

FORSCHUNGSBEIRAT



2. überarbeitete Fassung

Themenfelder Industrie 4.0

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0

Empfohlene Zitierweise:

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Themenfelder Industrie 4.0 – Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0*, 2. überarbeitete Fassung, 2022.
DOI: 10.48669/fb40_2022-04

Impressum

Herausgeber

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 /
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

Projektbüro

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München

Autoren

Prof. Hartmut Hirsch-Kreinsen, TU Dortmund
Dr. Uwe Kubach, SAP SE
Prof. Rainer Stark, TU Berlin
Dr. Georg von Wichert, Siemens AG
Simon Litsche, acatech
Dr. Joachim Sedlmeir, acatech
Dr. Steffen Steglich, acatech

Beteiligte Expertinnen und Experten

Prof. Reiner Anderl, TU Darmstadt
Klaus Bauer, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG
Prof. Thomas Bauernhansl, Universität Stuttgart / Fraunhofer IPA
Prof. Angelika Bullinger-Hoffmann, TU Chemnitz
Dr. Jan-Henning Fabian, ABB AG
Dr. Ursula Frank, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG
Prof. Jürgen Gausemeier, Universität Paderborn
Prof. Gerrit Hornung, Universität Kassel
Prof. Gisela Lanza, KIT – Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Peter Liggesmeyer, TU Kaiserslautern / Fraunhofer IESE
Prof. Frank Piller, RWTH Aachen
Prof. Peter Post, Festo AG & Co. KG
Dr. Harald Schöning, Software AG
Prof. Michael ten Hompel, TU Dortmund / Fraunhofer IML

Redaktion und Lektorat

Karola Klatt, Berlin

Gestaltung und Produktion

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

Bildnachweis

© AdobeStock/j-mel

Stand

Juli 2022

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

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

Als **Sensor** von Entwicklungsströmungen beobachtet und bewertet der Forschungsbeirat die Leistungsprofilentwicklung von Industrie 4.0 und versteht sich als **Impulsgeber** für künftige Forschungsthemen und Begleiter beziehungsweise Berater zur Umsetzung von Industrie 4.0. Dabei konzentriert sich der Forschungsbeirat inhaltlich auf die folgenden **Themenfelder im Kontext von Industrie 4.0**, die in dieser Publikation – in der aktualisierten Version – vorgestellt werden:

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

Alle bisher erschienenen Publikationen des Forschungsbeirats stehen unter www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/ zur Verfügung.

Inhalt

Einleitung	3
1 Industrielle Wertschöpfung im Wandel.....	7
1.1 Wirtschaftlicher Wandel der Wertschöpfung.....	7
Plattformökonomie	7
Geschäftsnetzwerke und Ökosysteme.....	9
Zunehmende Komplexität, Interdisziplinarität und Autonomie von Produkten und Lösungen	10
Neue Geschäftsmodelle und Finanztechnologie	11
1.2 Ökologisch nachhaltige Wertschöpfung.....	13
Vertikale und horizontale Integration	13
Nachhaltigkeitsbewertung	13
Erneuerbare Energien.....	13
1.3 Soziale und faire nachhaltige Wertschöpfung	14
2 Perspektiven technologischer Entwicklungen	15
2.1 Nachhaltige, flexible, modulare Produktionssysteme und ihre Systemarchitekturen.....	15
2.2 Künstliche Intelligenz (Industrial AI) und Autonomie.....	17
2.3 Sensorik und Aktorik	18
2.4 Kommunikations- und Computingtechnologien	18
2.5 Souveräne Datenräume	19
2.6 Biologisierung in technischen Produkten und Systemen.....	20
3 Engineering von Industrie 4.0-Lösungen	22
3.1 Strategische Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen.....	23
3.2 Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen.....	23
3.3 Neue Methoden und Werkzeuge für die Industrie 4.0-Lösungsentwicklung.....	24
3.4 Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen	27
4 Arbeit, Unternehmen und Gesellschaft.....	29
4.1 Gestaltung rechtlicher Rahmenbedingungen.....	29
4.2 Kriterien menschenorientierter System- und Arbeitsgestaltung	30
4.3 Dringlichkeit von Kompetenzentwicklung und Qualifizierung.....	31
4.4 Organisationaler Wandel	32
4.5 Gesellschaftspolitischer Dialog.....	33
Zusammenfassung	34
Literatur	36
Mitglieder des Forschungsbeirats	39

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, Geschäftsbeziehungsweise Erlösmodellen, Wertschöpfungsnetzwerken bis hin zu dynamischen digitalen Ökosystemen hat das Potenzial, eine gesellschaftlich übergreifende Wirkung zu entfalten, die sich auch heute noch nicht vollständig erfassen lässt.

Es gilt, die technischen Befähiger von den eigentlichen Zielen der Industrie 4.0 – insbesondere die Bereitstellung kostengünstiger, individueller Einzelstücke in großer Anzahl durch eine flexible, selbstorganisierte Fertigung – zu differenzieren. Der Einsatz von cyber-physischen Systemen (CPS) und deren umfassende Vernetzung ist die technologische Grundlage dieses Wandels. Sie ermöglicht es, Zulieferung, Fertigung, Wartung, Auslieferung und Kundenservice miteinander zu verknüpfen und starre Wertschöpfungsketten in hochflexible, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke zu verwandeln.

Industrie 4.0 beschreibt eine neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfung – angefangen bei der Entwicklung neuer Ideen von Marktleistungen, über neuartige Produktions- und Fertigungslösungen bis hin zur Sammlung von Informationen über den gesamten Lebenszyklus hinweg, auf deren Basis individualisierte Produkte sowie Produkt-Service-Systeme (PSS) anpassbar werden. Zum Beispiel lenken intelligente Komponenten, Maschinen und Systeme aktiv den Produktionsprozess. Geräte lösen selbständig Aktionen aus und legen die nächsten Arbeitsschritte fest. Mithilfe der entstehenden Datenmengen und mittels einer fortgeschrittenen Analyse sowie Künstlicher Intelligenz (KI) können die Prozesse in Echtzeit analysiert und optimiert werden. Kriterien sind beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit oder Ressourcenverbrauch. In technologischer Hinsicht ist daran neu, dass alle physischen Objekte oder PSS einen sogenannten digitalen Zwilling¹ bekommen. Darüber hinaus liegt der Fokus bei der Umsetzung von Industrie 4.0 in den weitreichenden Potenzialen zur Konzeption und Umsetzung von innovativen Geschäftsmodellen sowie im Kontext der Nachhaltigkeit unter anderem in der Verwirklichung der Kreislaufwirtschaft.

Status quo zu Industrie 4.0

Seit dem Start des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 im Jahr 2010 konnten Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam große Erfolge erzielen.² Viele Unternehmen haben durch Ausbau der Digitalisierung die Voraussetzungen für Industrie 4.0 geschaffen und Teilaspekte von Industrie 4.0 gut umgesetzt. Dazu gehört zum Beispiel die datentechnische Integration über verschiedene Ebenen hinweg. Dennoch ist die flächendeckende Implementierung von Industrie 4.0 noch nicht hinreichend in der deutschen Industrie verankert. Außerdem geht die zentrale Idee von Industrie 4.0 über den Einsatz notwendiger Technologien hinaus. Vielmehr werden in weiten Bereichen der Industrie disruptive Potenziale erwartet. Dazu gehört die Erzeugung kundenindividueller Produkte oder Dienstleistungen zu den Kosten einer Massenproduktion in digitalen Ökosystemen über innovative, datengetriebene und plattformbasierte Geschäftsmodelle. Mit Blick auf die geförderten Industrie 4.0-Forschungsaktivitäten lässt sich gleichzeitig feststellen, dass trotz der bisher hohen Forschungsdynamik noch zusätzliche Maßnahmen und Initiativen mit verschiedenen Themenschwerpunkten notwendig sind, um Industrie 4.0 weiter zu untersuchen und vollumfänglich in der Praxis zu implementieren.³ Das große Engagement und die Verknüpfung von Wissenschaft und Wirtschaft in diesem Bereich müssen weiterhin gefördert und forciert werden. Hebelwirkungen für Innovationspotenziale in der Verbundforschung setzen große Anreize für Wirtschaftsunternehmen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), sich an Forschungs- und Entwicklungskooperationen zu beteiligen. Außerdem bietet die Nutzung von Industrie 4.0 zunehmend sichtbar einen unternehmensstrategischen Vorteil im nationalen und globalen Wettbewerb.

Industrie 4.0 ist Schlüssel für die systematische Sicherung und Weiterentwicklung der Wertschöpfung in Deutschland und kann damit entscheidend zur Überwindung der gesellschaftspolitischen Herausforderungen unserer Zeit beitragen. Die Bedeutung von Industrie 4.0 hat sich in den letzten Jahren seit der ersten Veröffentlichung der „Themenfelder Industrie 4.0“ im September 2019, insbesondere vor dem Hintergrund nationaler und globaler Einflüsse auf das Wirtschaftssystem, weiter verstärkt. Der deutlich gestiegene Handlungsdruck durch die öffentlich verstärkt diskutierte Klimakrise macht

1 In der nachfolgenden Zusammenstellung des Forschungsbedarfs zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0 orientieren wir uns an der Definition von Stark/Damrau (2019): „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.“ Zentrales Merkmal dabei ist, dass ein real existierendes Produkt, ein Maschine oder ein Service mit seinem beziehungsweise ihrem ursprünglichem digitalen Mastermodell oder digitalen Prototypen über IoT Daten (dem digitalen Schatten) miteinander in Beziehung gesetzt werden – das ist der eigentliche „Twinning-Aspekt“.

2 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2021a.

3 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2021b.

Innovationen im Kontext der Nachhaltigkeit in der Entstehung von Produkten und Services sowie über den gesamten Lebenszyklus hinweg unabdingbar. Die Corona-Pandemie, der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine und die Knappheit wichtiger Ressourcen haben die Verletzlichkeit der Wertschöpfungsketten und -netzwerke aufgezeigt. Die technologische Souveränität des deutschen Wirtschaftsstandorts droht zunehmend im internationalen Wettbewerb verloren zu gehen. Zudem sind innerhalb der sich entwickelnden dynamischen digitalen Ökosysteme Fragen der Interoperabilität über einheitliche Routinen, Standards und Normen zur Sicherstellung des multilateralen Datenaustauschs und zu Generierung hoch skalierbarer Lösungen zu beantworten. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass zukünftige Forschungsaktivitäten zu Industrie 4.0 und deren Implementierung in der Praxis verstärkt von strategischer Bedeutung sind.

Blick in die Zukunft

Die großen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit verlangen einen umfassenden Umbau der Wertschöpfung mithilfe von Industrie 4.0. Die Themen Nachhaltigkeit, Resilienz, Interoperabilität und technologische Souveränität rücken noch stärker in den Fokus der Forschung zu Industrie 4.0. Ziel der Forschung muss es sein, die Voraussetzungen zu schaffen, damit die Potenziale zur Verwirklichung dieser strategischen Ziele von Industrie 4.0 vollständig gehoben werden können.

Der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 geht von einem umfassenden Verständnis der Nachhaltigkeit aus. Nachhaltigkeit wird durch die gleichzeitige Umsetzung ökologischer, ökonomischer und sozialer Ziele erlangt. Diese drei Säulen stehen gleichberechtigt nebeneinander. Für die ganzheitliche Verwirklichung von Nachhaltigkeit ist es daher notwendig, auch die Wechselwirkungen dieser Säulen zu beachten. Dabei sollte nicht eine Säule zu Ungunsten der anderen teiloptimiert werden. Hier besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Rahmen von Industrie 4.0. So kann die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit mithilfe der Digitalisierung vorgebracht werden und zu einer Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz sowie der Emissionsverringerung beitragen. Zudem wird Industrie 4.0 die Grundlagen einer klimafreundlichen Kreislaufwirtschaft schaffen. In sozialer Hinsicht wird die Digitalisierung der Arbeit neue Anforderungen an die Aus- und Fortbildung von Fach- und Führungskräften sowie an die organisationalen und globalen Rahmenbedingungen stellen – insbesondere auch vor dem Hintergrund neuer Formen der Zusammenarbeit zwischen Menschen und Maschinen. Diesen Anforderungen muss mit entsprechenden Bildungsangeboten begegnet werden. Diese ökologischen und sozialen Aspekte können nur erreicht werden, wenn sie mit der ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit zusammenspielen. Ziel muss hier sein, im Sinne der internationalen Wettbewerbsfähigkeit Konzepte, Methoden und Infrastrukturen für eine erfolgreiche Daten- und Plattformökonomie zu entwickeln und KI für innovative Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 einzusetzen. Bewährt hat sich hier die vorwettbewerbliche Förderung durch Forschungs- und Transferverbundprogramme.

