtlos über eine Funkschnittstelle wie WLAN oder das Mobilfunknetz, aufspielen lassen. Die Erlösgenerierung ist somit nicht auf den einmaligen Verkauf eines Produkts oder eines Leistungsbündels beschränkt. Eine ubiquitäre Verfügbarkeit von Daten aus heterogenen Quellen und die damit verbundene Transparenz im Hinblick auf Markt- und Umweltgegebenheiten bietet zudem Potenziale zur dynamischen Anpassung der Preise. So lassen sich Bepreisungen beispielsweise an Angebot und Nachfrage oder potenzielle Störeinflüsse im Wertschöpfungs-system angleichen.⁸

Generell ist jedoch festzustellen, dass Unternehmen derzeit häufig Schwierigkeiten haben, neue Leistungsangebote auf der Basis von datengetriebenen beziehungsweise plattformbasierten Geschäftsmodellen profitabel zu gestalten. Oft ist die zeitliche Nutzung der einzig eingesetzte Parameter, beispielsweise über die Erhebung einer vereinbarten Servicegebühr pro Monat. Die Kunden wünschen jedoch eine flexible Bepreisung über weitere Parameter wie die tatsächliche Verwendung oder Auslastung (Pay-per-Use) oder das Gewicht der transportierten oder erforderlichen Waren (Pay-per-Load). Darüber hinaus findet die aktuelle Markt- und Umweltsituation (in Echtzeit) bisher kaum Berücksichtigung in der Bepreisung.

Forschungsbedarfe

- **Dynamische Erlösmodelle**, die auf Basis von Algorithmen eine **Monetarisierung** über den **gesamten Lebenszyklus** hinweg ermöglichen
- Weiterentwicklung von **selbstlernenden Preisfestsetzungsalgorithmen**, die unter Einbezug von Daten aus heterogenen Quellen eine ständige Anpassung ermöglichen

Entwicklungsbedarfe

- Sinnhafte, technisch machbare und kundenorientierte Geschäftsmodelle für **hybride Leistungsbündel** mit dynamisierten Komponenten

- **Belastbare und nachhaltige Geschäftsmodelle** und deren Finanzierung im Bereich der **hybriden Leistungsbündel**

Daten als Wirtschaftsgut

Der Zugang zu relevanten Daten, die häufig auch als „Öl des 21. Jahrhunderts“⁹ deklariert werden, ist für die Konzipierung und Bereitstellung von innovativen Nutzenversprechen im Rahmen von Industrie 4.0 von essenzieller Bedeutung. Ebenso bedeutsam sind der sichere Austausch sowie die flexible Kombination und Verknüpfung der Daten in dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken zur Konzeption und Umsetzung von neuen Geschäftsmodellen, zur Implementierung von innovativen, datenbasierten Serviceangeboten, aber auch zur Steigerung der Effizienz und Erhöhung des Flexibilisierungsgrads in den Geschäftsprozessen.¹⁰

Daten sind allgemein zu einem Wirtschaftsgut geworden, das auch als Zahlungsmittel eingesetzt werden kann. Schon heute werden große Mengen an Daten erfasst und gesammelt. Die Kommerzialisierung dieser Daten findet bisher jedoch überwiegend durch nutzerspezifische Online-Werbung statt.

Sowohl in der Wirtschaft als auch in der Öffentlichkeit wird der positive Wert von Daten nicht überall erkannt. Darüber hinaus sind die Nutzungsrechte, Nutzungsbefugnisse und rechtlichen Zuordnungen im Hinblick auf Daten (siehe Kapitel 4.1) häufig nicht geregelt, wodurch eine umfassendere Kommerzialisierung zusätzlich erschwert wird.¹¹

Forschungsbedarfe

- Neue **Wertschöpfungsmodelle**, die den **Bezug oder die Nutzung von Produkten und Dienstleistungen im Austausch gegen Daten** vorsehen

8 Vgl. acatech 2018, fortiss 2016.

9 Siehe Spitz 2017.

10 Die International Data Spaces Association verfolgt bereits jetzt das Ziel, einen sicheren Datenraum aufzubauen, der Unternehmen aus unterschiedlichen Anwendungsdomänen die Souveränität in der Bewirtschaftung ihrer Daten garantiert. Vgl. IDSA 2019.

11 Vgl. Picot et al. 2014.

- Methoden zur **Modellierung und Optimierung von Informationsflüssen** mit Verfahren zur Bereitstellung durchgängig digitaler Informationsmodelle, zur Wahrung der semantischen Interoperabilität und zur Abbildung auf neuen Datenbanksystemen
- Sicherstellung der **ökonomischen Handelbarkeit und Verwertbarkeit von Daten** unter Berücksichtigung von datenschutz- und -sicherheitsrechtlichen Rahmenbedingungen (siehe Kapitel 4.1)
- Erforschung der **Bildung des Werts von Daten**, der sich in Marktpreisen abbildet
- Methode zur **Identifikation** von potenziellen sowie zur **Eingrenzung** von zulässigen **Nutzergruppen** von Daten

1.3 Weiterentwicklung von Wertschöpfungsarchitekturen

Dynamische Wertschöpfungsnetzwerke, digitale Zwillinge, Kundenschnittstellen, Management und Durchgängigkeit des Engineerings, organisatorische Um- und Neugestaltung

Weiterentwicklung von Wertschöpfungsketten zu hochflexiblen, dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken in digitalen Ökosystemen

Die Realisierung von datengetriebenen Geschäftsmodellen bedarf zumeist einer branchen- oder anwendungsdomänenübergreifenden Vernetzung verschiedener Akteure auf unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen. Dies erfordert eine Weiterentwicklung traditioneller, heute noch oftmals zu unflexiblen beziehungsweise stringenten Wertschöpfungsketten zu hochdynamischen, modular (re-)konfigurierbaren Wertschöpfungsnetzwerken. Die Basis bilden dabei digitale Plattformen, entlang derer sich flexible, digitale Ökosysteme entwickeln. Dabei handelt es sich um hochdynamische Strukturen, die durch offene Unternehmensgrenzen charakterisiert sind. Serviceplattformen stellen Vernetzung und Kooperation von Entwicklenden, Anbietern, Nutzern, etc. sicher, wodurch insbesondere auch für Start-ups sowie KMU Potenziale entstehen, ihre Produkt-Dienstleistungsbündel zu vermarkten.¹²

12 Vgl. acatech 2018.

13 Zum Begriff „digitaler Zwilling“ siehe Einleitung.

14 Vgl. acatech 2018.

Forschungsbedarfe

- Spannungsfeld zwischen **Offenheit und Sicherheit** plattformbasierter Wertschöpfungsnetzwerke und Ökosysteme
- **Strategien zur Sicherstellung von Kollaboration und Interoperabilität** zwischen verschiedenen Plattformen und Ökosystemen
- **Potenziale der Plattformökonomie** hinsichtlich ihrer spezifischen (ökonomischen, sozialen, institutionellen) Chancen und Risiken
- Verschiedene **Rollen der in dynamischen digitalen Ökosystemen agierenden Akteure**
- **Kollaborative Geschäftsmodelle**, die zur Konfiguration flexibler Wertschöpfungsprozesse Konzepte für den Aufbruch starrer Grenzen beinhalten
- **Alternativen zu digitalen Plattformen**, beispielsweise unternehmensunabhängige Plattformen
- Wandlung von Wertschöpfungsnetzwerken mit hohem Automatisierungsgrad der Standardprozesse hin zu **agilen Wertschöpfungsnetzwerken**

Entwicklungsbedarf

- **Architekturen für digitale Plattformen**, die die geltenden Rahmenbedingungen und Standards für Schnittstellen und Prozesse berücksichtigen sowie Offenheit und Interoperabilität gewährleisten

Zentrale Bedeutung des digitalen Zwillings in Wertschöpfungsnetzwerken

Im Zuge der Digitalisierung der Produktion erhält der digitale Zwilling eine zentrale Bedeutung.¹³ Digitale Zwillinge dienen dabei nicht nur der Simulation realer (Fertigungs-) Prozesse, sondern dienen auch als Bezugsort für die Zuordnung von erfassten Daten. Zudem sind sie als Treiber der horizontalen Integration über Unternehmensgrenzen hinweg für Veränderungen von Wertschöpfungsprozessen grundlegend.¹⁴

Bereits heute lassen sich durch das Sammeln, Aufbereiten, Veredeln und Analysieren der Daten von digitalen Zwillingen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts oder eines physischen Systems unter anderem potenzielle Fehler, Störungen und Ausfälle genau vorhersehen und Wartungsmaßnahmen zum richtigen Zeitpunkt planen. Digitale Modelle physikalischer Objekte werden kontinuierlich aktualisiert. Alle wichtigen Daten eines realen Bausteins können über die sogenannte Verwaltungsschale erfasst werden, die als Schnittstelle zwischen der realen und der virtuellen Welt fungiert. Während die Anpassung des digitalen Zwillings heute bereits möglich ist, ist der Rückkanal vom digitalen Modell zum physischen Objekt jedoch nur selten angelegt.

Forschungsbedarf

- **Sicherheits- beziehungsweise Zertifizierungskonzepte** für Wertschöpfungsnetzwerke mit integriertem digitalen Zwilling

Entwicklungsbedarf

- **Wechselwirkung** zwischen dem digitalen Zwilling und seinem physischen, realen Pendant in dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken

Kundenschnittstelle als strategische Schlüsselposition

In plattformzentrierten Ökosystemen gilt die Kundenschnittstelle als zentrale Schlüsselposition, durch die der Kunde Zugang zu einem im gesamten Wertschöpfungsnetzwerk von den verschiedenen interagierenden Akteuren erstellten Leistungsangebot erhält und dafür bezahlt. Während die Kunden ihre Anfragen in der Vergangenheit direkt an die Hersteller oder die von ihnen eingesetzten Handelsunternehmen beziehungsweise Handelsvertretungen richteten, wird diese Position im Zuge der Digitalisierung immer mehr von digitalen Plattformen ausgefüllt.¹⁵ So existiert für klassische OEM derzeit die inhärente Gefahr, durch die Dienste von digitalen (Service-)Plattformbetreibern als

Intermediäre, den direkten Kundenkontakt zu verlieren und zukünftig nur noch Hardwarelieferanten zu sein. Somit gilt es, den direkten Kontakt zu (potenziellen) Kunden zu sichern.

Forschungsbedarfe

- Konzepte zur **Sicherung des direkten Kundenkontakts, etwa durch virtuelle Geschäftsmodelle und Vertriebskanäle** – insbesondere für KMU, die aufgrund begrenzter Ressourcen keine eigene Plattform aufbauen oder betreiben können
- Modelle für eine **mehrdimensionale, offene Kundenschnittstelle** zur Transparenzsteigerung

Management und Durchgängigkeit des Engineerings

Digitaler Wandel im Produktionsbereich bedeutet Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen und Interaktion in übergreifenden, dynamischen und plattformbasierten digitalen Ökosystemen zur Leistungserstellung. Den digitalen Wandel umzusetzen, erfordert von Unternehmen die erfolgreiche Bewältigung von häufig tiefgreifenden Veränderungs- und Anpassungsprozessen. Maßgeblich für den Erfolg der einzelnen Organisationen ist dabei auch die Modifikation und konsequente Adaption der Entwicklungs- und Innovationsprozesse. Dabei ist ein holistisches Verständnis des Engineerings zugrunde zu legen, das nicht nur die reine Entwicklung von Produkten und Services umfasst, sondern ihre gesamten Lebenszyklen berücksichtigt.¹⁶

Forschungsbedarfe

- **Methoden und Konzepte für ein durchgängig digitales Management** des Produkt-Service-Engineerings in dynamischen Ökosystemen¹⁷
- **Softwaretools und KI-basierte Systeme**, die eine Durchgängigkeit im Engineering ermöglichen

15 Vgl. fortiss 2016.

16 Vgl. Forschungsbeirat et al. 2018. Diese Studie des Forschungsbeirats hat verschiedene Forschungsbedarfe im Kontext des Engineerings kategorisiert. Diese Forschungslücken gilt es aufzugreifen und auf ein durchgängiges Management des Engineerings in dynamischen Ökosystemen zu projizieren.

17 Vgl. Forschungsbeirat et al. 2018.

Organisatorische Um- und Neugestaltung

Neue Geschäftsmodelle in dynamischen Industrie 4.0-Wertschöpfungsnetzen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Neben der Konzeption und Entwicklung von datengetriebenen und plattformbasierten Geschäftsmodellen sind für die erfolgreiche Implementierung jedoch auch massive unternehmensinterne Anpassungen beziehungsweise Veränderungen notwendig. Dabei gilt es nicht nur, tradierte Denkweisen und Prozesse zu überwinden, sondern durch geeignete Methoden des Change Managements (siehe Kapitel 4.4) einen Umbruch in Kultur und Organisationsstruktur von Unternehmen herbeizuführen. Ein adäquater Lösungsweg wird häufig in der organisationalen Ambidextrie gesehen.¹⁸ Dabei werden in Anpassung an neue technologische Möglichkeiten oder Bedingungen neue Unternehmens- beziehungsweise Organisationseinheiten parallel zu den bestehenden Strukturen etabliert. In der Breite lässt sich derzeit jedoch eine eher zögerliche Transformation von Organisationsformen konstatieren.

Forschungsbedarfe

- Methoden, die es ermöglichen, dass **das traditionelle Kerngeschäft** weiter optimiert werden kann, während gleichzeitig **neue Geschäftsmodelle erfolgreich konzipiert und implementiert** werden
- **Migration beziehungsweise (Re-)Integration** von parallel zum Kerngeschäft neu aufgebauten oder akquirierten Geschäftseinheiten in eine neue Unternehmensstruktur und -kultur
- Entwicklung und strategische **Verankerung** von auf Industrie 4.0 ausgerichteten **Reorganisationskonzepten und -methoden, Techniken des Change Managements** (siehe Kapitel 4.4) und der **kulturellen Transformation**
- Methoden und Konzepte für die **Implementierung des Change Managements** in einer **frühen Phase** des Transformationsprozesses

1.4 Entwicklung und Implementierung von Strategien des nachhaltigen Wirtschaftens

Methoden zur Steigerung des nachhaltigen Wirtschaftens, Modellierung und Simulation von Produkten, Systemen und Prozessen

Das Paradigma der simultanen Berücksichtigung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten des Handelns stellt ein Grundprinzip des nachhaltigen Wirtschaftens dar. Im Zuge der Umsetzung von Industrie 4.0 und der Interaktion der verschiedenen Stakeholder können wichtige Nachhaltigkeitsziele erreicht werden. Als mögliche Lösungsansätze lassen sich die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, der Ressourceneffizienz sowie der Virtualisierung beziehungsweise Digitalisierung von Komponenten, Systemen und Prozessen (digitaler Zwilling) heranziehen.

So werden im Kontext der Kreislaufwirtschaft große Potenziale für nachhaltigeres Wirtschaften durch neue Konzepte, wie Product-as-a-Service-Angebote (PaaS) und Upcycling-Strategien, erwartet. Diese Potenziale werden gegenwärtig jedoch kaum erschlossen. Ein ähnliches Defizit existiert bei der Implementierung von Industrie 4.0-Technologien zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und bei der Nutzung von virtualisierten beziehungsweise digitalisierten Komponenten, Systemen und Prozessen für nachhaltigere Inbetriebnahmen und Probetriebe.

Forschungsbedarfe¹⁹

- Methoden zur **Optimierung und zur Steigerung der (Ressourcen-)Effizienz sowie des nachhaltigen Wirtschaftens** in der Produktion, insbesondere durch datenbasierte Anwendungen, Automatisierung, Remote-Steuerung und Transportminimierung, neue Fertigungsverfahren (zum Beispiel 3D-Drucker) und Upcycling unter Berücksichtigung von Regulierungs- und Rechtsfragen
- Konzepte und Methoden zur **nachhaltigeren Inbetriebnahme und für einen digitalen Probetrieb** mit dem Ziel eines reduzierten Bedarfs an physischen Prototypen, unter anderem modellbasierte, digitale Prozessketten, Virtual Prototyping, Dematerialisierung

18 Vgl. fortiss 2016.

19 Zum Engineering, zur Implementierung sowie zum Betrieb der nachfolgend geforderten Methoden siehe Kapitel 3.

- Methoden für die Berücksichtigung der **End-of-Life-Nutzungsmöglichkeiten**, die den ursprünglichen Lebenszyklus erweitern, zum Beispiel die Nutzung von Automobilbatterien im stationären Betrieb zur Stromspeicherung regenerativer Energien

1.5 Nachhaltigkeit von Smart Contracts und Distributed-Ledger-Technologien

Erstellung und Überwachung von Smart Contracts, Bewertung und Überprüfung der Qualität, Sinnhaftigkeit, Machbarkeit sowie Zulässigkeit von Use Cases für den Einsatz von Smart Contracts und Distributed-Ledger-Technologien, rechtliche Rahmenbedingungen

Für die Realisierung von dynamischen digitalen Ökosystemen bedarf es neben der Sicherstellung der Interoperabilität durch übergreifende Standards insbesondere auch einer Gewährleistung von Rechtssicherheit über einzelne Anwendungsdomänen und staatliche Grenzen hinweg. Während gesetzliche und regulatorische Grundsätze gegenwärtig auf Vereinbarungen zwischen Menschen ausgerichtet sind, sind eindeutige Regelungen von Interaktionen und Transaktionen zwischen technischen Geräten beziehungsweise Systemen derzeit noch nicht hinreichend ausgearbeitet. Dies gilt insbesondere im Kontext von Haftungsfragen.

Als mögliche technische Befähiger zur Durchsetzung von Rechtssicherheit und zur Klärung der Haftung im Schadensfall werden insbesondere sogenannte Smart Contracts sowie Distributed Ledger Technologien (DLT) wie Blockchain diskutiert. Insgesamt sind bei der Einführung solcher Lösungsansätze sowohl das Recht auf Informations- beziehungsweise Datensouveränität zu berücksichtigen als auch die erforderlichen Freiheitsgrade für die kommerzielle Konzeption und Implementierung von datengetriebenen oder plattformbasierten Geschäftsmodellen.²⁰

Der Einsatz von Smart Contracts erfolgt derzeit lediglich in Insellösungen zu spezifischen Teilproblemen. Eine durchgängige, vollautomatische Erstellung, Umsetzung und Überwachung eines Smart Contracts aus einer natürlichsprachlichen Formulierung der Vertragsidee ist bislang nicht möglich.

Gegenwärtig werden zahlreiche Use Cases für den Einsatz von Smart Contracts beziehungsweise DLT vorgeschlagen, wenngleich viele dieser Anwendungsfälle auch mit konventionellen, klassischen Methoden abgewickelt werden könnten. Es fehlt an einer fundierten Darstellung von potenziellen Szenarien, die den Einsatz dieser Verträge und Technologien explizit erfordern oder einen klaren Mehrwert gegenüber klassischen Ansätzen und Technologien aufzeigen.

Obwohl Smart Contracts und DLT teilweise bereits zum Einsatz kommen, bleibt eine vollständige Klärung rechtlicher Fragen, insbesondere im Hinblick auf Haftung und Datensouveränität, bislang aus.

Forschungsbedarfe

- Konzepte und Methoden für eine **durchgängige (End-to-End) und automatisierte Erstellung von Smart Contracts** sowie deren **Management**
- Methoden und Konzepte zur **objektiven Bewertung beziehungsweise Überprüfung der Qualität, ökonomischen Sinnhaftigkeit, technischen Machbarkeit** sowie **rechtlichen Zulässigkeit** potenzieller Smart Contracts und DLT Use Cases
- Erstellung eines **rechtlichen Rahmenwerks für DLT und Smart Contracts**, insbesondere im Hinblick auf Verbindlichkeiten, Haftung, Organisationsmodell und Geheimhaltungsbedürfnisse
- **Auswirkung neuer digitaler Geschäftsmodelle** im Hinblick auf den Einsatz von **Kryptowährungen** als Zahlungsmittel

2 Perspektiven technologischer Entwicklungen

Grundlegend für die Fortentwicklung von Industrie 4.0 ist die weitere Erforschung und Anwendung bestehender und neuer Technologien. Nach den ersten Schritten von Industrie 4.0 zeigt sich, dass nicht mehr nur produktionstechnologische zusammen mit informations- und kommunikationstechnologischen Entwicklungen die Vision der vernetzten Produktion ausmachen, sondern der Wandel über flexible, modulare Produktionssysteme hin zu autonomen, lernenden Systemen die Zukunft prägen wird. Diese Systeme werden sich selbst programmieren, selbst organisieren, an sich selbst neue Anforderungen stellen und sie adaptieren und sich selbst optimieren. Forschungsbedarf besteht hier vor allem hinsichtlich der Einbindung von KI-Methoden, inklusive des maschinellen Lernens, in Produktionssysteme. Dabei spielen etablierte Lösungen und deren Übertragbarkeit auf zukünftige Systeme eine bedeutende Rolle. Darüber hinaus werden unter anderem Technologien zu IT-Security, Privacy und Datensemantik über die erfolgreiche Anwendung von Industrie 4.0 entscheiden. Die Verknüpfung verschiedenster Technologien und Bedarfe wird den Fortschritt von Industrie 4.0 treiben, zum Beispiel Material-, Mikro-, Nano- und Biotechnologien oder Ressourcen- und Materialengpässe. Damit stellt Industrie 4.0 einen entscheidenden Schlüssel für die ressourcenschonende Fertigung dar.

Im Folgenden werden der Stand der Technik, die vorhandenen Defizite und die Forschungsbedarfe in den Bereichen Produktionssysteme und Systemarchitekturen, KI und Autonomie, Sensorik und Aktorik sowie Kommunikationstechnik dargelegt.

2.1 Flexible, modulare Produktionssysteme und ihre Systemarchitekturen

Selbstorganisation und -optimierung, Grad der Flexibilität der Systemarchitektur, Stabilität und Optimalität, Steuerung eingesetzter Energiemengen

Volatile und komplexe Märkte der Zukunft implizieren innovative, hochflexible und wirtschaftliche Fertigungstechnologien. Dabei werden kapitalintensive Produktions-

mittel, die für eine spezifische Aufgabe konstruiert und gebaut wurden, ersetzt durch flexible, modulare, wandlungsfähige, wiederverwendbare Produktionssysteme. Eine notwendige Basis hierfür bilden flexible Systemarchitekturen.

Seit vielen Jahren orientieren sich Unternehmen bei der Entwicklung von automatisierten, flexiblen Produktionssystemen an der klassischen Automatisierungspyramide. Industrie 4.0 erfordert durch die systemübergreifende Vernetzung von Systempartnern ein Aufbrechen der gängigen Automatisierungspyramide. Derzeit fehlt es an Kompatibilitätslösungen für Produktionssysteme, die weniger durch Standardisierung der Hardware erreicht werden als durch generische Lösungen mit hochflexiblen Konfigurationsmöglichkeiten (siehe Kapitel 3.4). Ebenso sind etablierte Planungs- und Testprozeduren auf diese Veränderung nicht anwendbar.