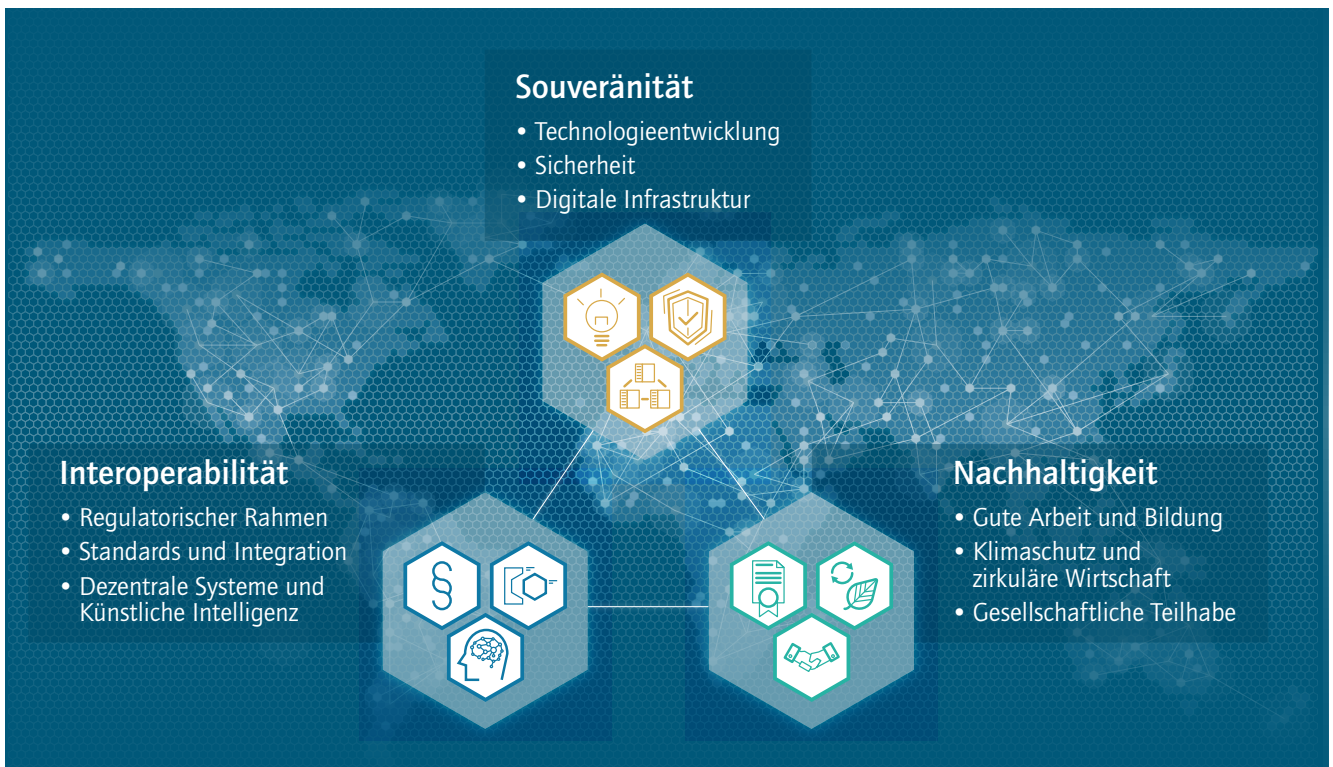
So lässt sich im internationalen Wettbewerb die Vorreiterrolle der deutschen Industrie auf dem vernetzten Weltmarkt halten oder gar ausbauen. Technologische Exzellenz und gesellschaftspolitische Ziele können damit gleichermaßen erreicht und gestärkt werden.

Neben Aspekten der Nachhaltigkeit rücken die Resilienz von Wertschöpfungsnetzwerken, aber auch die technologische Souveränität in Industrie 4.0 stärker in den Fokus zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarfe. Insbesondere die Corona-Pandemie und der Krieg in der Ukraine haben die Bedeutung und Notwendigkeit resilienter Wertschöpfungsnetze deutlich hervorgehoben. Die Voraussetzungen für die Sicherstellung der Datensouveränität und gleichzeitig das Verringern der Abhängigkeit von sogenannten Hyperscalern (zum Beispiel Google, Microsoft, Amazon) liegen in der wissenschaftsbasierten und proaktiven Gestaltung von (internationalen) souveränen Datenräumen. Sie bilden die Basis für den Austausch von Daten nach dem europäischen Rechts- und Wertesystem zum Zweck der Realisierung datengetriebener und skalierbarer Geschäftsmodelle. Um Interoperabilität und damit den multilateralen Datenaustausch zu ermöglichen, sind außerdem Normierungs- und Zertifizierungsprozesse sowie eine angemessene IT-Security für Industrie 4.0 notwendig.

Die zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe machen deutlich, wie weit die Wertschöpfung in Industrie 4.0 in zentrale gesellschaftliche Debatten und politische Fragestellungen hineinreicht. Industrie 4.0 stellt ein Rückgrat für Innovationen dar. Angegangen werden müssen sowohl Themen der Integration (zum Beispiel Datenräume und KI in Industrie 4.0 unter Berücksichtigung von Nachvollziehbarkeit, Vertrauenswürdigkeit und Ethik) als auch Anwendungsthemen (zum Beispiel nachhaltige, CO₂-neutrale Produktion durch Industrie 4.0). Damit werden Forschung und Entwicklung in diesem Bereich zur entscheidenden Stellschraube, um Lösungen für die transformatorischen Herausforderungen unserer Zeit zielgerecht in die Praxis zu überführen. Die Digitalisierung der Industrie ist die entscheidende Voraussetzung dafür, aus der Vielfalt allgemeiner aktueller Forschungen Innovationen zu schaffen und dabei konkrete Anwendungen und deren Zwecke für die Menschen aufzuzeigen.

Industrie 4.0 kann somit als international anerkannter Maßstab und Marke für die Digitalisierung in der Industrie weiter gestärkt werden, damit die vierte industrielle Revolution von Deutschland ausgehend weltweit erfolgreich umgesetzt wird. Die synergetische Kooperation zwischen Wissenschaft, Gewerkschaft, Politik und Wirtschaft einschließlich der Verbände BDI, BITKOM, VDMA und ZVEI hat mit der Plattform Industrie 4.0 ein herausragendes Umfeld ermöglicht. Mit dem Leitbild 2030 hat die Plattform Industrie 4.0 einen ganzheitlichen Ansatz zur Gestaltung offener digitaler Ökosysteme formuliert, die durch Vielfalt, Pluralität und faire Wettbewerbsbedingungen für alle Beteiligten gekennzeichnet sind.⁴ Eckpfeiler der zukünftigen europäischen Industriegesellschaft sind die Beibehaltung der unternehmerischen Freiheit, die Daten- und Informationssicherheit sowie der Schutz der Persönlichkeitsrechte.

Abbildung 1: Leitbild 2030 der Plattform Industrie 4.0



Quelle: Plattform Industrie 4.0 2019a

Zur erfolgreichen Umsetzung dieses Leitbilds formulierte die Plattform Industrie 4.0 vor dem Hintergrund der durch Heterogenität, Diversität und Spezialisierung geprägten deutschen Industrie drei miteinander verknüpfte, strategische Handlungsfelder: Souveränität, Interoperabilität und Nachhaltigkeit.⁵ Diese Handlungsfelder werden durch Unterpunkte konkretisiert und stehen im Einklang mit einer dezentralen Strategie offener, flexibler Ökosysteme und der Gestaltung der digitalen Ökonomie nach den Werten einer freien und sozialen Marktwirtschaft.⁶

Der Forschungsbeirat unterstützt das Leitbild 2030 ausdrücklich. Die in den folgenden Themenfeldern beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe beziehen sich deshalb explizit auch auf die strategischen Handlungsfelder des Leitbilds und sollen so zu deren Verwirklichung beziehungsweise Umsetzung einen wichtigen Beitrag leisten. Diese inhaltlichen Bezüge werden außerdem in den einleitenden Ausführungen der folgenden Kapitel zu den jeweiligen Themenfeldern spezifiziert.

Darüber hinaus adressieren die Themenfelder Industrie 4.0 auch die zentralen Fragen und Themenkomplexe des Programms „Zukunft der Wertschöpfung“⁷ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Dieses Programm zielt darauf ab, die Grundlagen für zukunftsfähige Produkte, hochwertige Produktion,

kundennahe Dienstleistungen und Arbeit von hoher Qualität zu sichern. Die darin eingenommenen Perspektiven der Forschung zur Wertschöpfung (Dynamik von Wertschöpfungssystemen, Menschen in der Wertschöpfung, Geschäftsmodelle und Nutzenversprechen, Ressourcen, soziotechnische und methodische Innovationen sowie Vernetzung und Kollaboration) werden ebenso in den Themenfeldern Industrie 4.0 des Forschungsbeirats aufgegriffen.

Zielsetzung und Struktur der Publikation

Vor diesem Hintergrund und mit Blick in die Zukunft wird deutlich, dass Industrie 4.0 noch längst nicht abgeschlossen ist. Es bedarf fundierter Analysen, die sowohl den Status quo als auch bestehende Defizite sowie Entwicklungschancen und -risiken kenntlich machen, um den Wandel der Industrie gezielt und erfolgreich zu gestalten. Dazu ist eine gemeinsame Anstrengung der Stakeholder aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft erforderlich. Der Forschungsbeirat hat das Ziel, hier einen entscheidenden Beitrag zu leisten. Er berät als strategisches und unabhängiges Gremium die Plattform Industrie 4.0, ihre Arbeitsgruppen und die beteiligten Bundesministerien, insbesondere das BMBF. Zu seinen Aufgaben gehört es, zukünftige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zum Thema Industrie 4.0 frühzeitig zu erkennen und Handlungsoptionen aufzuzeigen. So können diese dazu beitragen, die

5 Vgl. Plattform Industrie 4.0 2019b, S. 3.

6 Vgl. ebd.

7 Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2021.

Produktions-, Dienstleistungs- und Arbeitsforschung frühzeitig miteinander zu verzahnen – ein Ziel, das auch das BMBF-Programm „Zukunft der Wertschöpfung“ verfolgt – und Orientierung für die Weiterentwicklung der Forschungsförderung des Bundes zu bieten.

Der Forschungsbeirat 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. Es handelt sich hier um eine Aktualisierung und Ergänzung von Themenfeldern, die durch den Forschungsbeirat erstmalig im Jahr 2019 veröffentlicht wurden. Diese Impulse richten sich an Politik, Forschungseinrichtungen sowie Unternehmen. Die vier Themenfelder, die in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert werden, sind:

1. Industrielle Wertschöpfung im Wandel
2. Perspektiven technologischer Entwicklungen
3. Engineering von Industrie 4.0-Lösungen
4. Arbeit, Unternehmen und Gesellschaft

Forschung und Entwicklung müssen weiterhin ihren Fokus auf Industrie 4.0 setzen, der nicht ausschließlich auf den Einsatz der dafür notwendigen Schlüsseltechnologien gerichtet ist. Neben den Potenzialen zur Optimierung bestehender Fertigungs-routinen und -prozesse bestehen auch durch die Fortentwicklung methodischer Ansätze Chancen für gezielte Implementierungen von Industrie 4.0. Dabei sind vollkommen neue Ansätze für datengetriebene Geschäftsmodelle, Plattformmärkte, Datenräume und digitale Ökosysteme zu berücksichtigen und zu entwerfen. Diese Veränderungen müssen stets mit der menschenorientierten Gestaltung der Industrie 4.0-Systeme sowie den entsprechenden rechtlichen beziehungsweise institutionellen Rahmenbedingungen einhergehen. Im Zentrum von Industrie 4.0 steht der Mensch. Seine Rolle ist es, zu gestalten und zu entscheiden. 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. So kann Industrie 4.0 den gesellschaftlichen Wandel nachhaltig gestalten und Wohlstand sichern.

1 Industrielle Wertschöpfung im Wandel

Die industrielle Wertschöpfung durchlebt gegenwärtig die größte Transformation in ihrer Geschichte. Dies liegt zum einen daran, dass sich in der jüngsten Vergangenheit zahlreiche technologische Randbedingungen grundlegend verändert haben, in dem sich mehrere Schlüsseltechnologien⁸, wie leistungsfähige Kommunikationsnetzwerke mit stets steigenden Übertragungsraten, Plattformen und Ökosysteme, KI, Internet der Dinge und Blockchain, fast gleichzeitig Bahn gebrochen haben. Dadurch wurden und werden die Digitalisierung und mit ihr ein wirtschaftlicher Wandel in vielen Industrien und Branchen in einer Geschwindigkeit vorangetrieben, die noch vor wenigen Jahren für viele von uns unvorstellbar war.

Zum anderen sind Themen wie Nachhaltigkeit, Resilienz und Fairness der industriellen Wertschöpfung viel stärker in den gesellschaftlichen Fokus gerückt. Der Druck auf die industrielle Wertschöpfung, sich auch in diese Richtung weiterzuentwickeln und so eine breite gesellschaftliche Akzeptanz für das digitalisierte, wirtschaftliche Handeln von Unternehmen sicherzustellen, hat immens zugenommen – unter anderem auch durch das Bestreben, den Wohlstand vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln.

Damit ist der Innovationsdruck auf Unternehmen enorm gewachsen. Es wird immer deutlicher, dass das heutige Kerngeschäft eines Unternehmens schon bald nicht mehr zukunftsfähig sein kann. Um am Markt bestehen und wachsen zu können, müssen die Unternehmen neue Wertschöpfungschancen außerhalb ihrer bestehenden Geschäftsmodelle und Kernkompetenzen erkennen und nutzen.

Daraus ergeben sich für die Industrie Forschungs- und Entwicklungsbedarfe, denen sie in Kooperation mit der Wissenschaft und mit Unterstützung der Politik schnellstmöglich nachgehen muss. Nachfolgend sind diese Forschungsbedarfe entlang der Dimensionen des wirtschaftlichen Wandels der Wertschöpfung, der ökologisch nachhaltigen Wertschöpfung sowie der sozialen und fairen nachhaltigen Wertschöpfung beschrieben.

Die im Themenfeld 1 „Industrielle Wertschöpfung im Wandel“ erfassten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe haben einen starken Bezug auf das Leitbild der Plattform Industrie 4.0 und tragen so auch zur Verwirklichung beziehungsweise Umsetzung dieses Leitbilds bei. Die im Rahmen dieses Themenfelds durch den Forschungsbeirat definierten Bedarfe zur Realisierung der Daten- und Plattformökonomie und zur Schaffung übergreifender Geschäftsnetzwerke und dynamischer digitaler Ökosysteme beziehen sich insbesondere auf die Handlungsfelder „Interoperabilität“ und „Souveränität“ des Leitbilds. Gleichermaßen korrespondieren die dargestellten Bedarfe zur Erreichung einer nachhaltigen Wertschöpfung über die vertikale und horizontale Integration sowie durch den

Einsatz erneuerbarer Energien, aber auch über die Beachtung ethischer Grundsätze für Wertschöpfungsnetzwerke im Kontext einer sozialen und fairen Wertschöpfung mit dem Handlungsfeld „Nachhaltigkeit“ des Leitbilds der Plattform Industrie 4.0.