Neben neuen Systemarchitekturen sind auch neue Maschinenkonzepte notwendig, um die in der Systemarchitektur gewonnene Flexibilität und Skalierbarkeit im Produktionssystem nutzen zu können. Diese Forderung wird umgesetzt durch wandlungsfähige Maschinenkonzepte mit fähigkeitsbasierten, selbstkonfigurierenden Modulen.

Forschungsbedarfe

- Beherrschbarkeit hochflexibler und daher schwer zu überblickender **Systemstrukturen** sowie von Ansätzen zur **Selbstorganisation und -optimierung** komplexer Systeme
- Nutzengenerierung und Kostenverhältnisse durch **Flexibilität von Systemarchitekturen** (Break-even-Analyse)
- Digitale Modelle zur Unterstützung bei der **Übertragung von Flexibilität, Stabilität und Optimalität** auf andere Systemarchitekturen²¹
- Methoden zur **Absicherung der Systemstabilität** aufgrund steigender Anforderungen durch den zunehmenden Vernetzungsgrad von Maschinen und Anlagen

21 Beispielsweise werden virtuelle Echtzeitmodelle von technischen, logistischen und geschäftlichen Prozessen in allen Phasen des Lebenszyklus eingesetzt, etwa ein digital modellierter Antriebsstrang mit integrierter virtueller Inbetriebnahme von Antrieben. Dadurch lassen sich Projektkosten um bis zu 25 Prozent reduzieren. Dabei erfolgt die fortgeschrittene prädiktive Steuerung und Regelung technischer Prozesse und Anlagen auf Basis von akkuraten Modellen der realen Welt. Zur Anwendung kommen dabei eine modulare (fähigkeitsbasierte) Programmierung mit hoher Wiederverwendbarkeit und eine dynamisch skalierende Steuerungssoftware. Nichtsdestotrotz müssen gerade im Bereich der virtuellen Echtzeitmodelle neue Methoden entwickelt werden, um zu klären, wie diese Modelle über den gesamten Lebenszyklus standardisiert kommunizieren können, wie diese Modelle nahtlos in die Wertschöpfungskette und die digitalen Geschäftsmodelle integriert werden können und welche Technologien und Industrie 4.0-Lösungen benötigt werden, um das volle Potenzial auszuschöpfen.

- Standardisierte Modelle, Methode und Systeme zur **Optimierung der Energieeffizienz** in der Produktion
- Verfahren zur **anwendungsgerechten Auswahl von KI-Verfahren**

Entwicklungsbedarf

- **Vernetzte Toolketten** zur Bewertung des **späteren Materialeinsatzes oder der Recyclingfähigkeit** der Produkte, etwa in der frühen Design- und Auslegungsphase, bei der **digitalen Verfolgung von Material- und Ressourcen-Strömen** und während der Lebenszeit eines Produkts bis hin zur Kreislaufwirtschaft

2.2 Künstliche Intelligenz und Autonomie

Hybride Lösungsansätze, Verknüpfung modell- und datenbasierter Methoden, nachvollziehbare und nachweisbare Entscheidungen von Machine-Learning-Modellen, Prüfung und Validierung von KI-Systemen

Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) werden innerhalb vom Menschen definierter Grenzen autonom und intelligent und steigern damit ihre selbsttätige Anpassungsfähigkeit. Wissen über den Nutzer, den Systemkontext und die Anforderungen an die Aufgabe wird diese Systeme in die Lage versetzen, autonom, intelligent, kooperativ und verantwortungsvoll zu arbeiten. Dabei spielen sogenannte Self-X-Fähigkeiten eine wichtige Rolle, wie Selbstdiagnose, Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration, Selbstwartung etc. Diese Eigenschaften erhöhen die Resilienz und Robustheit dieser Systeme.

Hierbei ist allerdings entscheidend, Ziele für den Übergang zu autonomen Systemen zu definieren und eine entsprechende Taxonomie festzulegen. Autonomie findet dabei immer in vom Menschen vorgegebenen Systemgrenzen statt, das heißt der Mensch definiert, für welches Gesamtsystem ein gewisser Grad an Autonomie erreicht werden soll und innerhalb welcher Funktionen beziehungsweise Bereiche KI wirken darf.²²

KI ist ein Portfolio von Technologien, das die Realisierung von autonomen Funktionen und Systemen ermöglicht. Hierbei ist es wichtig, zwischen verschiedenen Stufen der Autonomie zu unterscheiden: Nicht jedes System soll den gleichen Grad an Autonomie erreichen. Zudem können

auch Teilbereiche der industriellen Produktion, zum Beispiel Prozessführung, Prozessplanung, Feldüberwachung oder Instandhaltung, unterschiedliche Grade an Autonomie erfordern.

Generell ist festzustellen, dass sich die Anwendung von KI im industriellen Kontext deutlich unterscheidet von der Anwendung in anderen Bereichen, insbesondere im Konsumentenumfeld. Aktuell sind verschiedene Lösungen für unterschiedliche Anwendungsgebiete geeignet. Beispielsweise stehen im industriellen Kontext andere Datentypen, wie Zeitreihen und Eventdaten, im Fokus. Bilddaten sind dagegen nur für spezielle Anwendungen interessant und Text- und Sprachdaten eher von geringer Bedeutung. Häufig sind die für maschinelles Lernen verfügbaren industriellen Datensätze schlecht ausbalanciert. Typischerweise wird man in einigermaßen funktionierenden industriellen Anlagen eher Daten vorfinden, die einen positiven Prozessverlauf beschreiben. Nur um das Modell zu trainieren, einen fehlerhaften Prozessverlauf mit der Produktion von Ausschuss zu initiieren, ist wirtschaftlich selten gerechtfertigt. Aus diesen Überlegungen ergeben sich neue Anforderungen an eine industriell nutzbare KI.

Tatsächlich existieren derzeit nur wenige exemplarische Lösungen für die Anwendung von KI im industriellen Bereich.

Forschungsbedarfe

- **Hybride Lösungsansätze** für die industrielle Produktion zur Verknüpfung modellbasierter und datenbasierter Methoden
- **Neue KI-Ansätze und maschinelle Lernverfahren** mit sehr guter Performanz bei geringen Datenmengen und einfacher Übertragbarkeit in den industriellen Bereich beziehungsweise auf einzelne Applikationen eines Produktionssystems
- **Verständliche Machine-Learning-Modelle zur Nachvollziehbarkeit und Nachweisbarkeit** ihrer Empfehlungen und Entscheidungen

- Methoden zur **Prüfung und Validierung von KI-Systemen** sowie zur Spezifikation hybrider Wissensrepräsentation
- Methoden zur **anwendungsgerechten Auswahl von KI-Verfahren**

Entwicklungsbedarf

- Entwicklung und **Bewertung von Anwendungsfällen** für Machine-Learning- und KI-Ansätze, damit eine voraussetzungsgerechte Anwendung der Verfahren sichergestellt wird, insbesondere sind Anforderungen der Anwendungsfälle den Potenzialen der Machine-Learning- und KI-Verfahren gegenüberzustellen

2.3 Sensorik und Aktorik

Generalisierbarkeit und Übertragbarkeit etablierter Sensor- und Aktorlösungen, Modularität und Redundanz in intelligenten Systemen, Sensordatenfusion, Energieautarkie

Sensorik und Aktorik verbinden physikalische und informationstechnische Welt und sind damit Schlüssel- und Querschnittstechnologien weit über den industriellen Bereich hinaus. Neue Sensor- und Aktorkonzepte weisen verbesserte Konstruktions- und Materialeigenschaften auf und insbesondere die Miniaturisierung der Sensorik reduziert die Preise. Dies führt dazu, dass bestehende Systeme durch neue Anwendungen erweitert werden können, wodurch die systemübergreifende Vernetzung als Basis von Industrie 4.0 möglich wird.

Datenerfassung mit Sensoren bildet die Grundlage für lernende Verfahren in allen technischen Systemen. Die Qualität der gelernten Modelle hängt von der Qualität der gemessenen Daten ab. Fehlerhaft messende Sensoren resultieren in falschen Modellen und Schlussfolgerungen. Daher müssen Sensoren die Fähigkeit zur Selbstdiagnose und gegenseitigen Überprüfung haben. Sensoren müssen sich in dynamischen Umgebungen selbst zu Netzwerken zusammenfinden. Damit sie Sensorwerte und Daten, die zu verschiedenen Zeitpunkten von unterschiedlichen, räumlich verteilten Quellen kommen, kombinieren können, bedarf es einer vereinheitlichten Semantik der Information und Technologie der Übertragung. Außerdem ist zu klären, wie Sensoren in Zukunft energieautark eingesetzt und in energieautarke, intelligente Sensornetze eingebunden werden können. Dies ermöglicht die Erweiterung von Anwendungsgebieten, beispielsweise in schwer zugänglichen Bereichen

von Kraftwerken oder Chemiefabriken. Im Bereich der Aktorik werden mit Blick auf ressourcenschonende Technologien und Systemsteuerungen energetische Faktoren noch bedeutender.

Forschungsbedarfe

- **Generalisierbarkeit, Spezialisierbarkeit und Übertragbarkeit von Sensortechniken** aus dem Konsumenten- in den Industriebereich, auch hinsichtlich der Reduzierung von Kosten und Aufwand
- Erweiterte Möglichkeiten zur **Selbstdiagnose** und **Selbstkonfiguration** von Sensoren und Aktoren, bevorzugt unter Einbindung von digitalen Zwillingen und der Umgebungssituation
- **Lernende Sensornetzwerke und -architekturen sowie Methoden zur Sensordatenfusion** für die Kombination von Daten aus unterschiedlichen Quellen zu verschiedenen Zeitpunkten
- Konzept zur **Modularität, Redundanz und Energieautarkie intelligenter Systeme**

2.4 Kommunikationstechnik

Kommunikations- und Technologiestandards, Echtzeitfähigkeit, Sicherheit, Verschlüsselung und Absicherung der Datenübertragung, Infrastrukturgröße, Mehrwertdienste

Neue informations- und kommunikationstechnologische Entwicklungen gelten als Rückgrat für Industrie 4.0. Beispielsweise soll die 5G-Technologie wachsende Anforderungen von autonomen, intelligenten Systemen erfüllen. Hierzu gehören beispielsweise ansteigende Datenraten in höheren Breitbandmodi, Echtzeitanforderungen von Produktionssystemen, die in virtuellen Systemen ohne Medienbrüche abgebildet werden, oder die Möglichkeit der Interoperabilität von Systemen, das heißt die Fähigkeit, über das System hinaus mit Dritten zu kooperieren. In diesem Kontext sind Fragen zur Datensicherheit noch ungeklärt, wodurch ein Betrieb von autonomen, intelligenten Systemen über ihre Grenzen hinweg erschwert wird.

Festzustellen ist, dass es aktuell viele inkompatible Teillösungen gibt, die die genannten Anforderungen autonomer, intelligenter Systeme nur teilweise erfüllen. Es fehlt an weiterführenden Ansätzen, wie die speziellen Bedingungen einzelner Systeme vereinheitlicht werden können.