1.1 Wirtschaftlicher Wandel der Wertschöpfung

Plattformökonomie, digitale Ökosysteme, Skalierung, Souveränität, Kompatibilität, Interoperabilität und Dezentralisierung, Kundenschnittstellen, Open Source-Lösungen, Transparenz und Sicherheit, Virtualisierung, Resilienz, Komplexität, Interdisziplinarität, Autonomie von Produkten und Lösungen, innovative Geschäfts- und Erlösmodelle, Einsatz neuer Finanztechnologien

Der wirtschaftliche Wandel der Wertschöpfung ist im Zeitalter von Digitalisierung und Industrie 4.0 wesentlich durch das Aufkommen der Plattformökonomie, durch die wachsende Bedeutung von Geschäftsnetzwerken und Ökosystemen sowie durch die zunehmende Komplexität von Produkten beziehungsweise PSS⁹ und Lösungen im Kontext der sogenannten Servitisierung geprägt. Dieser Begriff bezeichnet einen ökonomischen Paradigmenwechsel, bei dem die Entwicklung weg vom Herstellen eines Produkts, das durch den Verkauf in Eigentum übergeht, hin zum Angebot einer Dienstleistung geht.

Plattformökonomie

Mit dem Aufkommen der Plattformökonomie hat sich das wirtschaftliche Umfeld für viele Unternehmen grundlegend verändert. Zunächst betraf dies überwiegend Unternehmen, die auf private Kundinnen und Kunden fokussiert sind (Business-to-Consumer, kurz: B2C), zum Beispiel im Handel, bei der Hotelbuchung oder bei Fahrdienstleistungen. Inzwischen entstehen aber auch im Geschäftskundenbereich (Business-to-Business, kurz: B2B) mehr und mehr Plattformen, beispielsweise für die Beschaffung, in der Logistik (zum Beispiel Silicon Economy) und in der Fertigung (zum Beispiel MindSphere). Zudem dringen etablierte und dominierende Cloud- und Plattformunternehmen (sogenannte Hyperscaler), insbesondere aus den USA und China, über die Hebung von Skalierungspotenzialen mit datenbasiertem Konsumentenwissen weiter vom B2C- in den B2B-Bereich vor.

Entscheidend für den Erfolg einer Plattform sind sehr häufig die Skalierbarkeit sowie die direkten und indirekten Netzeffekte. Plattformen haben die entscheidende Funktion, verschiedenste Stakeholder zusammenzubringen, die andernfalls nicht beziehungsweise nur mit erhöhtem Aufwand in Kontakt treten können. Der Wert

⁸ Themenfeld 2 dieser Publikation fokussiert die technologischen Wegbereiter im Kontext von Industrie 4.0.

⁹ Vgl. Meier/Uhlmann 2017.

einer Plattform steigt mit der Zahl der darüber interagierenden Personen, Firmen oder Institutionen sowie mit dem Volumen und der Qualität von Daten, Informationen und Wissen, die darüber bereitgestellt werden. Für Plattformbetreiber im industriellen Umfeld heißt das, dass sie die digitalen Plattformen attraktiv machen müssen, indem sie beispielsweise bestimmte Basisdienste, Komponenten oder Module kostenlos anbieten und für eine Weiterentwicklung freigeben. Insbesondere in Bereichen wie dem Entwurf von Hardware oder in der Softwareentwicklung geht dies mit einer steigenden Bedeutung von Open Source-Entwicklungen einher.

Eine weitere Herausforderung für die Betreiber im Geschäftskundenbereich ist das Schaffen von Akzeptanz und Vertrauen zwischen allen Stakeholdern der Plattform untereinander. Während im privaten Bereich Sternebewertungen und Rezensionen ausreichende Mittel sind, müssen für die deutlich komplexeren, geschäftlichen Beziehungen weitreichendere Mittel genutzt und zum Teil noch gefunden werden, zum Beispiel beim gemeinsamen Zugriff auf vertrauliche Informationen.

In plattformzentrierten Ökosystemen gilt zudem die Kundenschnittstelle als zentrale Schlüsselposition, durch die Kundinnen und Kunden Zugang zu einem im gesamten Wertschöpfungsnetzwerk von den verschiedenen interagierenden Akteurinnen und Akteuren erstellten Leistungsangebot erhalten und dafür bezahlen. Während Interessierte 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.¹⁰ So existiert für klassische Produzenten wie Fahrzeughersteller (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, Möglichkeiten der Aufrechterhaltung des Kontakts zu (potenziellen) Kundinnen und Kunden zu eruieren.

Viele Plattformteilnehmer befürchten zudem in Abhängigkeit von einer großen, breit etablierten Plattform zu geraten. Diese Abhängigkeit wird mit dem Begriff „Vendor Lock-in“ beschrieben. Die Interoperabilität zwischen verschiedenen Plattformen und deren Dezentralisierung werden deshalb immer wichtiger.

Dabei geht die gewünschte Interoperabilität weit über die Existenz von Schnittstellen hinaus und umfasst beispielweise die Möglichkeit, eine virtuelle Entität, die auf einer Plattform erworben wurde, uneingeschränkt auf anderen Plattformen zu verwenden.

Viele der damit einhergehenden Fragestellungen werden derzeit unter Schlagwörtern wie „Web3“ und „Metaverse“ diskutiert. Im Projekt Gaia-X zum Aufbau einer leistungs- und wettbewerbsfähigen,

sicheren und vertrauenswürdigen Dateninfrastruktur für Europa wird bereits heute an einer Dezentralisierung von Cloud-Infrastrukturen und Datenräumen gearbeitet.¹¹

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Charakteristiken und Potenziale** der Plattformökonomie hinsichtlich ihrer spezifischen (**ökonomischen, sozialen, institutionellen**) Chancen und Risiken
- Strategien und Ansätze zur **Interoperabilität** und **Dezentralisierung** von Plattformen – insbesondere im Hinblick auf **kompatible physische Komponenten** und die Spezifikation von Konzepten zur Gewährleistung des **sicheren und zuverlässigen Daten-** beziehungsweise **Informationsaustauschs** zwischen ihnen
- Entwicklung von **Architekturen** für digitale Plattformen, die **geltende Rahmenbedingungen** und **Standards** für **Schnittstellen** und **Prozesse** berücksichtigen sowie **Offenheit** und **Interoperabilität** gewährleisten und an **bestehende Initiativen** und **Aktivitäten** (zum Beispiel Gaia-X) **anknüpfen**
- Mechanismen zum Schaffen von **Vertrauen** zwischen Plattformteilnehmern
- Mechanismen zur **Datensicherheit** und zum **Datenschutz** beim **Betrieb von digitalen Plattformen**
- Konzepte zur **Sicherung des direkten Kundenkontakts** und für **offene Kundenschnittstellen**, etwa durch **virtuelle Geschäftsmodelle** und **Vertriebskanäle** – insbesondere für KMU, die aufgrund begrenzter Ressourcen keine eigene Plattform aufbauen oder betreiben können
- Entwicklung von **Alternativen zu proprietären, unternehmensabhängigen digitalen Plattformen**
- **Quantifizierung** der **Kosten** und des **Nutzens** aus **Unternehmenssicht** beim Einsatz **digitaler Plattformen**
- **Abbau** von **Hemmnissen** beim Einsatz von digitalen Plattformen sowie die **Darstellung des wirtschaftlichen Nutzens**
- **Auswahl** und **Identifikation** von **Anwendungsfällen** innerhalb eines **plattformzentrierten Ökosystems**
- Ansätze zur Konzipierung und Implementierung neuer **Geschäftsmodelle** mit innovativen Möglichkeiten der Erlös- und Ertragsgenerierung über die **Kombination** von **Open Source** und **Industrie 4.0**

¹⁰ Vgl. fortiss 2016.

¹¹ Vgl. Bonfiglio 2021.

Geschäftsnetzwerke und Ökosysteme

Seit geraumer Zeit agieren Unternehmen nicht mehr als Glied in einer starren Wertschöpfungskette, sondern als Teil komplexer, dynamischer, modular (re-)konfigurierbarer Wertschöpfungsnetzwerke, innerhalb derer sie idealerweise in Echtzeit mit ihren weltweit vernetzten Geschäftspartnern symbiotisch interagieren und sich gegenseitig eine weitreichende Transparenz zugestehen. Besonders die Gestaltung und Steuerung von unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsnetzwerken, die unter dem Begriff „Cloud Manufacturing“ diskutiert werden, bieten enorme Potenziale für Effizienzsteigerung. Die Basis bilden dabei digitale Plattformen, entlang derer sich flexible, digitale Ökosysteme entwickeln. Mit Catena-X¹² entsteht derzeit ein solches Netzwerk im Automobilssektor. Bis 2025 sollen darin mehr als 1.200 Partner interagieren. Zusätzlich zu ihrem Geschäftsnetzwerk sind Unternehmen in der Regel Teil eines erweiterten Ökosystems, das über die reinen Geschäftspartner hinausgeht und zusätzliche Partner, andere Unternehmen, Verbände, Personen aus der Politik etc. beinhaltet.¹³

Um die notwendige Transparenz innerhalb der komplexen Wertschöpfungsgeflechte eines Netzwerks oder Ökosystems zu schaffen und gleichzeitig sicherzustellen, dass ein Mitglied die volle Souveränität über die eigenen Daten behält, bedarf es der Entwicklung sicherer, gemeinsamer Datenräume. Als Orientierungsgrundlage für adäquate Lösungen im industriellen Bereich können bereits vorangetriebene Vorhaben oder Initiativen dienen, beispielsweise der dezentrale, offene Mobility Data Space (MDS) im Mobilitätsbereich. Entsprechende Aktivitäten zur Erreichung eines Datenraums Industrie 4.0 wurden seitens der Plattform Industrie 4.0 bereits angestoßen (siehe [Kapitel 2.5](#)). Über die Konzipierung der sogenannten Verwaltungsschale (Asset Administration Shell) hat die Plattform Industrie 4.0 zudem einen umfangreichen Standard zur Interoperabilität von Industrie 4.0-Komponenten auf virtueller, digitaler Ebene geschaffen.¹⁴

Wichtige Objekte, insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau, die in solchen Datenräumen geteilt werden können, sind digitale Zwillinge, also virtuelle Abbilder realer Gegenstände oder Systeme, die den tatsächlichen Zustand des Gegenstands oder Systems möglichst zeit- und realitätsnah widerspiegeln. Umgekehrt sollen Änderungen am Abbild möglichst schnell den Zustand des Objekts oder Systems ändern. So haben alle Teilnehmer des Netzwerks eine gemeinsame Sicht auf den Zustand der für sie relevanten Systeme. Digitale Zwillinge dienen somit nicht nur der Simulation realer (Fertigungs-)Prozesse, sondern auch als Bezugsort für die Zuordnung von erfassten Daten. Als Treiber der horizontalen Integration über Unternehmensgrenzen hinweg sind sie daher für Veränderungen von Wertschöpfungsprozessen grundlegend. Mit der Industrial

Digital Twin Association (IDTA)¹⁵, einer gemeinnützigen Allianz verschiedener Akteure aus Industrie, Verbänden und Forschung, wurde eine zentrale Initiative geschaffen, über vielschichtige Maßnahmen die Anwendung des digitalen Zwillings in der Praxis zu forcieren, die Technologieentwicklung voranzutreiben und auf Basis der Verwaltungsschale Open Source-Branchenstandards und somit Interoperabilität von Komponenten sicherzustellen. Während die Anpassung des digitalen Zwillings heute bereits möglich ist, erfolgt die Anlegung des Rückkanals vom digitalen Modell zum physischen Objekt bisher jedoch nur selten.

Aufgrund der hohen Dynamik und der gewünschten Geschwindigkeit, mit der Prozesse in Netzwerken abgewickelt werden sollen, wächst der Bedarf nach Automatisierung von Prozessschritten oder ganzen Prozessen. Für einfache, sich wiederholende Vorgänge werden inzwischen vielfach Software-Roboter eingesetzt (Robotic Process Automation, kurz: RPA). Der Wunsch nach Automatisierung geht jedoch deutlich weiter und beinhaltet auch Prozesse wie das automatische Verhandeln und Bieten, automatische Vertragsabschlüsse oder die Dokumentation von Geschäftsvorgängen, zum Beispiel mit einem elektronischen Frachtbrief. Hier kommt der Distributed Ledger Technologie (DLT), zum Beispiel Blockchain, eine zunehmende Bedeutung zu (siehe Abschnitt „neue Geschäftsmodelle und Finanztechnologie“ weiter unten).

Die Corona-Pandemie, der Angriff auf die Ukraine, Extremwetterereignisse und sonstige Störungen von globalen Lieferketten, wie die Blockade des Suezkanals durch das Containerschiff „Ever Given“ im März 2021, haben gezeigt, wie anfällig unsere heutigen Geschäftsnetzwerke sind und dass ihr Funktionieren durch unvorhergesehene Ereignisse empfindlich gestört werden kann. Daher stellt sich die Frage, wie solche Netzwerke resilienter gegen derartige Störungen gemacht werden können. Nach den Ausführungen der Expertise „Wertschöpfungsnetzwerke in Zeiten von Infektionskrisen“¹⁶ des Forschungsbeirats können vier Resilienztreiber unterschieden werden: das vorzeitige Erkennen einer Krise, die Vorbereitung auf die Krise, Transparenz innerhalb des Netzwerks und die Agilität, mit der auf eine Krise reagiert werden kann.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Wandlung** von Wertschöpfungsnetzwerken mit hohem Automatisierungsgrad der Standardprozesse hin zu **agilen Wertschöpfungsnetzwerken**
- **Definition** und Klärung von verschiedenen **Rollen** und Verantwortlichkeiten (regulatorisch und rechtlich) der in dynamischen digitalen Ökosystemen agierenden **Akteure**

12 Vgl. Catena-X 2022.

13 Vgl. Trapp et al. 2020.

14 Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2019c) für eine detaillierte Beschreibung der Verwaltungsschale.

15 Vgl. IDTA 2022.

16 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2021c, S. 16, Wieland/Wallenburg 2013, S. 303 f.

- **Entwicklung sicherer, gemeinsamer Datenräume** unter Wahrung der **Datensouveränität** für alle Teilnehmer (siehe auch [Kapitel 2.5](#))
- **Spannungsfeld** zwischen **Offenheit** und **Sicherheit** plattformbasierter Wertschöpfungsnetzwerke und Ökosysteme
- **Sensorik, Aktuatorik**, Modelle für **digitale Zwillinge** zur (echtzeitfähigen) **bidirektionalen Kopplung** von virtuellem Abbild und realer Entität in dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken und Berücksichtigung von **Safety-** und **Securityaspekten** vor dem Hintergrund **technologischer Unzulänglichkeiten** (zum Beispiel zu hohe Latenzzeiten, mangelnde Zuverlässigkeit der Verbindungen)
- **Sicherheits-** beziehungsweise **Zertifizierungskonzepte** für Wertschöpfungsnetzwerke mit **digitalem Zwilling**
- Steigerung der **Resilienz von Geschäfts-** beziehungsweise **Wertschöpfungsnetzwerken** durch
 - **KI-basierte Früherkennung von Störungen, Analyse der Auswirkungen und Erarbeitung von Handlungsalternativen**
 - Entwicklung von **zuverlässigen Modellen, digitalen Zwillingen** und **Control-Tower-Technologien**, die einen **zeitnahen Überblick** über die **Auswirkungen** von unvorhergesehenen Ereignissen auf Fertigung und **industrielle Produktion ermöglichen**
 - Entwicklung von Technologien zur **raschen Anpassung der Produktion von Waren und Dienstleistungen** an sich **ändernde äußere Bedingungen**, zur Verbesserung der **Widerstandsfähigkeit industrieller Systeme** gegenüber der Anfälligkeit von Wertschöpfungsketten und zur **nachhaltigen Gestaltung** des gesamten Produktionsprozesses, zum Beispiel durch **kontinuierliche Verbesserung**¹⁷
- Einsatz von **Verfahren der Quantenoptimierung** in der Planung von Liefernetzwerken
- **Erlös-/Ertragsverteilungsmechanismen im Ökosystem**

Zunehmende Komplexität, Interdisziplinarität und Autonomie von Produkten und Lösungen

Neben dem Umfeld der Unternehmen unterliegen auch die hergestellten Produkte einem starken Wandel. Immer seltener bestehen Produkte ausschließlich aus Hardware. Vielmehr sind sie in der Regel durch Firm- und Software angereichert, die entweder zur geräteinternen Steuerung und Bedienung genutzt werden oder extern Mehrwertdienste anbieten, beispielweise in Form von Apps für Endnutzende. Dienste lösen oftmals das physische Produkt als Kern der Leistungserstellung ab (Everything-as-a-Service, XaaS). So entstehen häufig komplexe Produkt-Service-Systeme, deren Entwicklung und Herstellung in der Regel interdisziplinär ist, wodurch sich eine starke Forderung nach mehr Durchgängigkeit der in den jeweiligen Disziplinen verwendeten Entwicklungswerkzeuge ergibt. Dem liegt ein holistisches Verständnis des Engineerings zugrunde, das nicht nur die reine Entwicklung von Produkten und Services umfasst, sondern ihre gesamten Lebenszyklen berücksichtigt.¹⁸ Die Lebenszyklen werden zudem durch Remanufacturing-Produkte noch verlängert. Remanufacturing kann, insbesondere in Verbindung mit Produkt-Service-Systemen, einen enormen Hebel für die wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit¹⁹ darstellen. Daneben können Produkte durch ein Remanufacturing auch an veränderte Kundenanforderungen angepasst werden.

Ferner ist es bereits möglich, Produkte zum Preis eines Massenprodukts zu individualisieren oder ihr endgültiges Aussehen später im Produktlebenszyklus festzulegen. Über Big Data und KI werden Einblicke in die Nutzungsgewohnheiten der Kundinnen und Kunden ermöglicht und auf Basis von Nutzungs- und Anwendungsdaten das individualisierte Leistungsangebot erstellt oder angepasst. Im Extremfall wird das Produkt erst auf Grundlage konkreter Kundenanforderungen entworfen („Engineer-to-Order“). Kaufinteressierte werden somit in die Leistungserstellung über Rückkopplung von Daten integriert. Damit steigen die Anforderungen an die Flexibilität der Entwicklungsprozesse.²⁰ Konzepte der agilen Entwicklung finden inzwischen weit über die Softwareentwicklung hinaus eine breite Anwendung.

Durch den Einsatz von KI-Verfahren werden viele Produkte zusätzlich in die Lage versetzt, autonom zu agieren und selbständig Entscheidungen zu treffen. Immer häufiger tun sie das nicht isoliert, sondern im Austausch mit anderen Produkten bis hin zur Kooperation in einem Schwarm von Produkten (Schwarmintelligenz). Um solche Systeme effizient zu trainieren, bedarf es neuer Lernverfahren.

17 Nutzung der MaaS-Vorteile, wenn die Perspektive des Wertschöpfungsnetzwerks betrachtet wird, bei der Produktionskapazitäten auf dynamische Weise zur Verfügung gestellt werden.

18 Vgl. Forschungsbeirat et al. 2018. Diese Studie des Forschungsbeirates hat verschiedene Forschungsbedarfe im Kontext des Engineerings kategorisiert. Solche Forschungslücken gilt es aufzugreifen und auf ein

durchgängiges Management des Engineerings in dynamischen Ökosystemen zu projizieren. Siehe dazu auch [Kapitel 3](#).

19 Zu den Aspekten der ökologisch nachhaltigen Wertschöpfung, siehe [Kapitel 1.2](#).

20 Siehe dazu auch [Kapitel 3](#) dieser Publikation zum Engineering von Industrie 4.0-Lösungen.

Mit der zunehmenden Erschließung sicherheitskritischer Anwendungsfelder (zum Beispiel autonome Fertigungs- und Logistikprozesse) steigen die Anforderungen an die Sicherheit und Korrektheit dieser Systeme und machen neue Verfahren zur Simulation und Beweisbarkeit von Sicherheit und Korrektheit erforderlich. Weitere Forschungsfragen in diesem Kontext ergeben sich aus dem Einsatz des Quantencomputings zur Steigerung der Sicherheit von Produkten und Systemen.

Forschungs- und 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**
- **Automatische, konfigurationsfreie Inbetriebnahme** von **PSS**
- **Durchgängigkeit** von Werkzeugen in agilen, interdisziplinären **Entwicklungsprozessen**, insbesondere bei der Herstellung von PSS über **Softwaretools** und **KI-basierte Systeme**
- Konzepte, Methoden und Werkzeuge, die unter Einsatz von **Big Data** und **KI** die automatische Erstellung von **hochindividualisierten PSS ermöglichen**
- Methodik zur stärkeren und automatisierten **Integration** der **Nutzenden** in die Leistungsbeschreibungen über **zurückgespielte Auswahl-, Nutzungs- und Anwendungsdaten**
- Methodik zur **Ausdifferenzierung** eines **nachhaltigen Kundennutzens**, insbesondere in dynamischen digitalen Wertschöpfungsnetzen, unter **Berücksichtigung** von **Ressourcen, Kompetenzen etc.** der **Partner** innerhalb dieser Netzwerke
- Verfahren zur **Steigerung** der **Anwendungsbereitschaft beziehungsweise Akzeptanz** **neuartiger Kundenlösungen**, unter anderem durch
 - Klärung offener Fragestellungen im Hinblick auf **Datensouveränität**
 - Berücksichtigung / Analyse der Auswirkungen der **Nutzerintegration** im Hinblick auf **Wettbewerbssicherung**
 - Schaffung **bedienungsfreundlicher Benutzeroberflächen** und **Interaktionsmöglichkeiten**
 - Berücksichtigung **sicherheits- und zuverlässigkeitsrelevanter Aspekte** im Kontext dieser Kundenlösungen
 - Entwicklung und Implementierung geeigneter **Anreiz- beziehungsweise Vergütungsmodelle**
- Konzipierung und Implementierung von Prozessen und Werkzeugen, die eine **Fertigung sehr kleiner Losgrößen zu ähnlichen Kosten** wie in der **Massenproduktion** erlauben – beispielsweise über die Linienintegration von additiven Verfahren
- **Materialprüfungs- und Zulassungsverfahren** für **kritische Produkte** in **kleiner Losgröße** (zum Beispiel individuell für einzelne Patientinnen und Patienten hergestellte Medikamente)
- **Wissensvermittlung** als **Dienstleistung**: Konzepte, Methoden und Werkzeuge zur **dienstleistungsbasierten Bereitstellung** von **Best Practices** zur **Wissensvermittlung** aus dem **Industrie 4.0-Kontext** auch in **andere Anwendungsbereiche** und **Domänen**
- **Lernverfahren** für **kollaborative Systeme**
- Verfahren zur **Simulation** und **Beweisbarkeit** von **Sicherheit** und **Korrektheit** in **KI-basierten (Wertschöpfungs-)Systemen**
- Auswirkungen des **Quantencomputings** auf die **Sicherheit (Security)** von **Produkten** und **Systemen**

Neue Geschäftsmodelle und Finanztechnologie

Ein wichtiger Aspekt der Wertschöpfung in Industrie 4.0 ist die Schaffung von Transparenz durch den Einsatz von Sensoren. So finden Sensoren an vielen Stellen Einzug in Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen und Infrastruktur und liefern Daten zum Zustand der Systeme oder zu relevanten Ereignissen in ihrer Umgebung.

Die von den Sensoren gelieferten Daten können die Grundlage für neue Geschäftsmodelle und Mehrwertdienste bilden – mit neuen Formen des Nutzenversprechens, Potenzialen zur flexiblen Erlösgenerierung über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg sowie dynamischen Wertschöpfungsarchitekturen. Dazu ist es erforderlich, die Prinzipien der Datenökonomie zu verstehen und anzuwenden.

Bereits etablierte Beispiele sind vorrausschauende Fernwartungsdienste für Investitionsgüter oder Fahrzeug-Tracking-Dienste für die Logistikbranche. In nutzungsbasierten Geschäftsmodellen („Pay-per-Use“) verkaufen Hersteller oder Zwischenhändler Maschinen nicht an ihre Endkunden, sondern behalten sie in ihrem Besitz. Sie stellen sie den Kunden für die Nutzung bereit und berechnen dafür eine nutzungsbasierte Gebühr, die auf Grundlage der von den Maschinen gelieferten Sensordaten bestimmt wird. So können die Maschinen von mehreren Kunden genutzt und dadurch besser ausgelastet werden („Sharing Economy“).

Datengetriebene Geschäftsmodelle entwickeln sich zunehmend zu wissensgetriebenen Modellen. Unternehmen haben jedoch noch häufig Schwierigkeiten, neue Leistungsangebote auf der Basis von datengetriebenen beziehungsweise plattformbasierten Geschäftsmodellen profitabel zu gestalten. Auch die aktuelle Markt- und

Umweltsituation (in Echtzeit) sowie akute Störungen finden noch kaum Berücksichtigung in der Bepreisung.

Daten sind allgemein zu einem Wirtschaftsgut geworden, das auch als Zahlungsmittel eingesetzt werden kann. Bisher findet eine direkte Kommerzialisierung dieser Daten jedoch noch nicht hinreichend statt – unter anderem da sowohl in der Wirtschaft als auch in der Öffentlichkeit der positive Wert von Daten nicht überall erkannt wird. Darüber hinaus stellt der unentgeltliche Austausch von Daten eine ebenso große Herausforderung dar, die es – auch über geeignete Anreizsysteme – anzugehen gilt.

Mit der zunehmenden Verwendung von Sensordaten in kritischen Geschäftsprozessen wachsen die Anforderungen an die Verlässlichkeit und Manipulationssicherheit dieser Daten. Eine weitere Herausforderung bei der Umsetzung datenbasierter Geschäftsmodelle ist der Mangel an sogenannten Data Scientists, die geeignete Modelle und Algorithmen zur Datenaufbereitung und Datenverarbeitung erstellen können. Hier könnten in Zukunft automatisierte Lernverfahren Abhilfe schaffen.

Ein weiterer wichtiger Innovationstreiber für Industrie 4.0 ist die neue Finanztechnologie, die größtenteils auf DLT, deren bekanntester Vertreter die Blockchain ist, basiert. Sie bildet unter anderem die Grundlage für Kryptowährungen, die einen bankenfremden Zahlungsverkehr ermöglichen. Darüber hinaus kann sie, wie bereits im Abschnitt zu den Geschäftsnetzwerken und Ökosystemen erläutert wurde, zur Dokumentation von Geschäftsvorgängen bis hin zu digitalen, automatisierten Vertragsabschlüssen dienen. Eine weitere Anwendung sind DLT-basierte Finanzierungsmodelle, die sehr bald für Pay-per-Use-Geschäftsmodelle eingesetzt werden könnten. Stellt ein Hersteller oder Händler seinen Kunden eine Maschine auf Grundlage eines Pay-per-Use-Modells zur Verfügung, muss er diese finanzieren. Dazu könnte er fälschungssichere, nicht kopierbare Tokens („Non-Fungible Token“, kurz: NFT) an Investoren verkaufen. Diese Tokens würden einen Anteil an der Maschine repräsentieren, der dem Investor einen entsprechenden Anteil am mit der Maschine erzielten Gewinn garantiert („Asset-as-a-Token“).²¹ Ferner können NFT genutzt werden, um ansonsten leicht kopierbare, digitale Güter zu Unikaten zu machen, was beispielsweise in der Kunst- und Modebranche zur Anwendung kommt. Im Jahr 2021 hat der Markt für NFT je nach Quelle bereits ein Volumen zwischen 25 und 41 Milliarden US-Dollar erreicht.²²