Forschungsbedarfe

- Wechselwirkung zwischen **zukünftigen Kommunikations- und Technologiestandards und intelligenten Systemen** sowie die Untersuchung der perspektivischen Anforderungen, insbesondere an die Kommunikationsarchitektur kommender Industrie 4.0-Systeme, zur Vorbereitung auf zukünftige Kommunikations- und Technologiestandards
- **Auswirkungen der Echtzeitfähigkeit auf funktionale Sicherheit, Verschlüsselung, Absicherung der Datenübertragung und Infrastrukturgröße**; der steigende Einfluss von Echtzeitanforderungen auf die Art der Kommunikation, Prozessorleistung und Netzwerktechnik sowie Ausbau und Ermittlung des Bandbreitenbedarfs auf der Grundlage neuer Methoden für vereinfachte und verstetigte Untersuchungen
- **Mehrwertdienste** und ihr Potenzial für produzierende Unternehmen bei der Umsetzung von Industrie 4.0 sowie der Aufbau notwendiger Kompetenzen zum Betreiben von lokalen Netzen



3 Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0

Die Nutzung von Industrie 4.0-Lösungen setzt eine systematische Planung, Konzipierung, Entwicklung, Validierung, Simulation und Erprobung der zugrundeliegenden technischen Systeme voraus. Die steigende Komplexität der Systeme und die Orchestrierung der übergeordneten Systemverbände erfordern neue Methoden und Werkzeuge. Diese müssen auch neue Aspekte, wie die zunehmende Selbstlernfähigkeit von Systemen und die Datenanalytik, berücksichtigen. Im Sinne einer systemorientierten, interdisziplinären und modellbasierten Entwicklungssystematik stellen diese Methoden und Werkzeuge eine Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 dar. Im Folgenden werden der Stand der Technik, die vorhandenen Defizite und die Forschungsbedarfe an neue Methoden und Werkzeuge in den Handlungsbereichen strategische Planung und Auslegung, Erprobung, Engineering und Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen aufgezeigt.

Die Plattform Industrie 4.0 sollte insbesondere darauf achten, sich aktiv in die im Rahmen der strategischen Forschungs- und Innovationsagenda der Big Data Value Association definierten Projektformate für Zusammenarbeit (Innovation Spaces, Lighthouse Projects, Technical Projects und Cooperation & Coordination Projects)²³ einzubringen, um für internationale Wertschöpfungspotenziale der Zukunft auf europäischer Ebene bei künftigen strategischen Entwicklungen auf dem Gebiet der datengetriebenen Ingenieur- und Wertschöpfungsmethoden und -werkzeuge Einfluss auf die Skalierbarkeit nehmen zu können.

3.1 Strategische Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen

Ausrichten der Strategie, Management von Zielen, Festlegen von Wertschöpfungspotenzialen, Erkennen von Kerntechnologien, systemisches Beherrschen und Beschreiben von Auslegungsmechanismen

Die Einführung von Industrie 4.0-Lösungen sollte stets am Ende eines strategischen Vorgehens stehen. Das hierbei erarbeitete Zielbild ist die Grundlage für die Einführungsplanung, die eigentliche Operationalisierung der formulier-

ten Strategie. Die Transformation der Wertschöpfung erfordert die integrative Planung und Auslegung wandelbarer Systemverbände, statt einzelner Maschinen. Dafür sind entsprechend leistungsfähige integrative Methoden und Werkzeuge erforderlich. Nach der bisherigen Auslegung sind bei heutigen Lösungen vorab keine dynamischen Anpassungen über die Lebensdauer vorgesehen. Klassische Instrumente der markt- und kundensegmentorientierten Ausrichtung in der Produktplanung (zum Beispiel House of Quality) und Modelle für die Bereitstellung von Dienstleistungen (zum Beispiel Business Model Canvas)²⁴ sind statisch.

Ferner fehlt es an einer übergreifenden Betrachtung der vielfältigen Zusammenhänge zwischen Wertschöpfung, Produkten und Services sowie den zugrundeliegenden Geschäftsmodellen. Es mangelt an Systematiken und Methoden zur wertschöpfungsorientierten Planung und Auslegung von gesamtheitlich stark datengetriebenen Industrie 4.0-Lösungen. Es existieren keine Methoden oder Modelle, die das Zusammenspiel aus situationsbezogener Adaption, technikbezogenem Systemwirken (Infrastruktur, technische Systeme, Produkte, Softwareplattformen etc.) und Multi-Stakeholder-Betrachtungen (verschiedene Unternehmen, Staat und öffentliche Organisationen, Kunden oder Nutzer) adäquat abbilden. Dies gilt ebenso für modellbasierte Systembetrachtungen und daten- beziehungsweise informationsgetriebene Entwicklungsansätze für Industrie 4.0-Lösungen und die damit verbundenen datengetriebenen Geschäftsmodelle.

Forschungsbedarfe

- **Grundmodell der Industrie 4.0-Wertschöpfungsauslegung** zur Modellierung der Zusammenhänge der betriebswirtschaftlichen Auslegung von Produktionssystemen und Produkten sowie zur Ermöglichung einer adaptiven Auslegung von Fabriken und Produktfunktionen in Verbindung mit den neuen datengetriebenen Messungen und Wertschöpfungsbeiträgen
- **Baukasten zur Anwendung des Grundmodells** in der Praxis (zum Beispiel digitaler Planungstisch, adaptive Desktop-Cockpits)

²³ Vgl. BDVA 2017. Die Big Data Value Association ist eine Vereinigung von Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus dem europäischen Datenverarbeitungssektor. Seit 2015 arbeitet sie in einer öffentlich-privaten Partnerschaft mit der Europäischen Kommission zusammen.

²⁴ Schlüsselfaktoren des Business Model Canvas im Hinblick auf Nutzenversprechen, Erlösmodell und Wertschöpfungsarchitektur wurden in Kapitel 1 besprochen. Für eine Übersicht zum Business Model Canvas im Kontext von Industrie 4.0 vgl. VDI/VDE 2016, Burmeister et al. 2016, Fabry et al. 2018.

3.2 Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen

Etablieren von Testumgebungen (Testbeds), Aufbauen und Durchführen von Experimenten, Entwurf generischer Lösungsmuster

Es existieren bereits viele Einrichtungen zur Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen, zum Beispiel wissenschaftliche Forschungslabore, Makerspaces, Fab Labs, industrielle Innovationslabore, Lernfabriken oder Co-Working-Zentren. Zu unterscheiden ist dabei zwischen Experimentierräumen und Testumgebungen, sogenannten Testbeds. Erstere ermöglichen aktives Ausprobieren und bewusstes Spielen, um Zusammenhänge und Einflüsse grundlegend zu verstehen, ohne direkt die klassischen Effizienzzwecke zu beurteilen. Testbeds hingegen unterliegen besonders im deutschsprachigen Raum in Bezug auf Normen und Standards hohen Anforderungen. Im Hinblick auf eine Stärkung der Innovationsleistung des Standorts Deutschland besteht ein Handlungsbedarf im Bereich der Testumgebungen für die Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen. Bei der Entwicklung von Erprobungslösungen können und sollten partizipative Modelle, wie sie im Themenfeld 4 beschrieben werden, einbezogen werden.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verzahnung von Produkt und Dienstleistung werden insbesondere Erprobungsmöglichkeiten der entsprechenden PSS benötigt. Die erfolgreiche Vermarktung dieser hybriden Leistungsbündel setzt die gemeinsame, individuell abgestufte Nutzung von Daten der beteiligten Stakeholder, funktionierende Schnittstellen zwischen diesen sowie rentable Preis- und Ertragsmodelle voraus. Innovative Testumgebungen sind zur Erforschung und Validierung von Ansätzen, Technologien, Softwarewerkzeugen, Methoden, Vorgehensweisen und Geschäftsmodellen notwendig.

Ebenfalls gilt es, die Kooperationskultur zwischen Industrie und Anbietern von Experimentierumgebungen zu verbessern. Insbesondere für KMU bestehen Barrieren, die Leistung von Einrichtungen zur Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen oben genannter Institutionen in Anspruch zu nehmen. Ferner mangelt es an offenen Testbeds, auf die Forschungsinstitute und Unternehmen gleichermaßen und kooperativ zugreifen können.

Die Realisierung dieser Test- und Experimentierräume sollte unter Einbeziehung aller relevanter Stakeholder, wie Bund, Länder, Kommunen, Versorger, Forschungseinrichtungen, digitale Lösungsentwickler, IT- und Anwenderunternehmen, inklusive ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, sowie Privatpersonen als Anwender und Nutzer erfolgen.

Forschungsbedarfe

- **Offene, cyber-physische Test- und Experimentier-räume** mit den Merkmalen beziehungsweise Möglichkeiten:
 - Abbildung flexibler und hochagiler Wertschöpfungsnetzwerke
 - Erlebnis und Verständnis der neuesten Ansätze, Technologien, Softwarewerkzeuge, Methoden, Vorgehensweisen und Geschäftsmodelle
 - Entwicklung und Erprobung digitaler Aufbereitungen und neuer Interaktionsweisen mit symbiotischen und mit den Denkweisen der Menschen harmonisierenden kognitiven Vorgehensweisen
- **Rahmenwerk zum Aufbau von Experimentierräumen** als Möglichkeit für interessierte Unternehmen und Forschungspartner, das Zusammenspiel zwischen vernetzten technischen Systemen, der klassischen Wertschöpfung und den neuen Smart Services zu verstehen, zu erleben und zu beeinflussen

Entwicklungsbedarfe

- **Offene, cyber-physische Test- und Experimentier-räume** mit den Merkmalen beziehungsweise Möglichkeiten:
 - Konfiguration und Skalierung entsprechend den Aufgaben der Nutzer
 - Erprobung der Potenziale und Einschränkungen bestehender methodischer Ansätze
- **Testkits** für die Evaluation von Industrie 4.0-Vorhaben durch schnelle Implementierung und Pilotanwendung in der eigenen Fertigungsumgebung

3.3 Engineering von Industrie 4.0-Lösungen

Erstellen des Industrie 4.0-Systementwurfs und der Lösungsarchitektur, Erfassen der Nachverfolgbarkeit der Abhängigkeiten, Planen, Validieren, Simulieren, Absichern, Verifizieren, Freigeben, virtuell In-Betrieb-nehmen

Bisherige Forschungsarbeiten im Kontext von Industrie 4.0 betrachten überwiegend die technologische Machbarkeit der Vernetzung von Produkten und Produktionsanlagen. Kaum berücksichtigt wurde bislang die Entwicklung von Industrie 4.0-Lösungen sowie von Industrie 4.0-Lösungsbausteinen, die auf die systemischen Zusammenhänge in den anwendenden Branchen und Unternehmen adaptiert werden können. Klassische Ansätze der Entwicklung werden der hohen Komplexität der Produkte und Produktionssysteme sowie der datenbasierten PSS nicht gerecht. Sie ermöglichen keine effektive Handhabung der vielschichtigen Datenformen und Modelle im digitalen Engineering. Außerdem sind bestehende Methoden und Werkzeuge für den Einsatz im Rahmen der klassischen Interaktion zwischen technischer Entwicklung und Management ausgelegt und unterstützen im Engineering die neuen notwendigen digitalen Bedarfe in den Bereichen Systemarchitekturen und Datenanalysen nur unzureichend.

Ein Lösungsansatz, diesen Herausforderungen zu begegnen, ist das Systems Engineering. Bislang ist es jedoch durch Praktiken getrieben und lediglich durch Einzellösungen geprägt. Zusätzliche Lösungsansätze sind von der mittlerweile differenzierteren Auffächerung von KI-basierten Lösungen zu erwarten: Hierbei sind die auf der europäischen Ebene bereits etablierten strategischen Forschungsfelder für die Anwendung von KI in eigenen Projekten zu berücksichtigen, die in der „Strategic Research and Innovation and Deployment Agenda for AI PPP“ ausgeführt werden.²⁵

Die im Rahmen dieser Agenda bisher angedachten zwölf Rollen im Ökosystem von KI-Lösungen (end user, application provider, user, data provider, technology creator, broker, innovator / entrepreneur, researcher / academic, regulator, standardization body, investor / venture capitalist, citizen) müssen mit den benötigten und anvisierten Rollen im erweiterten Systems Engineering abgeglichen beziehungsweise aufeinander abgestimmt werden.

Forschungsbedarfe

- Neues Paradigma der Entwicklungssystematik für komplexe Systeme: **Advanced Systems Engineering**, unter anderem mit den Merkmalen:
 - Integration der Bereiche strategische Produktplanung und Produkt-, Dienstleistungs- und Produktionssystementwicklung sowie Orchestrierung der Akteure
 - Ganzheitliche Lösungsansätze zur Beschreibung des Produkt- und Dienstleistungslebenszyklus und disziplinübergreifender Entwicklungsmethoden, wie eine erweiterte und übergreifende Modellbildung jenseits der bisherigen Partialmodelle
- **Wissenschaftliches Fundament für eine integrative, Semantik erfassende Modellierungstheorie** sowohl für die technischen Systeme (zum Beispiel smarte Produkte bis hin zu PSS) als auch für Produktionssysteme.
 - Neue Spezifikationstechniken, Methoden zur digitalen Modellbildung und Simulation sowie Vorgehenssystematiken mit einer insbesondere adressatengerechten Integration in bekannte domänenspezifische Modellierungsmethoden und Softwarewerkzeuge
 - Eine definierte gemeinsame Industrie 4.0-Semantik als Basis für die zukünftige durchgängige Integration digitaler Modelle im Kontext produktentwicklungs- und produktionsspezifischer Prozesse sowie die Übertragung auf alle Lebensphasen im gesamten Produktlebenszyklus
- **Industrie 4.0-Entwurfssysteme** zur Beschreibung von vernetzten CPS und CPPS zur Befähigung folgender Aspekte:
 - Modellierung von digitalen Zwillingen und den damit verbundenen und benötigten digitalen Analytik-Strömen
 - Konzeption und Implementierung von Werkzeugen, die eine **automatisierte Erstellung** des digitalen Zwillinges ermöglichen
 - Entwicklung und Etablierung von Ansätzen zur **Validierung** digitaler Zwillinge

25 Vgl. BDVA/eurobotics 2019.

- Entwicklung von Methoden zur **Validierung von realen Produkten, Anlagen** etc. am digitalen Zwilling in einer frühen Phase
- Inverse Auslegung der benötigten Datenanalytik zur Bestimmung der minimalen Sensorbebauung und beherrschter Basis-KI-Bausteine
- **Industrie 4.0-Vorfühmodelle (Mock-ups)** als interaktionsfähige Planungs- und Entscheidungsprototypen für Entwickler, Planer, Entscheider und Analytiker von vernetzten Lösungen
- **Vorausschauende Industrie 4.0-Digital-Reality-Simulationen** zur Erfassung von selbstlernenden Systembausteinen als Teil der Industrie 4.0-Produkt- und Produktionssysteme
- Neukonzeptionierung des **Systemdesigns** im Hinblick auf
 - Intuitiv verständliche Konzepte sowie einfach anwendbare Methoden und Tools
 - Kriterien zur Bewertung des Grads der Wandlungsfähigkeit eines Systems
 - Methoden zur Ermittlung einer optimalen Informationsökonomie für den sinnvollen Einsatz von Funktionen und Ressourcen
 - Konzepte für einen allgemeinen Basisstandard zur nachhaltigen Sicherung der Interoperabilität und der Möglichkeit einer souveränen gemeinsamen Ausgestaltung
 - Entwicklung neuer Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0, unter anderem zur Integration funktionaler und nichtfunktionaler Systemeigenschaften, IT-Sicherheit, Nachhaltigkeit, Benutzerfreundlichkeit, Resilienz
- Neue Ansätze zur Integration von KI

Entwicklungsbedarfe

- **Transfer des wissenschaftlichen Fundaments in die industrielle Praxis für eine integrative, Semantik erfassende Modellierungstheorie** sowohl für die technischen Systeme (zum Beispiel smarte Produkte bis hin zu Produkt-Service-Systemen) als auch für Produktionssysteme.
 - Verknüpfung von existierenden Theorien, Beschreibungsmitteln und Methoden sowie damit verbunde-

nen digitalen Werkzeugen aus der Informatik mit neuen digitalen Modellierungsverfahren für die Beschreibung der Vernetzung von CPS

- **Industrie 4.0-Entwurfssysteme** zur Beschreibung von vernetzten CPS und CPPS zur Befähigung folgender Aspekte:
 - Modellierung hochvernetzter multidisziplinärer Techniksysteme, inklusive der damit verbundenen Smart Services und den dafür benötigten Daten- und Informationsflüssen
 - Auslegung, Beschreibung und Simulation von funktionsorientierten Sensor- und Aktor-Systemen als Modullösungen (Plug & Play) für Industrie 4.0
- **Skalierbarer, dynamische Industrie 4.0-Informationsstandards** zum flexiblen dynamischen Verbinden und Verlinken von Beschreibungs-, Simulations-, Steuerungs-, Austausch- und Datenbank-Ledger-Fragmenten unter Berücksichtigung oder Verwendung neuartiger oder bekannter Basistechnologien

3.4 Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen

Überwachen und Vorausschauen, Bewerten, Ad-hoc-Umplanen, Warten, Reparieren, Anhalten, Außer-Betrieb-nehmen

Die Landkarte Industrie 4.0 der Plattform Industrie 4.0²⁶ zeigt zahlreiche Anwendungsbeispiele von Industrie 4.0-Lösungen. Prozessbegleitende Methoden sind ein wichtiger Erfolgsfaktor für das Betreiben von Industrie 4.0-Lösungen mit hohen Anforderungen in Bezug auf Wandlungs- und Echtzeitfähigkeit. Vor allem in KMU basieren die heutigen Monitoring-, Analyse- und Umplanungsmethoden für laufende Produktions- oder Produktsysteme auf klassischen Statistiklösungen, die es erschweren, in Echtzeit und situationsgerecht zu agieren.

Derzeit fehlt es an theoretischen und praxistauglichen Vorgehensweisen, Werkzeugen und Methoden zum optimalen Betrieb von wandlungsfähigen industriellen Prozessen. Bisherige Industrie 4.0-Lösungsbausteine werden nur bedingt mit bestehenden Produktionsmodellen verknüpft. Zudem werden Verbindungen zu bereits etablierten Fertigungsphilosophien wie Lean-Ansätzen selten hergestellt. Des Weiteren sind Wechselwirkungen zwischen Werkzeugen, Methoden und Fachsemantik bisher nicht geklärt.

Vor dem Hintergrund neuer technologischer Entwicklungen (siehe Kapitel 2) mangelt es derzeit beispielsweise an Erkenntnissen und grundlegenden Fähigkeiten im Hinblick auf die (zukünftigen) digitalen Zwillinge. Der große Bereich der Kommunikationsverfahren muss mit den heutigen und zukünftigen Erbringungsleistungen von Produkten im Feld und den unterschiedlichen Maschinen- und Produktionslinien in den (verteilten) Fabriken, inklusive der damit verbundenen Material- und Informationslogistiken, abgeglichen werden.

Durch den Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen lassen sich Anlagenzustände ermitteln, Produktionsabläufe analysieren und Transparenz über den tatsächlichen Fabrikbetrieb herstellen. Hier muss insgesamt geklärt werden, welche Methoden und Werkzeuge helfen, um aus der Datenvielfalt des operativen Betriebs auf die verbesserte Auslegung und Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen zu schließen. Dies betrifft nicht nur Informationsmodelle und datengetriebene Methoden, sondern auch wandelbare Automatisierungslösungen und Modelle für Simulation und Systemdesign.

Technologische Enabler wie die Cloud-Technologie, zunehmend rechenkräftige und vernetzte eingebettete Systeme, Virtualisierungstechnologie, leistungsfähige Kommunikationstechnik wie das kommende 5G-Netzwerk und nicht zuletzt maschinelles Lernen und KI nehmen zunehmend Einfluss auf die Produktion und die damit verbundenen neuen Auslegungs- und Betreibermethoden und IT-Werkzeuge.

Der effiziente Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens und KI-gestützter Anwendungen in der Produktion wird erst durch die Schaffung einer flächendeckenden und skalierbaren Data Governance absehbar und möglich, die auch semantische Aspekte zur Interpretation von Daten und Wissensrepräsentationen für lernende Systeme in der Produktion zu berücksichtigen hat.

Forschungsbedarfe

- Erforschung beziehungsweise erhebliche Erweiterung einer **einheitlichen Industrie 4.0-Semantik** zur Integration digitaler Modelle in Produktentwicklungs- und Produktionsprozesse und zu ihrer Übertragbarkeit auf den gesamten Produktlebenszyklus
- **Domänenübergreifende Informationsmodelle** über Produkt, Anlage und Geschäftsprozesse; Metamodelle zur Beschreibung von geforderten Eigenschaften für ein Produkt oder einen Prozess; Methoden zur Anwendung von Ontologien und regelbasierten Verfahren im operativen Betrieb
- Metamodelle zur **Integration von gemessenen und aus der Datenanalytik gewonnenen Daten** für datengetriebene Methoden
 - Methoden zur Beschreibung hochvernetzter multidisziplinärer Techniksysteme und Modellierung der damit verbundenen Smart Services sowie zur Ermittlung der dafür benötigten Daten- und Informationsflüsse
- Systematische Möglichkeit zur **Übernahme der Simulationsmodelle aus der Auslegung in die Betriebsphase** (Simulationstechnik)
 - Domänenübergreifende, skalierbare Simulationsmodelle (zum Beispiel Auslegung, Produktion, Instandhaltung, Geschäftsmodelle); situationsgerechte, produkt- und prozessspezifische Bewertungen
 - Metamodelle zur Steuerung der Simulation in der Betriebsphase
 - Standardisierte Methoden zur Archivierung, Verwaltung und Auswertung von Simulationsergebnissen
 - Co-Simulationstechniken mit Möglichkeit zur Anpassung an die Dynamik der industriellen Prozesse
- **Wandelbare Automatisierungslösungen** und Methoden zur
 - Konsistenzsicherung der Systemfunktionalität bei Wandlungsprozessen
 - Sicherstellung von Echtzeitanforderungen während des Wandlungsprozesses
 - Beschreibung der zu erwartenden Dynamiken der Adaption an sich ändernde technische Rahmenbedingungen oder Geschäftsprozesse
- Neuartiges **Betriebssystem für Industrie 4.0-Wertschöpfungsnetzwerke** bezogen auf:
 - Neue Konzepte und Ausprägungen eines (Produktions-)Betriebssystems für den zunehmenden Einsatz offener Komponenten und Schnittstellen, die mit den Ansätzen des industriellen Internets der Dinge und moderner serviceorientierter Architekturen das technische Rückgrat für CPPS bilden
 - Modularisierung einer Fabrik als miteinander agierende CPPS



- Dynamisierung der auszutauschenden Grundbausteine (Hard- und Softwarekomponenten) basierend auf offenen Standards und Schnittstellen
- Intuitive, menschenzentrierte Anwender- und Anwendungsschnittstellen durch KI-unterstützte Management-Schichten in Form von Diensten, Anwendungen und Tools für ein verteiltes Betriebssystem
- Architektur von Diensten, dynamische Allokation von Rechenressourcen, vom Edge Device bis hin zu High Performance Cluster im Back-End, und optimale Nutzung der Kommunikationsinfrastruktur