Grundlegende Herausforderungen im Bereich der neuen Finanztechnologien sind die Rechtsverbindlichkeit von DLT-basierten Geschäftsvorgängen und Vertragsabschlüssen (siehe auch [Kapitel 4](#)), die hohen Kosten und der hohe Energieeinsatz von Transaktionen, die mittels DLT durchgeführt werden, aber auch die Erreichung von Skalierbarkeit.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Erforschung **neuer Geschäftsfelder** und **Geschäftsmodelle**, die auf **mehreren vernetzten** und **kommunizierenden Produkten basieren**, wobei jedes Produkt selbst ein PSS darstellt – beispielsweise in übergreifenden, dynamischen Wertschöpfungsnetzen
- **Anreizsysteme** für **kollaborative Geschäftsmodelle**, die zur Konfiguration **flexibler Wertschöpfungsprozesse** Konzepte für den Aufbruch starrer Unternehmensgrenzen und Wertschöpfungsketten beinhalten
- Neuartige **Investitionsmodelle** (zum Beispiel Maschinenhersteller, Finanzierer, Maschinennutzer)
- Technologien und Modelle für **kollaboratives Produkt-Service-Engineering** und die **Fertigung**
- Sinnhafte, technisch machbare, kundenorientierte und nachhaltige Geschäftsmodelle für **hybride Leistungsbündel** mit **dynamisierten Komponenten**
- **Dynamische Erlösmodelle**, die auf Basis von **Algorithmen** eine **Monetarisierung** über den **gesamten Lebenszyklus** hinweg ermöglichen
- Entwicklung neuer **Preisgestaltungsansätze** für **digitale Wertangebote**
- Weiterentwicklung von **selbstlernenden Preisfestsetzungsalgorithmen**, die unter Einbezug von Daten aus heterogenen Quellen eine **ständige Anpassung** ermöglichen
- Aus **datenökonomischer** Sicht und unter Einhaltung **ethischer Grundsätze** gilt es Ansätze für Geschäftsbeziehungsweise Betreibermodelle zu eruiieren, die über eine **souveräne Erhebung, Speicherung, Verarbeitung, Analyse, Interpretation, Weitergabe** sowie den **selbstbestimmten Austausch, Handel** und die **Löschung** von **Daten** die Hebung von **Effizienz-, Optimierungs- und Differenzierungspotenzialen** ermöglichen
- Erforschung der Bildung des **Werts von Daten**, der sich in **Marktpreisen** abbildet
- Sicherstellung der **ökonomischen Handelbarkeit** und **Verwertbarkeit** von **Daten** unter Berücksichtigung von **datenschutz- und sicherheitsrechtlichen Rahmenbedingungen**
- Auswirkung von **Kryptowährungen** als Zahlungsmittel auf die Entwicklung und Implementierung neuer digitaler Geschäftsmodelle

21 Vgl. Sandner 2022.

22 Vgl. Bloomberg 2022, Heise Online 2022.

- Methode zur **Identifikation** von potenziellen **Nutzergruppen** von Daten sowie zur Eingrenzung eines **zulässigen Nutzerkreises**
- **Manipulations-** und **Fälschungssicherheit** sowie **automatisierte Lernverfahren** zur Verarbeitung von Sensordaten als Basis datengetriebener Geschäftsmodelle
- **Rechtsverbindlichkeit DLT-basierter Geschäftsvorgänge** und Vertragsabschlüsse (unter anderem in Bezug auf Haftung, Organisationsmodell und Geheimhaltungsbedürfnisse)
- Methoden und Konzepte zur **objektiven Bewertung** beziehungsweise **Überprüfung** der **Qualität, ökonomischen und ökologischen Sinnhaftigkeit, technischen Machbarkeit** sowie **rechtlichen Zulässigkeit** potenzieller **Smart Contracts** und **DLT-Use Cases**
- Konzepte und Methoden für eine **durchgängige (End-to-End)** und **automatisierte Erstellung** von **Smart Contracts** sowie deren **Management**
- **Energieeffiziente DLT** mit geringen Transaktionskosten, geringer Latenz und hoher Skalierbarkeit

1.2 Ökologisch nachhaltige Wertschöpfung

Vertikale und horizontale Integration, Ressourceneffizienz, Dematerialisierung, Verminderung von Treibhausgasemissionen, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeitsbewertung, Einsatz erneuerbarer Energien

Laut Umweltbundesamt war die Industrie 2020 für 7,9 Prozent der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich.²³ Hinzu kommen weitere 16,2 Prozent energetisch bedingte Emissionen, die durch den Energiebedarf der Industrie hervorgerufen werden. Damit ist die Industrie die zweitwichtigste Emissionsquelle hinter der Energiewirtschaft. Mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes im Juni 2021 wurde das Ziel zur Treibhausgasminderung für das Jahr 2030 auf minus 65 Prozent gegenüber 1990 festgelegt und bis 2045 das Erreichen der Treibhausgasneutralität verbindlich festgeschrieben.²⁴ Dadurch hat der Druck auf die Industrie stark zugenommen, sich bei der eigenen Produktion, den hergestellten Gütern und den Geschäftspartnern schnell in Richtung Klimaneutralität zu entwickeln. Die Implementierung von Industrie 4.0 schafft Potenziale, Nachhaltigkeitsziele unter anderem über die Steigerung der Ressourceneffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien zu erreichen. Im Kontext der Nachhaltigkeit sind jedoch nicht ausschließlich ökologische Aspekte von Relevanz – neben ökonomischen Gesichtspunkten (siehe Abschnitt 1.1) sind auch soziale Faktoren (siehe Abschnitt 1.3) einzubeziehen.

23 Vgl. Umweltbundesamt 2021.

24 Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022.

25 Vgl. Boston Consulting Group 2021.

Vertikale und horizontale Integration

Die vertikale Integration, von Sensoren in der Fertigung über die Fabriksteuerung bis in Geschäftsanwendungen hinein, kann beim Erreichen der Klimaziele einen wichtigen Beitrag leisten, indem sie Transparenz über Ressourcenverbräuche schafft und damit hilft, Optimierungs- und Automatisierungspotenziale zu identifizieren. Auch die horizontale Integration zwischen den Partnern eines Geschäftsnetzwerks spielt für eine nachhaltigere Produktion und nachhaltigere Produkte eine wichtige Rolle. Sie schafft Transparenz entlang der Wertschöpfungskette und innerhalb der Wertschöpfungsnetzwerke und bildet so die Grundlage für nachhaltige Beschaffung und nachhaltigen Transport. Nachhaltigkeit ist dabei mehr als die Reduktion von Emissionen und Optimierung der eingesetzten Ressourcen. Sie betrifft auch die Wiederverwendung von Materialien und Gütern in der Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“) und eine nachhaltige, faire Beschaffung. Große Herausforderungen, die es dabei zu meistern gilt, sind die Reverse Supply Chain und das automatisierbare Befunden sowie die Demontage von Produkten, über deren Zustand hohe Unsicherheit herrscht.

Nachhaltigkeitsbewertung

Die Reduktion von Treibhausgasen in der Produktion führt häufig zu höheren Kosten, beispielsweise durch den Einsatz zusätzlicher Filteranlagen oder teurerer, alternativer Energiequellen. Daher ist die Schaffung internationaler Energieeffizienzstandards ein wichtiges Anliegen der Industrie, um so eine Benachteiligung energieeffizienter Unternehmen auszuschließen.²⁵ Gleichzeitig sind das sogenannte Life Cycle Assessment und die objektive Nachhaltigkeitsbewertung wesentliche Instrumente für den Nachhaltigkeitsvergleich. Mit dem Treibhausgasprotokoll („Greenhouse Gas Protocol“) wurde ein transnationaler Ansatz geschaffen, Treibhausgasemissionen zu bilanzieren und das zugehörige Berichtswesen für Unternehmen und öffentliche Organisationen zu standardisieren.²⁶

Erneuerbare Energien

Entscheidend für eine nachhaltigere Industrie wird der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien sein. Neben einer zunehmenden Elektrifizierung des Transportwesens gehört hierzu auch der Einsatz elektrischer Energie im Hochtemperaturbereich („Power-to-Heat“) oder bei der Gewinnung von Flüssigkraftstoff („Power-to-Liquid“), beispielsweise für die Luftfahrtindustrie. Einen weiteren Beitrag könnten Verfahren zur Abscheidung, Verwendung und Speicherung von Kohlendioxid in Verbrennungsabgasen leisten („Carbon Capture Utilization and Storage“).²⁷ In diesem Kontext sind Ansätze von höchster Relevanz, die Industrie mit der Energiewirtschaft im Kontext der sogenannten Sektorenkopplung intelligent zu vernetzen und somit über ein ganzheitliches (das heißt holistisches) Vorgehen die Sektoren aus dem Energiebereich mit der Industrie

26 Vgl. Greenhouse Gas Protocol 2022.

27 Vgl. ebd.

zu verknüpfen. Optimierungspotenziale liegen hier nicht nur in der Schaffung von Effizienzvorteilen, der Minderung des Energieverbrauchs sowie der Senkung von Schadstoffemissionen, unter anderem Dekarbonisierung durch den Einsatz erneuerbarer Energien, sondern vor allem auch in der flexiblen Energieversorgung vor dem Hintergrund schwankender Bedarfe (siehe dazu auch [Kapitel 2.1](#)).

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Vertikale und horizontale Integration zur Optimierung von Emissionen, Ressourceneinsatz, Kreislaufwirtschaft und nachhaltiger Beschaffung** unter Berücksichtigung von **Regulierungs- und Rechtsfragen**
- Konzeption von **Plattformen für Stoffkreislauf-Ökosysteme**
- Berücksichtigung von **Circular-Economy-Prinzipien im Design von Produkten und Verpackungen („Design for Circularity“)**
- Gestaltung **zirkulärer Wertschöpfungsnetzwerke und Ökosysteme**
- Konzepte und Methoden zur **nachhaltigeren Inbetriebnahme** und für einen **digitalen Probetrieb** mit dem Ziel eines **reduzierten Bedarfs an physischen Prototypen**, unter anderem über **modellbasierte, digitale Prozessketten, Virtual Prototyping, Dematerialisierung**
- 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 („Second Life“)
- Verfahren für den verstärkten Einsatz **erneuerbarer Energien** in Wertschöpfungsprozessen
- **Verlässliche, effiziente und fälschungssichere Erfassung, Weitergabe, Weiterverarbeitung** und gegebenenfalls **Archivierung von Stoff-, Energie- und Emissionsbilanzen**

1.3 Soziale und faire nachhaltige Wertschöpfung

Ethische Grundsätze für Wertschöpfungsnetzwerke, Diskriminierungsfreiheit, faire Interaktions- und Kooperationsroutinen

Für die gesellschaftliche Akzeptanz neuer industrieller Wertschöpfungssysteme ist es außerordentlich wichtig, dass diese sozial und

fair sind. Dazu gehört insbesondere auch eine faire Digitalisierung von Arbeitsplätzen. Sie sollte davon geprägt sein, die Agilität und Innovationskraft von Unternehmen auf dynamischen Märkten sicherzustellen, unter anderem über räumliche und zeitliche Flexibilität, Möglichkeiten der Fort- und Weiterbildung im Sinne des lebensbegleitenden Lernens, neuen Formen der Mensch-Maschine-Interaktion (beispielsweise über kollaborative Roboter, sogenannten Cobots) und über die Realisierung von neuen Arbeitsmodellen wie Crowd- oder Gig-Working²⁸ sowie Kreativwettbewerben. Solche Maßnahmen verbessern die Attraktivität digitalisierter Arbeitsplätze für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer.²⁹

Da die Digitalisierung einige Herausforderungen im Hinblick auf die Fairness der entstehenden beziehungsweise sich verändernden Märkte mit sich bringt, gilt es sowohl für den Aufbau als auch den Betrieb von Wertschöpfungsnetzwerken ethische Grundsätze zu beachten. Dazu zählen beispielsweise Diskriminierungsfreiheit, Wahrung von Menschenrechten sowie Transparenz in der Datennutzung.

Der Gesetzgeber muss daher sicherstellen, dass Plattformbetreiber die Lock-in-Möglichkeiten auf Basis von Netzeffekten in erfolgreichen Plattformen nicht ausnutzen, um Monopolstellungen zu erlangen oder den Zugang zu ihren Plattformen nach Belieben zu beschränken. Ebenso müssen sich Plattformbetreiber eigenverantwortlich ethischen Grundsätzen verpflichtet fühlen.

Ferner ist die Neutralität der Kommunikationsinfrastruktur zu gewährleisten, um allen Unternehmen unabhängig von ihrer Größe und Herkunft einen diskriminierungsfreien Zugang zu ermöglichen.

Werden KI-Verfahren eingesetzt, um Kundinnen und Kunden oder Mitarbeitende zu bewerten, muss garantiert werden, dass diese völlig diskriminierungsfrei sind.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Methoden zur Validierung und Sicherstellung der **Diskriminierungsfreiheit von KI-Algorithmen** in dynamischen Wertschöpfungssystemen
- **Faire Gestaltung von Wertschöpfungssystemen**, insbesondere zur Vermeidung von Lock-in-Effekten in monopolistischen Strukturen
- Gewährleistung **ethischer Grundsätze** bei der Erhebung, Sammlung, dem Austausch, der Analyse und sonstigen Nutzung von Daten in Wertschöpfungssystemen

²⁸ Vgl. Schmidt 2016.

²⁹ Zu den Aspekten der fairen Digitalisierung von Arbeitsplätzen, siehe [Kapitel 4](#) dieser Publikation.

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 – insbesondere auch im Hinblick auf Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit. Forschungsbedarf besteht hier vor allem hinsichtlich der Einbindung von KI-Methoden, inklusive des maschinellen Lernens, in Produktionssysteme. Eine bedeutende Rolle spielen hier etablierte Lösungen und deren Übertragbarkeit auf zukünftige Systeme. Darüber hinaus werden unter anderem Technologien zu IT-Security, Privacy und Datensemantik über die erfolgreiche Anwendung von Industrie 4.0 entscheiden. Das Zusammenspiel verschiedenster Technologien und Bedarfe wird den Fortschritt von Industrie 4.0 treiben, zum Beispiel Material-, Mikro-, Nano- und Biotechnologien in Verbindung mit Ressourcen- und Materialengpässen. Damit stellt Industrie 4.0 einen entscheidenden Schlüssel für die ressourcenschonende Fertigung dar.

Im Folgenden werden der Status quo, die vorhandenen Defizite und die Forschungsbedarfe in den Bereichen nachhaltige Produktionssysteme und Systemarchitekturen, KI („Industrial AI“) und Autonomie, Sensorik und Aktorik, Kommunikations- und Computingtechnologien, Souveräne Datenräume sowie Biologisierung in technischen Produkten und Systemen dargelegt.

Auch das Themenfeld 2 „Perspektiven technologischer Entwicklungen“ weist starke Bezüge auf das Leitbild der Plattform Industrie 4.0 auf. Im Handlungsfeld „Souveränität“ lassen sich insbesondere die Bedarfe an sicheren, souveränen, offen zugänglichen, dezentralen und interoperablen Datenräumen sowie an Technologiestandards für Kommunikations- und Computingtechnologien verorten. Die Bedarfe an einer systemübergreifenden Vernetzung verschiedenster Systempartner sowie an der Schaffung übergreifender Interoperabilitätslösungen beziehen sich auf das Handlungsfeld „Interoperabilität“. Schließlich fokussieren die Bedarfe an nachhaltigen, ressourcen- und energieeffizienten Produktionssystemen sowie deren Bewertung, an Lösungen der digitalen Dekarbonisierung sowie an Ermöglichung der Kreislaufwirtschaft (Recycling, Remanufacturing, Reuse, Repair etc.) das Handlungsfeld „Nachhaltigkeit“.