Entwicklungsbedarfe

- Metamodelle zur **Integration von gemessenen und aus der Datenanalytik gewonnenen Daten** für datengetriebene Methoden
 - Methoden zur Modularisierung und Standardisierung der datengetriebenen Funktionen als anwendbare Apps
 - Kommunikationsstandards für die Ankopplung der datengetriebenen Anwendungen an die Prozessführung
- Einheitliches Konzept zur Bewertung von Qualität und Verlässlichkeit
- Systematische Möglichkeit zur **Übernahme der Simulationsmodelle aus der Auslegung in die Betriebsphase** (Simulationstechnik)
 - Ausbau von Vorführmodellen (Mock-ups) zur visuellen Unterstützung von Akteuren bei der Planung und Bewertung von vernetzten Industrie 4.0-Lösungen
- **Wandelbare Automatisierungslösungen** und Methoden zur Re-Optimierung der Zuordnung der Anwendungen mit ihren Rechen-, Speicher- und Kommunikationslasten auf die verfügbaren Ressourcen durch dynamisches Re-Deployment nach Wandlungsprozessen

4 Arbeit und Gesellschaft

Industrie 4.0 bringt einen nachhaltigen Wandel für Arbeit und Gesellschaft mit sich. Dieser Wandel ist gesellschaftspolitisch und unternehmensstrategisch gestaltbar. Die zukünftige Forschung im Feld Arbeit und Gesellschaft sollte einen Beitrag dazu leisten, das globale Ökosystem Industrie 4.0 erfolgreich und am Menschen orientiert zu gestalten. Ziel ist es, dass Beschäftigte Industrie 4.0 partizipativ gestalten und sich souverän in Industrie 4.0-Umgebungen bewegen können. Zukünftige Forschung kann einen wichtigen Beitrag für gute Arbeit und Bildung, Teilhabe und Vertrauen sowie Datenschutz und Datensicherheit leisten. Neue Erkenntnisse aus den Bereichen Arbeit und Gesellschaft können zudem wertvolle Ergänzungen für neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0 (siehe Kapitel 3) liefern und in die Gestaltung neuer Entwicklungs- und Steuerungslösungen einfließen. Insgesamt bestehen in diesem Themenfeld Herausforderungen hinsichtlich der Gestaltung rechtlicher Rahmenbedingungen, insbesondere von Datenschutz und Datensicherheit, der soziotechnischen Gestaltung von Systemen und Arbeit, der Kompetenzentwicklung und Qualifizierung, der Akzeptanz, Partizipation und Führungskultur sowie beim gesellschaftlichen Dialog.

4.1 Gestaltung rechtlicher Rahmenbedingungen

Rechtsgemäße Gestaltung, Fortbildung des Rechts, personenbezogene Daten und individuelle Leistungsüberwachung, rechtliche Unsicherheit

Die Regelungen rechtlicher Herausforderungen bilden einen unabdingbaren Rahmen für die Bewältigung des Wandels von Arbeit und Gesellschaft in seiner Gesamtheit. Als eine der zentralen rechtlichen Herausforderungen von Industrie 4.0 sind dabei die Themen Datenschutz und Datensicherheit anzusehen. Industrie 4.0 wirft neue Fragen der Datensicherheit über Unternehmensgrenzen hinweg auf. Maschinendaten sowie die bei adaptiver Robotik oder dem Einsatz von Wearables funktionsrelevanten Metadaten weisen zunehmend einen Bezug zu einzelnen Personen und deren Verhalten auf und stellen damit bisherige Anforderungen an den personenbezogenen Datenschutz vor neue Herausforderungen.

Die neuen Potenziale, Folgen und Grenzen der Datennutzung, etwa zur Verbesserung der Betriebsabläufe, Feedbacks und Schulungen sowie der Leistungskontrolle, sind bislang wenig erforscht. Es besteht eine Rechtsunsicherheit hinsichtlich der Anwendbarkeit des Datenschutzrechts und

der Vorgaben durch abwägungsbedürftige Generalklauseln. Es fehlen Methodiken und Best Practices zur rechtmäßigen Gestaltung von Industrie 4.0. Außerdem werden Modelle zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit jenseits der EU-Grenzen benötigt. Erforscht werden sollte zudem, welchen Weiterbildungsbedarf zu diesen Themen die mit der Gestaltung von Industrie 4.0-Systemen in Unternehmen befassten Personengruppen und die betrieblichen Interessenvertretungen haben.

Forschungsbedarf

- **Weiterbildungsbedarfe** und Methoden zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für den Umgang mit faktischer und rechtlicher Unsicherheit in kurzen technischen Innovationszyklen

Entwicklungsbedarfe

- Kriterien für die **rechtsgemäße und rechtsverträgliche Gestaltung** der neuen Technologien und der technikadäquaten Fortbildung des Rechts
- Neue Strategien der **Erfassung und Weitergabe personenbezogener Daten** und individueller Leistungsüberwachung unter Wahrung der Datensouveränität und Identifizierung von ethischen und rechtlichen Grenzen; zu klären sind Fragen nach den sinnvollen Formen, aber auch den Grenzen individueller Leistungsüberwachung bei unterschiedlichsten Arbeitsbedingungen

4.2 Kriterien soziotechnischer System- und Arbeitsgestaltung

Soziotechnische Gestaltungskriterien, Systemgestaltung und -einführung, Beobachtung (inter-)nationaler Wertschöpfungsverteilungen, Stellenwert menschlicher Arbeit, Kollaborationsmuster Mensch und Maschine, juristische Fragen

Die Voraussetzung einer am Menschen orientierten Arbeitsgestaltung ist ein soziotechnisches Verständnis von Industrie 4.0. Dazu bedarf es einer ganzheitlichen Strategie bei der Implementierung von Industrie 4.0, die an die Bedürfnisse der Beschäftigten angepasst ist. Dafür fehlen bisher jedoch klare, vor allem domänenspezifische Kriterien und Methoden. Zu berücksichtigen sind hier die unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten bei verschiedensten Bedingungen, etwa in verschiedenen Beschäftigungssegmenten mit je spezifischen Qualifikationsniveaus. Darüber hinaus stellt die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interak-

tion angesichts der technologischen Dynamik und der zunehmenden Autonomisierung digitaler Systeme auch in Zukunft die zentrale Herausforderung für am Menschen orientierte Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen dar. Die Forschung hierzu steht erst am Anfang. Unklar ist beispielsweise, welche neuen Formen der Kommunikation und Interaktion zwischen Mensch und Maschine unter den verschiedensten industriellen Bedingungen erforderlich sind.

Es stellen sich zudem neue arbeitssituative Herausforderungen, die infolge eines übersteigerten Vertrauens in die autonomen Systeme (Complacency) und eines ständigen Wechsels zwischen Unter- und Überforderung (Vigilanz) entstehen können. Daher ist bei der Kriterienerstellung die Partizipation der Beschäftigten und die Einbindung ihrer Perspektive von unverzichtbarer Bedeutung. Auch Führungskräfte und Mitglieder des Betriebsrats brauchen neue Kompetenzen, um die Optionen und Grenzen neuer soziotechnischer Systeme strategisch einschätzen zu können. Außerdem sind rechtliche Anforderungen für eine soziotechnische System- und Arbeitsgestaltung zu berücksichtigen. Ziel ist es, die Voraussetzungen für einen strukturierten und gezielten Ansatz zu schaffen und ein lediglich technikzentriertes Vorgehen zu vermeiden. Dabei ist der Einbezug von Interessenvertretungen und von Mitbestimmungsstrukturen zu fördern.

Forschungsbedarfe

- **Funktionsteilung zwischen technischem und personellem System sowie systematischer Entwurf von Gestaltungsprinzipien der Mensch-Maschine-Interaktion**, der Kontrollverteilung und optimalen komplementären Systemauslegung zwischen Mensch und Maschine
 - Erforschung und Identifikation von möglichen **Grenzen autonomer Systeme und einer Mensch-Maschine-Kollaboration** durch ökonomische, funktionale und ethische Bewertungen und Anwendungsszenarien
 - **Juristische Fragen, wie die rechtssichere Umsetzung des Direktionsrechts** in Mensch-Roboter-Teams
- **Nationale und internationale Wertschöpfungsverteilungen** zur (globalen) Verwirklichung von Nachhaltigkeit und Souveränität

Entwicklungsbedarfe

- **Domänenspezifische soziotechnische Gestaltungskriterien** für unterschiedliche Beschäftigtengruppen, Funktionsbereiche, Qualifikationsniveaus und Hierarchiestufen – unter Berücksichtigung von (unter anderem öffentlich geförderten) Gestaltungsprojekten von Arbeit
- Verfahren einer **systematischen soziotechnischen Systemgestaltung und -einführung** für unterschiedliche Unternehmenstypen
- **Funktionsteilung zwischen technischem und personellem System sowie systematischer Entwurf von Gestaltungsprinzipien der Mensch-Maschine-Interaktion**, der Kontrollverteilung und optimalen komplementären Systemauslegung zwischen Mensch und Maschine
 - Gestaltungskriterien zur **Erhaltung der Lern- und Erfahrungsfähigkeit** der Menschen und der Systeme
 - **Situationsadäquate Kollaborationsmuster** zwischen Mensch und Maschine
- Spezifische **Kriterien für Produktionssysteme**, die vollkommen neu aufgebaut werden (Greenfield Projects) oder Industrie 4.0 geringfügig in der bestehenden Produktion adaptieren

4.3 Dringlichkeit von Kompetenzentwicklung und Qualifizierung

Neue Formen des Lernens, Qualifikations- und Kompetenzniveaus, skalierbare digitale Bildungs- und Qualifizierungsprozesse, duales System der Berufsbildung

Kompetenzentwicklung und Weiterbildung gelten als die zentralen Stellhebel, den digitalen Wandel sozial und ökonomisch erfolgreich zu bewältigen.²⁷ Die Dynamik des technisch-sozialen Wandels erfordert, die Voraussetzungen und Methoden des lebenslangen Lernens zu fördern. Zudem besteht die Anforderung, dass zunehmend komplexere und selbststeuernde Systeme im Störfall stets den kompetenten Eingriff des Menschen benötigen. Daher gilt es, Erfahrungswissen zu sichern und Tendenzen der Dequalifizierung infolge autonomer Prozesse zu vermeiden.

Das bestehende Bildungssystem fördert bisher jedoch kaum das lebenslange Weiterlernen und die komplexen Kompetenzentwicklungsbedarfe von Industrie 4.0 überfordern die etablierten Weiterbildungsangebote. Gleichzeitig herrscht in den Unternehmen wenig Transparenz über den Bestand und den strategischen Bedarf an Kompetenzen. Schon verfügbares Wissen, zum Beispiel aus öffentlich geförderten Gestaltungsprojekte zur Kompetenzentwicklung, wird zu wenig genutzt und die Förderung von Digitalisierungsprojekten ist zu wenig auf Qualifizierungsfragen ausgerichtet.

Forschungsbedarfe

- Erforderliche **Rahmenbedingungen für neue Lernformen**, wie selbstorganisierte Lernpfade und -formate, oder für die Integration informeller oder netzwerkbasierter Kompetenzentwicklung
- Neue Konzepte zur Integration des Industrie 4.0-Profiles in das duale System der Berufsausbildung

Entwicklungsbedarfe

- Neue Formen von **praxisorientiertem und individuellem Lernen** sowie lernförderlicher Arbeitsumgebungen zur Weiterentwicklung von Handlungsfähigkeiten und Kompetenzen
- **Digitalbasierte und intelligente Lösungen** für unterschiedliche Qualifikations- und Kompetenzniveaus unter besonderer Berücksichtigung gering qualifizierter Beschäftigter
- Konzepte eines (Methoden-)Wandels von Bildungs- und Qualifizierungsprozessen hin zu Formen der **skalierbaren Nutzung digitaler Methoden**

4.4 Förderung von Akzeptanz, Ausbau von Partizipation und Wandel von Führungskulturen

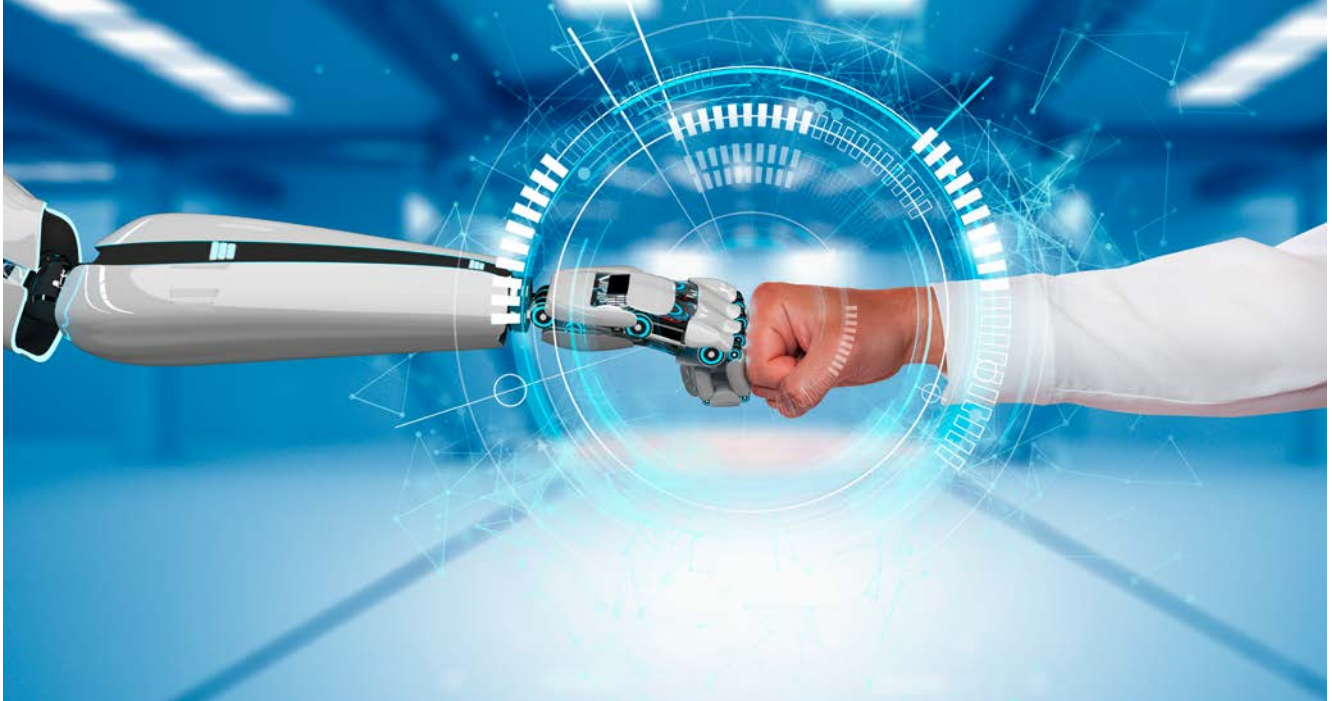
Mitbestimmung, Partizipationsformen, informelle Prozesse, Managementfunktionen und Führungsstile

Die Faktoren Akzeptanz, Partizipation und Führungskultur bestimmen den Erfolg von Industrie 4.0 maßgeblich. Industrie 4.0 verändert tradierte Rollen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Führungskräften und deren Legitimation. Digitale Kommunikationsmedien machen Information und Wissen inner- und überbetrieblich transparenter und Führungsfunktionen differenzieren sich auf verschiedenen Ebenen – hierarchisch, horizontal, im Netzwerk etc. – aus. Trends wie Agilität oder Start-up-Kultur überlagern dies zusätzlich. Zudem unterliegen alle Organisationen steigenden Compliance-Anforderungen. Daher ist eine umfassende Neubewertung des Führungsverständnisses sowie der Einbindungsformen der Beschäftigten unabdingbar.

Trotz vielfacher Diskussion dieser Herausforderungen fehlen hierzu systematische Untersuchungen und positive Beispiele. Offen ist, wie die Faktoren Akzeptanz, Partizipation und Führungskultur die Einführung von Industrie 4.0 fördern oder hemmen. Umgekehrt ist noch ungeklärt, inwieweit neue Optionen der Transparenz und digitalen Kontrolle neue und offenere Führungskulturen technisch unterlaufen. Zudem stellt sich die Frage, inwieweit das Alter und andere soziodemografische Indikatoren Akzeptanzprozesse beeinflussen.²⁸

Forschungsbedarfe

- Nutzung und Befähigung der unterschätzten Ressource gut qualifizierter Beschäftigter in Deutschland für eine innovationsorientierte Gestaltung von Industrie 4.0 auch mithilfe von lebendiger Mitbestimmung
- Bedeutung des Erfahrungswissens und der informellen Prozesse der Kommunikation und Kooperation zwischen Beschäftigten für die Gestaltung von Industrie 4.0-Lösungen
- Wandel der Managementfunktionen und Führungsstile und der hierfür erforderlichen Kompetenzen



Entwicklungsbedarfe

- Unterschiedliche **Partizipationsformen der betrieblichen Mitbestimmung** im Hinblick auf neue Anforderungen für eine teilhabeorientierte sowie sachlich und zeitlich sinnvolle Gestaltung von Industrie 4.0
- Neue Ansätze zur Befähigung der Beschäftigten für eine **echte und frühzeitige Teilhabe an der Gestaltung von Industrie 4.0-Lösungen**, statt sie lediglich im späteren Verlauf „mitzunehmen“

4.5 Gesellschaftspolitischer Dialog

Soziale Risiken und Chancen, Attraktivität von Industriearbeit, Work Life Balance, Gestaltung und Mitbestimmung, sozialpolitische Herausforderungen

Der Wandel zu Industrie 4.0 betrifft die ganze Gesellschaft. Eine sozial nachhaltige und zukunftsfähige digitale Transformation erfordert daher eine zukunftsfähige Weiterentwicklung der sozialen Sicherungssysteme, der Institutionen des Arbeitsmarkts, der beruflichen Bildung und der Mitbestimmung. Wie mit Industrie 4.0 etwa gute Arbeit, Bildung oder Klimaschutz befördert werden können, ist vor allem auch eine Frage der Teilhabe. Zu einem produktiven gesell-

schaftspolitischen Dialog gehört darüber hinaus ein adressatengerechter Erkenntnistransfer. Ein gesellschaftspolitischer Dialog, der unterschiedliche Interessen ernst nimmt und die Partizipation und den Austausch vieler gesellschaftlicher Gruppen ermöglicht, ist daher unverzichtbar. Ziele sind die Aufklärung und Versachlichung der Diskussion.

Forschungsbedarfe

- **Soziale Chancen und Risiken** der sozioökonomischen Entwicklung durch den Wandel von Arbeitsmarktbedingungen, einschließlich der Beschäftigungsmöglichkeiten von gering qualifizierten Arbeitskräften
- **Sozialpolitische Gestaltungskonzepte** beispielsweise für eine gesamtgesellschaftliche Teilhabe an steigender Wertschöpfung; Vermeidung zunehmender sozialstruktureller Polarisierung und sozialer Ungleichheit; kreative Modelle sozialpolitischer Regulation

Entwicklungsbedarf

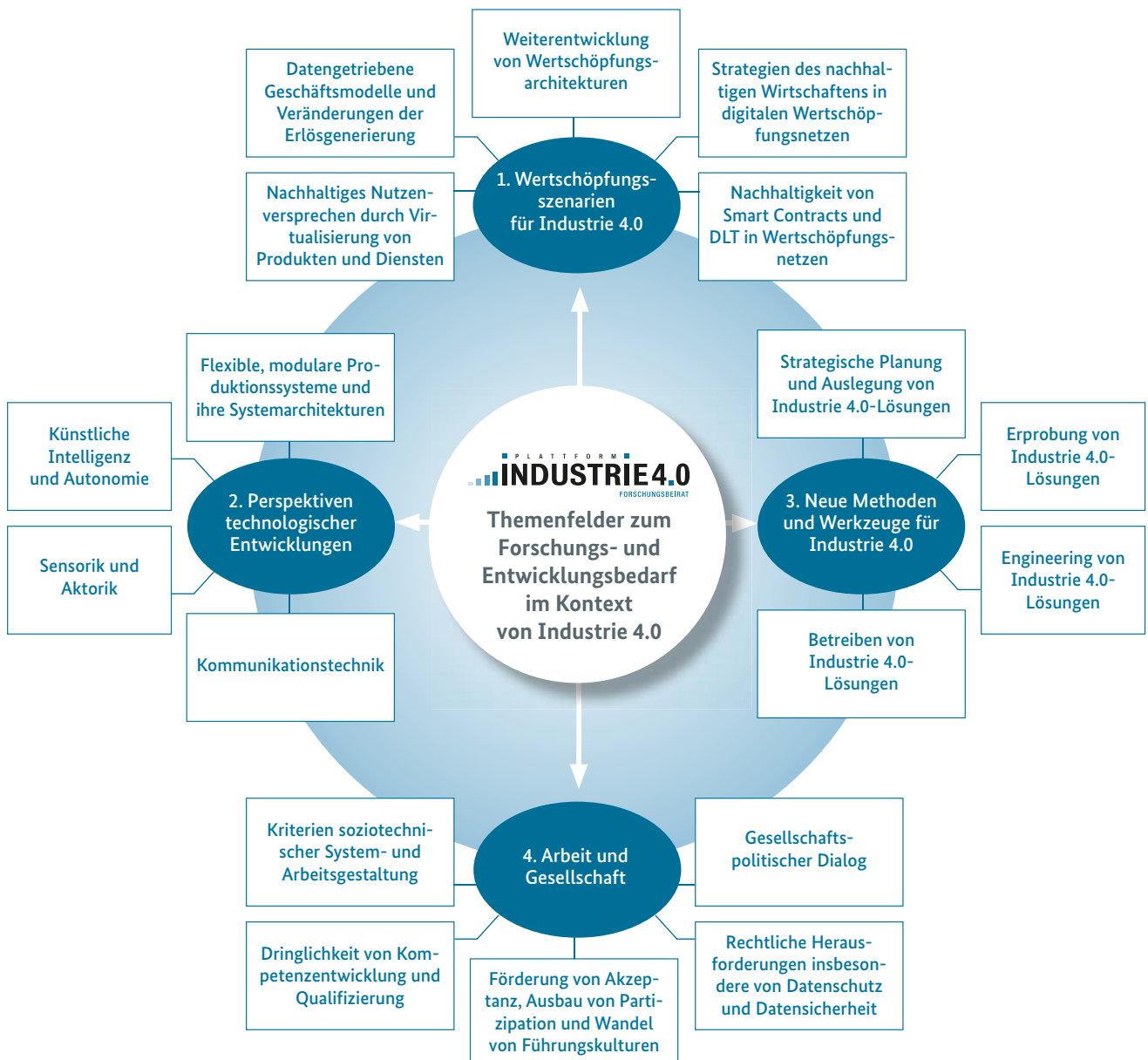
- Neuer Ansätze zur Steigerung der **Attraktivität von Industriearbeit und Gestaltungsmöglichkeiten der Work-Life-Balance** aufgrund des Fachkräftemangels

Zusammenfassung

Mit der Herausarbeitung und Definition des aktuellen sowie zukünftigen Forschungs- beziehungsweise Entwicklungsbedarfs zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0 zielt der Forschungsbeirat als unabhängiges und strategisches Beratungsgremium der Plattform Industrie 4.0 darauf ab, einen wichtigen Beitrag zur Sicherung des Wirtschaftsstandorts im Zuge der digitalen Transformation zu leisten und die souveräne Rolle Deutschlands als Leitmarkt und -anbieter von Industrie 4.0-Lösungen zu festigen.