Hierzu gehören ebenso die weiter unten spezifizierten Bedarfe an Realisierung einer biologischen Transformation. Ziel sind hier bioinspirierte, biobasierte, biointegrierte oder biointelligente Systeme, die unter anderem eine Umstellung auf biobasierte, biotechnologische Materialien oder Prozesse, selbststeuernde beziehungsweise selbstheilende Systeme und die Nutzung biologischer Prinzipien für neue Anwendungen ermöglichen.

2.1 Nachhaltige, flexible, modulare Produktionssysteme und ihre Systemarchitekturen

Selbstorganisation und -optimierung, Grad der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Stabilität und Optimalität, Nachhaltigkeit und Effizienz, Dekarbonisierung, Steuerung eingesetzter Energiemengen

Volatile und komplexe Märkte der Zukunft implizieren innovative, hochflexible und wirtschaftliche Fertigungstechnologien. Dabei werden kapitalintensive Produktionsmittel, die für eine spezifische Aufgabe konstruiert und gebaut wurden, durch flexible, modulare, wandlungsfähige und wiederverwendbare Produktionssysteme ersetzt. Eine notwendige Basis hierfür bilden flexible Systemarchitekturen.

Seit vielen Jahren orientieren sich Unternehmen bei der Entwicklung von automatisierten, flexiblen Produktionssystemen an der klassischen Automatisierungspyramide³⁰. Industrie 4.0 erfordert durch die systemübergreifende Vernetzung von Systempartnern ein Aufbrechen der gängigen Automatisierungspyramide. Derzeit fehlt es an Kompatibilitätslösungen für Produktionssysteme. Diese werden weniger durch Standardisierung der Hardware erreicht als durch generische Lösungen mit hochflexiblen Konfigurationsmöglichkeiten (siehe [Kapitel 3.4](#)). Ebenso sind etablierte Planungs- und Testprozeduren auf diese Veränderung nicht anwendbar. Komplementär zur Kompatibilität sind Universalität (Dimensionierung beziehungsweise Gestaltung für unterschiedliche Anforderungen im Hinblick auf Produkt oder Technologie), Mobilität (örtlich flexible Bewegbarkeit von Objekten), Skalierbarkeit (Erweiter- und Reduzierbarkeit im Hinblick auf Technik, Räume und Personal) sowie Modularität (Standardisierung und Funktionsfähigkeit von Einheiten beziehungsweise Elemente) für alle Ebenen eines (Produktions-)Systems als maßgebliche „Wandlungsbefähiger“³¹ sicherzustellen.³² Dabei gilt es, über Dezentralisierung, smarte

30 Die klassische Automatisierungspyramide stellt strikt getrennte Ebenen dar, die spezifische Aufgaben repräsentieren und von verschiedenen Systemen unterstützt werden. Benennung und Anzahl der visualisierten Hierarchieebenen variieren in der Literatur. Vgl. Meudt et al. (2017) für einen Überblick.

31 Vgl. Nyhuis et al. 2008, S. 26 ff.

32 In einer durch den Forschungsbeirat im Jahr 2018 beauftragten acatech-Untersuchung wurden zentrale Leitplanken für Unternehmen definiert, wie sie durch den Einsatz von Industrie 4.0 wandlungsfähiger werden. Vgl. Lanza et al. 2018, S. 22 ff.

Automatisierung (zum Beispiel generische Fertigungsanlagen oder Fertigungszellen mit Werkzeugwechsel statt Hochautomatisierung) und die Etablierung einheitlicher Standards (für modulare Produkte und Prozesse), aber auch über die Bereitstellung von vorgedachten Frei- oder Erweiterungsflächen die Voraussetzungen für Flexibilität und Veränderungsfähigkeit der Unternehmen zu schaffen.

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 durch wandlungsfähige Maschinenkonzepte mit fähigkeitsbasierten, selbstkonfigurierenden Modulen umgesetzt.

Im Kontext der Nachhaltigkeit ist die digitale Dekarbonisierung von höchster Relevanz. Dabei wird ein digitales Abbild der wesentlichen energetischen beziehungsweise emissionsbehafteten Prozesse für die Systemoptimierung genutzt, die sich an den Kriterien Kosten, Emissionen und Versorgungssicherheit ausrichtet. Dieses digitale Modell ermöglicht für alle infrage kommenden Komponenten, beispielsweise Kraftwerke, Solaranlagen, Leitungen und Maschinen, eine nach Art, Auslegung und Anordnung optimale Planung. Darüber hinaus ermöglicht digitale Dekarbonisierung schließlich auch den energieeffizienten Regelbetrieb von Energiesystemen und somit insgesamt eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Beherrschbarkeit hochflexibler und daher schwer zu überblickender (**Produktions-)Systemstrukturen** sowie von Ansätzen zur **Selbstorganisation** und **-optimierung** komplexer Systeme
- **Verlässliche Erfassung von Qualitäts- und Herstellungsparametern**
- **Kognitive digitale Zwillinge** als Erweiterung bestehender digitaler Zwillinge, um zusätzliche Fähigkeiten wie Kommunikation, Analyse und Intelligenz für **nachhaltiges Ressourcenmanagement** zu erreichen (kognitive Fähigkeiten, die es zum Beispiel der Prozesssteuerung ermöglichen, zur Laufzeit anhand der Prozessdaten und der digitalen Modelle flexibel und autonom auf Änderungen und Störungen des Prozessablaufs zu reagieren)
- Nutzengenerierung und Kostenverhältnisse durch **Flexibilität** und **Wandlungsfähigkeit** von **Systemarchitekturen** („Break-even-Analyse“)
- „**Werkzeugkasten**“ zur Auswahl und Implementierung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in **bereits im Betrieb befindlichen Fertigungsanlagen** („Brownfield-Anlagen“)
- Digitale Modelle zur Unterstützung bei der **Entwicklung, Bewertung** sowie **Übertragung** von **Flexibilität, Stabilität** und **Optimalität** auf andere Systemarchitekturen³³
- Weiterentwicklung von Methoden zur **Absicherung der Systemstabilität** aufgrund steigender Anforderungen durch den zunehmenden Vernetzungsgrad von Maschinen und Anlagen
- **Nachhaltige digitale Dekarbonisierung: optimaler Betrieb von Produktionsprozessen** und ihrer **multimodalen Energieverbräuche** nach den Kriterien **Versorgungssicherheit, Kosten** und **Nachhaltigkeit**, sowie deren **automatisierte Teilnahme an Märkten** oder **Austauschplattformen für Energie, Flexibilität, Systemdienstleistungen** oder **CO₂-Nachverfolgung**
- **Nachhaltige digitale Dekarbonisierung: ganzheitlich optimierte Weiterentwicklung von Produktionsprozessen** im Hinblick auf **Versorgungssicherheit, Kosten** und **Nachhaltigkeit**, unter Nutzung von **lokalen erneuerbaren Ressourcen** im Verbund mit **Sektorkopplung** und **Energieeffizienzmaßnahmen**
- Entwicklung standardisierter Modelle, Methoden und Systeme zur **Optimierung der Energieeffizienz** in der Produktion
- **Mehrzieloptimierung** der Eigenschaften von **Industrie 4.0-Anlagen** (Safety, Verfügbarkeit, Performance, Security etc. unter Betrachtung der jeweiligen Wechselwirkungen)
- Entwicklung **KI-basierter Mechanismen**, die es ermöglichen, im Kontext **verschiedener externer** und **interner Faktoren** (Spitzenauslastungen, Volatilität im Energieangebot, Tarifgestaltung) den **Energieverbrauch** und gegebenenfalls die **-einspeisung intelligent** zu **steuern** und somit eine Integration der Industrie in den Energiemarkt zur Folge haben (Energieflexibilisierung)
- Entwicklung **vernetzter Toolketten** zur Bewertung des **späteren Materialeinsatzes** oder der **Recyclingfähigkeit** der Produkte mit dem Ziel der Schaffung nachhaltiger Produktionssysteme und Systemarchitekturen, etwa in der frühen Design- und Auslegungsphase, bei der **digitalen Verfolgung** von **Material- und Ressourcenströmen** und während der Lebenszeit eines Produkts bis hin zur Kreislaufwirtschaft

33 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 hier 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.

- Umsetzung **unternehmensübergreifender Rückverfolgbarkeit** („Traceability“), um Produkte am Ende ihres ersten Lebenszyklus bewerten und zuordnen zu können sowie die Herkunft von beispielsweise seltenen Erden aus nachhaltiger Gewinnung nachzuweisen
- Technologien zur **Sicherung der Datenhoheit, Verkürzung der Latenzzeiten** und Verbesserung der **Datenökonomie** (zum Beispiel „Edge AI“)
- Entwicklung von Standards und Technologien, die zur **Messung** der verschiedenen Aspekte der **Nachhaltigkeit** in der Wertschöpfung beitragen können

2.2 Künstliche Intelligenz (Industrial AI) 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 autonom und intelligent und steigern damit ihre selbsttätige Anpassungsfähigkeit. Wissen über die Nutzenden, 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.

Auf dem Weg dorthin ist es entscheidend, Ziele für den Übergang zu autonomen Systemen zu definieren und eine entsprechende Taxonomie festzulegen. Autonomie findet immer in vom Menschen vorgegebenen Systemgrenzen statt, das heißt der Mensch definiert, welcher Grad an Autonomie erreicht werden soll und innerhalb welcher Funktionen beziehungsweise Bereiche KI tatsächlich wirken darf.³⁴ Daher ist es von hoher Relevanz, die Nachvollziehbarkeit beziehungsweise Nachweisbarkeit von KI-basierten Empfehlungen und Entscheidungen sicherzustellen. KI ist ein Portfolio von Technologien, das die Realisierung von autonomen Funktionen und Systemen ermöglicht. Im Kontext der Anwendung im industriellen Bereich wird von der sogenannten Industrial AI gesprochen. Unterschieden werden können verschiedene Stufen der Autonomie³⁵: Nicht jedes System soll den gleichen Grad an Autonomie erreichen. Zudem können in verschiedenen Teilbereichen der industriellen Produktion, zum Beispiel Prozessführung, Prozessplanung,

Feldüberwachung oder Instandhaltung, unterschiedliche Grade an Autonomie sinnvoll sein.

Generell ist festzustellen, dass sich Industrial AI deutlich von der KI-Anwendung in anderen Bereichen, insbesondere im Konsumentenumfeld, unterscheidet. Beispielsweise stehen im industriellen Kontext andere Datentypen, wie Zeitreihen und Eventdaten, im Fokus. Häufig sind die für maschinelles Lernen verfügbaren industriellen Datensätze schlecht ausbalanciert, denn typischerweise wird man in einigermaßen funktionierenden industriellen Anlagen eher Daten vorfinden, die einen positiven Prozessverlauf beschreiben. Einen fehlerhaften Prozessverlauf mit der Produktion von Ausschuss zu initiieren, nur um das Modell zu trainieren, ist wirtschaftlich selten gerechtfertigt. KI-Anwendung im industriellen Bereich beschränkt sich daher bislang vor allem auf Teilbereiche, zum Beispiel die Datenanalyse zur Qualitätssicherung, in denen die benötigten Datenmengen für das maschinelle Lernen zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend ergeben sich spezielle Anforderungen an die Weiterentwicklung autonomer Systeme und der Industrial AI:

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Hybride Lösungsansätze** für die industrielle Produktion zur Verknüpfung modellbasierter und datenbasierter Methoden
- Verständliche Machine-Learning-Modelle zur **Nachvollziehbarkeit** und **Nachweisbarkeit** ihrer Empfehlungen und Entscheidungen („**Explainable AI**“) sowie des sich ergebenden Nutzens beziehungsweise Mehrwerts
- Methoden zur **Prüfung** und **Validierung** von **KI-Systemen** sowie zur Spezifikation hybrider Wissensrepräsentation
- Methoden zur **anwendungsgerechten Auswahl** von **KI-Verfahrenen**
- Entwicklung und **Bewertung** von **Anwendungsfällen** für Machine-Learning- und KI-Ansätze, damit eine voraussetzungsgerechte Anwendung der Verfahren sichergestellt wird; Gegenüberstellung der Anforderungen der Anwendungsfälle mit den Potenzialen der Machine-Learning- und KI-Verfahren
- Entwicklung neuer **KI-Ansätze** und **maschinellem Lernverfahren** mit sehr guter Performanz bei **geringen Datenmengen** und **einfacher Übertragbarkeit**, von der **Grundlagenforschung** bis in die **industrielle Praxis** beziehungsweise auf einzelne Applikationen

34 Vgl. Fay et al. 2019.

35 Die Plattform Industrie 4.0 definiert die durch den Einsatz von KI erreichbaren Autonomiegrade in sechs Stufen: 0) keine Autonomie, 1) Assistenz bei ausgewählten Funktionen, 2) zeitweise Autonomie in klar definierten Bereichen, 3) abgegrenzte Autonomie in größeren Teilbereichen, 4) das System arbeitet autonom und adaptiv in bestimmten Systemgrenzen, 5) autonomer Betrieb in allen Bereichen. Vgl. Plattform Industrie 4.0 2019d, S. 12 ff.

- Entwicklung von KI-basierten Lösungen zur **Optimierung des Materialflusses im Wertschöpfungsnetzwerk und des Materialeinsatzes** in der Produktion
- **Autonome Optimierung** von **Recycling** oder der **Nachnutzung von Stoffen**
- **Funktions-Sicherheit: Safety-Zertifizierbarkeit** von Industrie 4.0, insbesondere unter Beteiligung von **Machine-Learning-Komponenten**, Fernwartung
- Methoden zur **holistischen End-to-End-Betrachtung** von Prozessketten und Lösungen zur **durchgängigen Automatisierung**, zum Beispiel mittels RPA

2.3 Sensorik und Aktorik

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

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

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 ist es von höchster Relevanz, dass Sensoren die Fähigkeit zur Selbstdiagnose und gegenseitigen Überprüfung haben. Sensoren müssen sich in dynamischen Umgebungen selbst zu Netzwerken zusammenfinden. Damit Sensorwerte und Daten, die zu verschiedenen Zeitpunkten von unterschiedlichen, räumlich verteilten Quellen kommen, kombiniert werden können, bedarf es einer vereinheitlichten Semantik der Information und Technologie der Übertragung. Außerdem ist in vielen Bereichen der energieautarke Einsatz von Sensoren und deren Einbindung in energieautarke, intelligente Sensornetze erstrebenswert. 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.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Generalisierbarkeit, Spezialisierbarkeit und Übertragbarkeit von Sensortechniken** aus dem Konsum- 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 (auch unter Verwendung von bioinspirierten Modellen³⁶)
- **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**
- **Intelligente Sensoren für Edge AI**
- Potenziale der **Quantensensorik** in Industrie 4.0
- Potenziale der **Neuromorphen Hardware** in Industrie 4.0
- **Autonome Messtechnik**, die unter Verwendung von KI Messverfahren auswählt und sich an neue Messaufgaben anpasst

2.4 Kommunikations- und Computingtechnologien

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

Neue informations- und kommunikationstechnologische Entwicklungen gelten zusammen mit Fortschritten in den Computingtechnologien als Rückgrat für Industrie 4.0. Beispielsweise soll die 5G-Technologie wachsende Anforderungen von autonomen, intelligenten Systemen erfüllen. Hierzu gehören beispielsweise ansteigende Datenraten³⁷ („Volume“) in höheren Breitbandmodi, Echtzeitanforderungen („Velocity“) von Daten und Produktivsystemen, 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

36 Siehe dazu auch [Kapitel 2.6](#).

37 Generell werden unter dem Begriff „Big Data“ Datenmengen verstanden, die sehr groß („Volume“) und vielfältig („Variety“) sind, in hoher Geschwindigkeit generiert und transferiert werden („Velocity“) und für die Verlässlichkeit („Veracity“) im Hinblick auf Richtigkeit und Echtheit sicherzustellen ist. Die ursprüngliche Definition des Begriffs durch die drei Vs – „Volume“, „Velocity“ und „Variety“ (vgl. Gartner 2022) – erfährt je nach Quelle verschiedene Erweiterungen.

Fragen zur Datensicherheit („Veracity“) noch ungeklärt, wodurch ein Betrieb von autonomen, intelligenten Systemen über ihre Grenzen hinweg erschwert wird.

Festzustellen ist, dass es aktuell viele inkompatible Daten („Variety“) und 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.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- 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**; Implikationen des steigenden Einflusses 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
- Entwicklung von **Mehrwertdiensten** und ihr Potenzial für produzierende Unternehmen bei der Umsetzung von Industrie 4.0 sowie der Aufbau notwendiger Kompetenzen zum Betreiben von lokalen Netzen
- Entwicklung von **5G-Anwendungsfällen**, die als Leuchtturmprojekte die vielfältigen Anwendungspotenziale sowie Hemmnisse und Hürden bei der Implementierung praxisnah im Kontext der Anwendbarkeit aufzeigen³⁸

2.5 Souveräne Datenräume

Offenheit, Dezentralität, Souveränität, Interoperabilität, Skalierbarkeit, Transparenz, Integrität, Sicherheit und Vertrauen im Datenaustausch

Der Aufbruch von teils starren, linearen Wertschöpfungsketten in neu gestaltete, dynamische Produktions- beziehungsweise Wertschöpfungsnetzwerke im Zuge der digitalen Transformation und Implementierung von Industrie 4.0 schafft Potenziale zur

Realisierung komplexer Austauschbeziehungen. Es entstehen Möglichkeiten der multilateralen Interaktion verschiedenster relevanter, global vernetzter Partner zur Entwicklung von innovativen Geschäftsmodellen auf Basis von Daten.³⁹

Die Voraussetzung solcher digitaler beziehungsweise datenbasierter Ökosysteme stellen aus technischer Perspektive übergreifende Datenräume dar, die den Austausch von Daten der unterschiedlichen Stakeholder unter der Prämisse von Transparenz, Vertrauen, Integrität, Interoperabilität, Skalierbarkeit, Sicherheit und individueller Souveränität beziehungsweise Datenhoheit ermöglichen. So können für die Partner, die an diese Datenräume angeschlossen sind, Chancen geschaffen werden, Wertschöpfungspotenziale ihrer Daten zu heben, neue datenbasierte Geschäftsmodelle zu realisieren oder Innovationen zu forcieren. Auf dem Weg der Realisierung solcher Datenräume müssen sowohl technische als auch ökonomische, institutionelle und rechtliche Anforderungen⁴⁰ identifiziert und im Rahmen eines Multi-Stakeholder-Ansatzes im Kontext verschiedener Disziplinen und Perspektiven diskutiert und erfüllt werden.

Gleichzeitig ist dabei die Interoperabilität beziehungsweise Anschlussfähigkeit zu verschiedenen Datenräumen über Domänen- und Landesgrenzen hinweg sicherzustellen – unter anderem über die Kooperation mit der Gaia-X-Initiative.

Darüber hinaus ist es wichtig, in der Umsetzung an bereits bestehende Aktivitäten zur Entwicklung von Datenräumen anzuknüpfen. So treibt die Plattform Industrie 4.0 die Schaffung des Datenraums Industrie 4.0 voran, der eine Beschleunigung der Wertschöpfung in der industriellen Fertigung und Produktion zum Ziel hat.⁴¹ Mit der Verwaltungsschale wurde bereits ein kohärentes Informationsmodell zur unternehmensübergreifenden Interoperabilität entwickelt, auf dem weiter aufgebaut werden kann. Zudem ist es wichtig, bereits implementierte Lösungen auch aus anderen Domänen (beispielsweise dem Mobility Data Space⁴² aus dem Mobilitätsbereich) als potenzielle Orientierungsgrundlagen heranzuziehen und im Kontext der spezifischen Anforderungen zu prüfen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Entwicklung **offen zugänglicher, dezentraler, sicherer und interoperabler Datenräume** für den Industrie- und Produktionssektor, die auf den Erkenntnissen und Spezifikationen von existierenden Initiativen (Gaia-X) und Implementierungen in anderen Domänen (zum Beispiel Mobility Data Space) aufbauen
- Erarbeitung und Bereitstellung von gemeinsamen, übergreifend anerkannten **Architekturen, Frameworks, Routinen**,

der auch in der Entwicklung und Implementierung souveräner Datenräume eine wichtige Rolle spielt. Formuliert werden darin harmonisierte Vorschriften für einen fairen Datenzugang und eine faire Datennutzung. Vgl. Europäische Kommission 2022.

38 Für eine detailliertere Untersuchung der Potenziale sowie der Hemmnisse und Hürden bei der Implementierung von 5G vgl. Fleischer et. al. (2021).

39 Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2021) für diesen einleitenden Textabschnitt zu den souveränen Datenräumen im Kontext von Industrie 4.0.

40 Mit dem European Data Act wurde bereits die Grundlage für einen rechtlichen Rahmen für die Datenwirtschaft auf europäischer Ebene geschaffen,

41 Vgl. Plattform Industrie 4.0 2021.

42 Vgl. MDS 2022.

Standards, Schnittstellen und Richtlinien nach dem **europäischen Werte- und Rechtssystem** für technische Infrastrukturen als Grundlagen für einen effizienten multilateralen Datenaustausch in souveränen Datenräumen

- Integration verschiedener Perspektiven unterschiedlicher Domänen für eine **integrative, interdisziplinäre Konzeption** von Datenräumen im nationalen und internationalen Kontext, wobei nicht nur **technische**, sondern insbesondere auch **rechtliche** und **ökonomische Aspekte** zu berücksichtigen sind
- Entwicklung **prototypischer Use Cases** mit dem Ziel, neben den diversen Anforderungen an die Umsetzung auch den konkreten Nutzen von souveränen Datenräumen aufzuzeigen, um, insbesondere bei KMU, Akzeptanz, Vertrauen und Bereitschaft zur Partizipation zu steigern
- **Anreizsysteme** zur Bereitstellung, zum Austausch und zur Nutzung von Daten über souveräne Datenräume
- **Datenintegrationskonzepte, Transfer- und Zertifizierungsmechanismen, Datenmodelle** sowie **Vokabulare** zur Sicherstellung der **semantischen Interoperabilität** zwischen Daten aus verteilten Datenbanken und Datenräumen
- Lösungen zur **Vermeidung von Redundanzen** von Daten aus heterogenen Datenräumen
- Zugang, Nutzung und Weiterentwicklung der für souveräne Datenräume notwendigen **Schlüsseltechnologien** (unter anderem KI, Edge-Cloud-Architekturen, DLT wie Blockchain, digitaler Zwilling)
- Entwicklung eines **gemeinsamen Begriffsverständnisses** über Strukturen, Anforderungen, Implementierungen von Datenräumen

2.6 Biologisierung in technischen Produkten und Systemen

Neue, ökonomisch attraktive Konzepte zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele, biointelligente Systeme, Komplementarität zwischen der digitalen und biologischen Transformation, Verknüpfung von Biologie, Bionik, Biotechnologie und Bioökonomie

Nachhaltigkeit in industriellen Wertschöpfungsprozessen ist für Unternehmen im nationalen und internationalen Kontext zur Sicherung der Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit essenziell.

Während heute in den Unternehmen vornehmlich Vermeidungsstrategien für klimaschädliche Prozesse im Fokus stehen, ist es für die Zukunftsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland notwendig, eine noch umfänglichere Transformation zur Nachhaltigkeit in Angriff zu nehmen. Mit der Biologisierung der Technik werden nachhaltige, disruptive Innovationen genauso möglich, wie neue ökonomisch attraktive Konzepte zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele.⁴³

Ein Beispiel dieser Entwicklung sind sogenannte Smart Biomanufacturing Devices (intelligente, dezentrale Bioproduktionszellen), die eine biobasierte, personalisierte und dezentrale Herstellung von Konsumgütern, Nahrungsmitteln und Therapien erlauben. Auf diese Weise werden Produkte erst dann produziert, wenn Sie gebraucht werden (just-in-time). Abfall existiert nicht mehr, da jeder Output den Input für etwas Neues darstellt. Diese biointelligenten Systeme werden genutzt, um den Material- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren und Emissionen zu senken.⁴⁴

Die biologische Transformation der Industrie umfasst die Integration von Materialien, Strukturen, Prozessen und Organismen der Natur in der Technik, indem systematisch das Wissen aus der Biologie zur Anwendung kommt. Das hierfür notwendige Zusammenwirken von Biotechnologie, Maschinenbau, Produktions- und Informationstechnologie schafft neue Möglichkeiten der flexiblen Adaption von Produktions- und Wertschöpfungsprozessen an Anforderungen im Kontext der Nachhaltigkeit.⁴⁵ Somit ist es erforderlich, die digitale Transformation komplementär zur biologischen Transformation zu betrachten und neben der entsprechenden Expertise in Technologie und Informatik auch Kompetenzen in den Bereichen Biologie, Bionik, Biotechnologie und Bioökonomie aufzubauen und diese miteinander zu verknüpfen.

Insgesamt wird in der biologischen Transformation das Potenzial gesehen, nicht nur die Produktion und Wertschöpfung im industriellen Bereich zu revolutionieren, sondern auch weitreichende gesellschaftliche Auswirkungen nach sich zu ziehen.⁴⁶ Somit ist es für deutsche Unternehmen wichtig, neben Industrie 4.0 auch eine führende Stellung in den Bereichen Effizienz- und Umwelttechnologie anzustreben und zu sichern beziehungsweise weiter auszubauen. Gleichzeitig gilt es, sukzessive weitere Expertise in den Bereichen der Lebenswissenschaften aufzubauen und neue Kooperationen einzugehen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Bioinspirierte Methoden** zur Planung und Steuerung technischer Systeme – beispielsweise für wandlungsfähige Produktionssysteme

43 Vgl. Miehe et al. 2018, Byrne et al. 2018.

44 Vgl. Bauernhansl et al. 2019, Full et al. 2019.

45 Vgl. Bergs et al. 2020, Miehe et al. 2019, Miehe et al. 2020.

46 Vgl. Miehe et al. 2021.

- **Integration von (Mikro-)Organismen** (oder Bestandteilen davon wie Enzyme oder DNA) **in Materialien**, unter anderem für
 - Schaltbare **Bioelektronik, Biosensorik, Bioaktorik, Schnittstelle zur Bioelektrotechnologie**
 - Aufbau von **Genomdatenbanken für Mikroorganismen**, die in Kombination mit spezifischen Materialien zusätzliche Funktionalitäten erzeugen (triggerbare oder aktorische Funktionen)
 - Entwicklung eines **CRISPR/Cas-Funktionsportfolios** mit der gezielten Einstellung von Produkteigenschaften
 - **Selbsteilende, selbstregenerierende, Selbst-X-Systeme**
 - **Track-and-Trace-Anwendungsfelder**
 - **Kunststoffabbau**
 - **Kühlschmiermittelregenerierung**
- **Synthetische Biologie** und **Systembiologie**: Fortschritte in der Diskussion zur Gentechnik (insbesondere die Formulierung klarer Regularien) sowie Weiterentwicklung von Genome-Editing-Technologien (zum Beispiel CRISPR/Cas9) zum gezielten Eintrag von Funktionalitäten in biotechnischen Schnittstellen
- **Additive Fertigung**, unter anderem durch
 - **Bioprinting** von Zellen und Biomolekülen zur zielgerichteten Positionierung und Ausrichtung
 - **Weiterentwicklung von 3D/4D-Druckverfahren**, zum Beispiel 3D-Druck mit pluripotenten Stammzellen zur personalisierten Organ- oder Gewebe-Erstellung („Tissue Engineering“)
- **Biobasierte Plattformchemikalien** als Erdölersatz, unter anderem durch Entwicklung von Fertigungsverfahren zur Herstellung und Verarbeitung von Biopolymeren (Anwendungsfeld: industrielle Biotechnologie⁴⁷)
- **Biologie-Technik-Schnittstelle**, unter anderem in den Bereichen
 - **Regelungstechnische Grundlagenmodelle**
 - **Sensortechnik**, zum Beispiel Entwicklung neuer Biosensoren zur direkten Messung in biotechnischen Systemen, Entwicklung neuer Softsensoren, inklusive zugrundeliegender Modelle, Entwicklung von Sensorintegration zur Online-Messung in Prozessen oder Verfahren, Erprobung neuer, multivariater Sensorprinzipien für wachsende Anzahl an Substraten, die zunehmend komplexer werden
 - **Algorithmen** und **Datenverarbeitung**, zum Beispiel Interpretation biologischer Signale in Digitalcodes, Weiterentwicklung neuronaler Netze und selbstlernender Algorithmen zur Steuerung biotechnischer Systeme, Prozessmodellierung biotechnischer Schnittstellen und Herstellungsprozesse, Prozessmodellierung biochemischer Vorgänge in technischen Systemen
- Neue Verfahren für die **Sektorkopplung 2.0** (Energie- und Materialströme bündeln), um die Basis einer biointelligenten Produktionstechnik zu schaffen
- **Datenverarbeitung**: bioinspirierte Hardware, unter anderem Biocomputing, Bioelektronik, DNA-Computing, biochemische Moleküle als Informationsträger, Datenspeicherung in DNA, neuronale Chips, programmierbare und steuerbare Zellennetze
- **Ökosystemforschung** und **prädiktive Modellierung**, unter anderem durch Weiterentwicklung von LCA, insbesondere für Gentechnik und KI
- Neue **Geschäftsmodelle** und **Managementansätze** für eine zelluläre, autonome, Vor-Ort-Produktion von Gütern (teilweise außerhalb klassischer Produktionsumgebungen)

47 Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015.

3 Engineering von Industrie 4.0-Lösungen

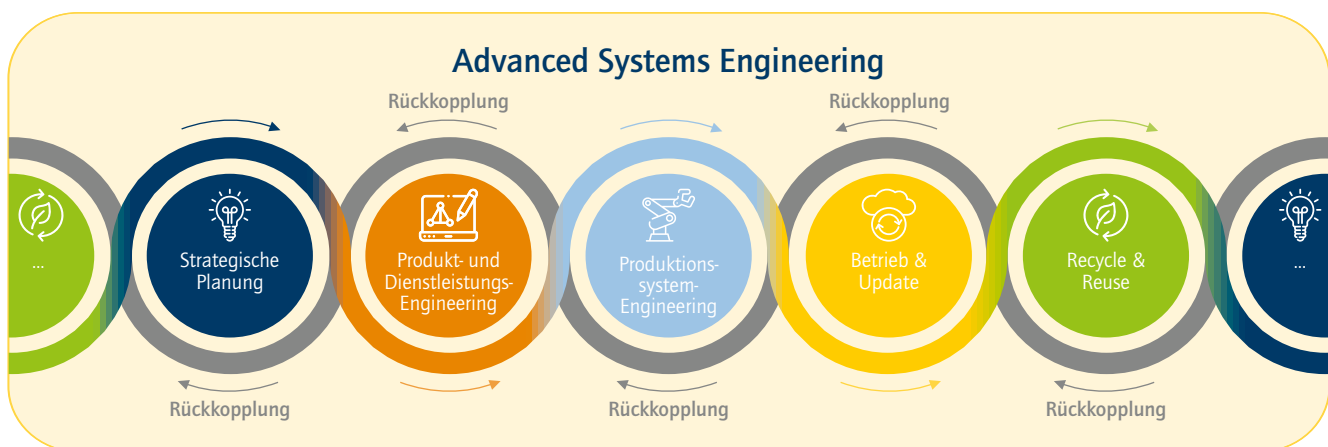
Die Nutzung von Industrie 4.0-Lösungen setzt eine systematische Planung, Konzipierung, Entwicklung, Validierung, Simulation und Erprobung der zugrundeliegenden technischen beziehungsweise soziotechnischen Systeme voraus. Die steigende Komplexität der Systeme und die Orchestrierung der übergeordneten Systemverbände erfordern eine ganzheitliche und strategische Herangehensweise. Ein Lösungsansatz hierfür ist das übergeordnete, innovationspolitische Leitbild des Advanced Systems Engineering (ASE). ASE stellt die Erarbeitung ganzheitlicher Lösungen zu komplexen Problemen in den Mittelpunkt und versteht sich als durchgängige, interdisziplinäre Schule der Entwicklung technischer Systeme.⁴⁸ ASE adressiert den gesamten Systemlebenszyklus von der strategischen Planung über das Engineering von Produkten, Dienstleistungen und Produktionssystemen bis zum Recycling beziehungsweise der Wiederaufbereitung und anschließenden Wiederverwendung (vgl. Abbildung 2).

Die Umsetzung von ASE kann einen zentralen Beitrag für die erfolgreiche Realisierung der in den ersten beiden Kapiteln aufgeworfenen Ziele und Potenziale (etwa Produkt-Service-Systeme, digitale Zwillinge, flexible und modulare Produktionssysteme) sowie das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen leisten. Analog tragen zahlreiche der in diesem Kapitel aufgeführten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur Realisation von ASE bei. Die mit ASE adressierten Methoden und Werkzeuge müssen auch neue Aspekte, wie die zunehmende Selbstlernfähigkeit von Systemen, die Datenanalytik sowie die damit verbundenen umfassenden Methoden des Data Engineering 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, wodurch sich wiederum weitreichende Auswirkungen auf die Bereiche Arbeit, Unternehmensorganisation und Gesellschaft ergeben werden. Hierbei gilt es, auf die Möglichkeit einer adäquaten Partizipation zu achten und nachhaltig gute Arbeits- und Bildungsmöglichkeiten sicherzustellen (siehe [Kapitel 4](#)). Im Folgenden werden der Status quo und die vorhandenen Defizite sowie die daraus resultierenden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe erläutert, und zwar in den vier Bereichen Strategische Planung und Auslegung (3.1), Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen (3.2), neue Methoden und Werkzeuge für die Industrie 4.0-Lösungsentwicklung (3.3) und Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen (3.4).

Die in Kapitel 3 diskutierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe unterstützen die Realisierung des Leitbilds 2030 der Plattform Industrie 4.0. Die Weiterentwicklung des Engineerings von Industrie 4.0-Lösungen trägt zu den strategischen Handlungsfeldern „Souveränität“ und „Interoperabilität“ bei, etwa über den Ausbau der digitalen Infrastruktur oder das Vorantreiben von Standards zur Integration einzelner Systeme. Darüber hinaus leisten die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe auch einen entscheidenden Beitrag für die Erreichung des strategischen Handlungsfelds „Nachhaltigkeit“. Denn die Ziele „Gute Arbeit und Bildung“ sowie „Klimaschutz und die zirkuläre Wirtschaft“ bauen auf der Anwendung der neuen Methoden und Werkzeuge des Engineerings auf.

Abbildung 2: ASE deckt den gesamten Systemlebenszyklus ab



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Dumitrescu et al. 2021

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 formulierten Strategie. Die Transformation der Wertschöpfung erfordert die integrative Planung und Auslegung wandelbarer Systemverbünde, 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“)⁴⁹ sind statisch.

Ferner fehlt es an einer übergreifenden Betrachtung der vielfältigen Zusammenhänge zwischen Wertschöpfung, Produkten, Services und Aspekten wie Design, Marketing und Vertrieb 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, Kaufinteressenten oder Nutzende) adäquat abbilden. Dies gilt ebenso für modellbasierte Systembetrachtungen und daten- beziehungsweise informationsgetriebene Entwicklungsansätze für Industrie 4.0-Lösungen und die damit verbundenen datengetriebenen Geschäftsmodelle.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Grundmodell der Industrie 4.0-Wertschöpfungsauslegung** zur Modellierung der Zusammenhänge der betriebswirtschaftlichen Auslegung von Produktionssystemen, Produkten und Services zur Ermöglichung einer adaptiven und intelligenten Auslegung von Fabriken und Produktfunktionen über den gesamten Wertschöpfungsprozess hinweg. Hierbei fehlen insbesondere neue Verfahren und Methoden für datengetriebene Messungen und Wertschöpfungsbeiträge sowie die sich daran auszurichtenden Methoden zur Festlegung geeigneter Datenräume als Teil des Data Engineerings.

- **Baukasten zur Anwendung des Grundmodells** in der Praxis (zum Beispiel digitaler Planungstisch, adaptive Desktop-Cockpits)
- Entwicklung von **Konzepten** und **Verfahren** zur **Vernetzung** und zum **Austausch über Branchen und Domänen hinweg**:
 - Interdisziplinäres Arbeiten und Forschen mit anderen Fachdisziplinen (zum Beispiel Biotechnologie für biointegrierte Lösungen)
 - Übertragung von Industrie 4.0-Prinzipien in andere Branchen (individualisierte Produkte und Dienstleistungen)
 - Zusammenführen von Industrie 4.0-Prinzipien mit intelligenten Lösungen anderer Branchen zur Förderung einer domänenübergreifenden Vernetzung (Transport, Logistik, Verwaltung, Verkehrswesen etc.)

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. Da das potenzielle Risiko beim Einsatz von Test- und Experimentierräumen geringer ist als bei der Verwendung von Testkits, bieten sich erstere eher für risikoaverse Unternehmen sowie für umfangreichere Voruntersuchungen an. Testkits ermöglichen eine schnellere Übertragung in die Produktion und haben daher Vorteile bei Neuerungen, die weniger komplex und daher mit einem geringeren Risiko verbunden sind. Im Hinblick auf eine Stärkung der Innovationsleistung des Standorts Deutschland besteht 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

49 Das Business Model Canvas ist eine Methode zur Konkretisierung und Visualisierung eines Geschäftsmodells. Die Schlüsselfaktoren von Geschäftsmodellen 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).

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. Für eine ausführlichere Beschreibung des Themas Validierung siehe [Kapitel 3.3](#).

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, gleich welcher Art, in Anspruch zu nehmen. Dazu zählen unter anderem auch fehlende Regelungen für die Wahrung von Schutzrechten und Industriegeheimnissen. 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 in den verschiedenen Funktionsbereichen wie Vertrieb, Marketing, Finanzen, Recht) sowie anwendende und nutzende Privatpersonen erfolgen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Offene, cyber-physische Test- und Experimentierräume** zur Erprobung von Potenzialen und Einschränkungen bestehender methodischer Ansätze mit den Merkmalen beziehungsweise Möglichkeiten:
 - Abbildung flexibler und hochagiler Wertschöpfungsnetzwerke
 - Einbezug verschiedener an der Wertschöpfung beteiligter Stakeholder
 - Fokussierung auf einfache Handhabbarkeit und frühzeitige Absicherung hinsichtlich einer Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit aller Beteiligten
 - Erlebnis und Verständnis der neuesten Ansätze einer ganzheitlichen Betrachtung von Produkten und Services, PSS, Technologien, Softwarewerkzeugen, Methoden, Vorgehensweisen und Geschäftsmodellen
 - Entwicklung und Erprobung digitaler Aufbereitungen und neuer Interaktionsweisen mit symbiotischen und mit den Denkweisen der Menschen harmonisierenden kognitiven Vorgehensweisen, angepasst an die jeweils unterschiedlichen

Anforderungen verschiedener Anwendungen und der sie Nutzenden

- **Rahmenwerk zum Aufbau von Experimentier- und Datenräumen** als Möglichkeit für interessierte Unternehmen und Forschungspartner, das Zusammenspiel zwischen vernetzten technischen Systemen, der klassischen Wertschöpfung und den neuen Smart Services⁵⁰ zu verstehen, zu erleben und zu beeinflussen (zu den technologischen Anforderungen für Datenräume siehe [Kapitel 2.5](#))
- Entwicklung und Konzeption von **Testumgebungen zum frühzeitigen Prototyping** von cyber-physischen Systemen und damit verbundenen Smart Services und digitalen Zwillingskonzepten mit den Merkmalen beziehungsweise Möglichkeiten:
 - Konfiguration und Skalierung entsprechend den Aufgaben der Nutzenden
 - Erprobung der Potenziale und Einschränkungen bestehender methodischer Ansätze, eingesetzter Technologien, von Interaktions- und Anwendungsmöglichkeiten sowie des Anwendungsumfangs
- Entwicklung von **Testkits** für die Evaluation von Industrie 4.0-Vorhaben durch schnelle Implementierung und Pilotanwendung in der eigenen Fertigungsumgebung

3.3 Neue Methoden und Werkzeuge für die Industrie 4.0-Lösungsentwicklung

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. Die mittlerweile durch Sensortechnik stark aufgerüsteten Maschinen, Geräte und Produkte in Industrie 4.0 liefern immens viele Rohdaten bezüglich Verhalten und Betriebssituationen, die es zu erschließen gilt.⁵¹ Außerdem

⁵⁰ Vgl. acatech 2018.

⁵¹ Neben der standardmäßig in den Maschinen verbauten Sensortechnik können im Rahmen der Produktion insbesondere auch Maschinen mit zusätzlicher Sensorik (On-Machine beziehungsweise In-Process oder Off-Process) nachgerüstet werden, um Prozesse zu überwachen.

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 nur unzureichend. Zudem wird die Interaktion mit anderen Funktionsbereichen, etwa Vertrieb, Marketing und Entwicklung, nicht ausreichend berücksichtigt. Die Bedarfe umfassen hier sowohl Systemarchitekturen als auch die Erfassung, Analyse und Auswertung von Daten sowie daraus abgeleitete Handlungen.

Ein vielversprechender 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.⁵² Vor diesem Hintergrund erklärt es sich, dass KI ein wesentliches Differenzierungsmerkmal von ASE gegenüber dem klassischen Systems Engineering ist.

Die im Rahmen dieser Agenda bisher angedachten zwölf Rollen im Ökosystem von KI-Lösungen („End User“, „Application Provider“, „User“, „Data Supplier“, „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.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Neues Leitbild der Entwicklungssystematik für komplexe Systeme: **Advanced Systems Engineering**, unter anderem mit folgenden 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
 - Einbezug KI-basierter Lösungsansätze
- **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 produkt- und dienstleistungsentwicklungsspezifischer sowie produktionsspezifischer Prozesse; Übertragung solcher Modelle auf alle Lebensphasen im gesamten Produktlebenszyklus
- **Industrie 4.0-