Es wurden vier spezifische Themenfelder definiert, die den Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten kategorisieren. Innerhalb der jeweiligen Themenfelder erfolgte eine Darstellung des Status quo, einschließlich der sich gegenwärtig abzeichnenden Defizite. Von dieser Basis aus wurden die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe abgeleitet. Die nachfolgende Grafik verdeutlicht die Systematik der identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe.

Themenfelder zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Kontext von Industrie 4.0



Das erste Themenfeld „Wertschöpfungsszenarien für Industrie 4.0“ definiert den Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus ökonomischer Sicht. Dabei werden neben den zu überwindenden Herausforderungen in der Konzeption und Umsetzung innovativer, daten- beziehungsweise wissensgetriebener Geschäftsmodelle mit den generischen Dimensionen Nutzenversprechen, Erlösmodell und Wertschöpfungsarchitektur auch Aspekte der Nachhaltigkeit in digitalen Wertschöpfungsnetzwerken beziehungsweise Ökosystemen sowie die Klärung von Fragen der Rechtssicherheit und Haftung hervorgehoben.

Im zweiten Themenfeld erfolgt die Ableitung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs im Kontext der „Perspektiven technologischer Entwicklungen“. Der Schwerpunkt liegt hier einerseits auf flexibel und modular konfigurierbaren Produktionssystemen und ihren Systemarchitekturen und andererseits auf maßgeblichen technologischen Treibern. Dabei werden wesentliche Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in den Bereichen KI und Autonomie, Sensorik und Aktorik sowie in der Kommunikationstechnik identifiziert.

„Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0“ bilden die dritte Themenfeld-Kategorie. Dort wird konkreter Forschungs- und Entwicklungsbedarf vor allem in der strategischen Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen gesehen. Darüber hinaus erfolgt eine Differenzierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs nach Erprobung, Engineering und Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen.

Das vierte Themenfeld „Arbeit und Gesellschaft“ erfasst den Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus soziologischer Perspektive sowie im Kontext der Zukunft der Arbeit. Erkenntnisse und Methoden werden hier benötigt für die soziotechnische System- und Arbeitsgestaltung, die Notwendigkeit zum Aufbau von Kompetenzen, die Implementierung von Qualifizierungsstrategien, die Förderung der Akzeptanz von Industrie 4.0, die Steigerung der Partizipation und den Wandel von Führungskulturen. Eine zentrale Stellung nehmen dabei auch die offenen Fragen im Hinblick auf rechtliche Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf Datenschutz und -sicherheit, ein. Zudem gilt es, für den gesamtgesellschaftlichen Dialog die Forschung zu den sozialen Risiken und Chancen von Industrie 4.0 voranzutreiben.

Nur durch die gemeinsame Anstrengung von Stakeholdern aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft können die innerhalb der genannten Themenfelder abgeleiteten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe umgesetzt werden. Sie müssen in bisherigen und zukünftigen förderpolitischen Ansätzen, Vorhaben und Initiativen ihre Berücksichtigung finden. Zudem sollte das nationale Innovationssystem vor dem Hintergrund der disruptiven Entwicklungen des digitalen Wandels und der seit Jahren anhaltenden Beschleunigung der Forschungs- und Entwicklungsprozesse kritisch reflektiert werden. Dazu hat der Forschungsbeirat ein Memorandum mit dem Ziel verfasst, eine Weiterentwicklung des Innovationssystems in Deutschland als Ganzes und damit den Rahmen, innerhalb dessen neue Innovationen in Form von Produkten, Verfahren, Dienstleistungen oder Geschäftsmodellen entstehen können, voranzutreiben.²⁹

Literatur

acatech 2016

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Kompetenzen für Industrie 4.0 – Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze* (acatech POSITION), München: Herbert Utz Verlag 2016.

<https://www.acatech.de/publikation/kompetenzen-fuer-industrie-4-0-qualifizierungsbedarfe-und-loesungsansaetze/> [Stand: 16.09.2019].

acatech 2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Smart Service Welt 2018: Wo stehen wir? Wohin gehen wir?*, 2018.

https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/06/SSW_2018.pdf [Stand: 16.09.2019].

BDVA 2017

Big Data Value Association (Hrsg.): *BDV SRIA. European Big Data Value Strategic Research and Innovation Agenda*, 2017.

http://www.bdva.eu/sites/default/files/BDVA_SRIA_v4_Ed1.1.pdf [Stand: 16.09.2019].

BDVA/euRobotics 2019

Big Data Value Association/euRobotics (Hrsg.): *Strategic Research, Innovation and Deployment Agenda for an AI PPP. A focal point for collaboration on Artificial Intelligence, Data and Robotics*, 2019.

<http://www.bdva.eu/sites/default/files/AI%20PPP%20SRIDA-Consultation%20Version-June%202019%20-%20Online%20version.pdf> [Stand: 16.09.2019].

Burmeister et al. 2016

Burmeister, C./Lüttgens, D./Piller, F. T.: „Business Model Innovation for Industrie 4.0: Why the ‘Industrial Internet’ Mandates a New Perspective on Innovation.“ In: *Die Unternehmung*, 72:2, 2016, S. 124–152.

Fabry et al. 2018

Fabry, H./Feige, B./Piller, F. T./Lüttgens, D.: „Bewertung von Geschäftsmodellinnovation auf Basis der Unternehmensstrategie.“ In: Gausemeier, J./Bauer, W./Dumitrescu, R. (Hrsg.): *Vorausschau und Technologieplanung*, Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn 2018, S. 161–181.

Fay et al. 2019

Fay, A./Vogel-Heuser, B./Bosse, H./Eichstädt, S./Sommer, K.-D.: *Künstliche Intelligenz und autonome Systeme: 10 offene Fragen*, 2019.

<https://www.vdi.de/news/detail/ki-und-autonome-systeme-10-offene-fragen> [Stand: 16.09.2019].

Forschungsbeirat et al. 2018

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/Abramovici, M. (Hrsg.): *Engineering smarter Produkte und Services*, 2018.

https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-fb-smart.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 05.07.2019].

Forschungsbeirat/acatech 2019a

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Akzeptanz von Industrie 4.0*, 2019.

<https://www.acatech.de/publikation/akzeptanz-und-attraktivitaet-in-der-industriearbeit-4-0/> [Stand: 17.09.2019].

Forschungsbeirat/acatech 2019b

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Schneller zum Markterfolg. Memorandum des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 für ein agileres und flexibleres Innovationssystem in Deutschland*, 2019.

<https://www.acatech.de/Publikation/memorandum-des-forschungsbeirats/> [Stand: 05.07.2019].

fortiss 2016

fortiss GmbH (Hrsg.): *Digitale Transformation. Wie Informations- und Kommunikationstechnologie etablierte Branchen grundlegend verändern. Der Reifegrad von Automobilindustrie, Maschinenbau und Logistik im internationalen Vergleich*, 2016.

http://business-services.heise.de/fileadmin/images/Specials/Fortiss_Studie_2016/studie_digitale_transformation_komplett.pdf [Stand: 16.09.2019].

IDSAs 2019

International Data Spaces Association (Hrsg.): *About the International Data Spaces Association*.

<https://www.internationaldataspaces.org/> [Stand: 16.09.2019].

Kagermann et al. 2016

Kagermann, H./Anderl, R./Gausemeier, J./Schuh, G./Wahlster, W. (Hrsg.): *Industrie 4.0 im globalen Kontext: Strategien der Zusammenarbeit mit internationalen Partnern* (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag 2016.

Meier/Uhlmann 2017

Meier, H./Uhlmann, E. (Hrsg.): *Industrielle Produkt-Service Systeme – Entwicklung, Betrieb und Management*, Berlin: Springer Vieweg 2017.

Negri et al. 2017

Negri, E./Fumagalli, L./Macchi, M.: „A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems.“
In: *Procedia Manufacturing* 11, 2017, S. 939–948.

Picot et al. 2014

Picot, A./Eberspächer, J./Grove, N./Hipp, C./Jänig, J.-R./Kellerer, W./Wiemann, B. (Hrsg.): *Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) als Treiber für die Konvergenz Intelligenter Infrastrukturen und Netze – Analyse des FuE-Bedarfs*, 2014.

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/Intelligente-Vernetzung/informations-und-kommunikationstechnologien-als-treiber-fuer-die-konvergenz.html> [Stand: 05.07.2019].

Plattform Industrie 4.0 2019

Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.): *Landkarte Industrie 4.0*.
<https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/karte-anwendungsbeispiele-formular.html> [Stand: 16.09.2019].

Spitz 2017

Spitz, M.: *Daten – das Öl des 21. Jahrhunderts?: Nachhaltigkeit im digitalen Zeitalter*, Hamburg: Hoffmann und Campe 2017.

Stark/Damerau 2019

Stark R./Damerau T.: „Digital Twin.“ In: The International Academy for Production Engineering/Chatti S./Tolio T. (Hrsg.): *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2019.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1
[Stand: 07.08.2019].

VDI/VDE 2016

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): *Digitale Chancen und Bedrohungen – Geschäftsmodelle für Industrie 4.0 (Statusreport)*, Düsseldorf: VDI-Verlag 2016.

Beteiligte Expertinnen und Experten

Mitglieder des Forschungsbeirats

Vertreterinnen und Vertreter der Wissenschaft

Prof. Reiner Anderl, Technische Universität Darmstadt
 Prof. Thomas Bauernhansl, Universität Stuttgart/Fraunhofer IPA
 Prof. Manfred Broy, Technische Universität München
 Prof. Angelika Bullinger-Hoffmann, Technische Universität Chemnitz
 Prof. Claudia Eckert, Technische Universität München/Fraunhofer AISEC
 Prof. Ulrich Epple, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
 Prof. Alexander Fay, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
 Prof. Jürgen Gausemeier, Universität Paderborn
 Prof. Hartmut Hirsch-Kreinsen, Technische Universität Dortmund
 Prof. Gerrit Hornung, Universität Kassel
 Prof. Gisela Lanza, Karlsruher Institut für Technologie
 Prof. Peter Liggesmeyer, Technische Universität Kaiserslautern/Fraunhofer IESE
 Prof. Wolfgang Nebel, Universität Oldenburg/OFFIS
 Prof. Sabine Pfeiffer, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
 Prof. Frank Piller, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
 Prof. Thomas Schildhauer, Alexander von Humboldt Institut für Internet und Gesellschaft/Institute of Electronic Business
 Prof. Rainer Stark, Technische Universität Berlin/Fraunhofer IPK
 Prof. Michael ten Hompel, Technische Universität Dortmund/Fraunhofer IML
 Prof. Wolfgang Wahlster, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

Vertreterinnen und Vertreter der Industrie

Klaus Bauer, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG
 Wilfried Bauer, T-Systems International GmbH
 Jackson Bond, Relayr GmbH
 Stefan-Maria Creutz, BIZERBA SE & Co. KG
 Dr. Jan-Henning Fabian, ABB AG
 Andreas Fehring, Airbus Operations GmbH
 Dr. Ursula Frank, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG
 Dietmar Goericke, Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e.V.
 Sven Hamann, Robert Bosch GmbH
 Dr. Uwe Kubach, SAP SE
 Prof. Peter Post, Festo AG & Co. KG
 Dr. Harald Schöning, Software AG
 Dr. Georg von Wichert, Siemens AG

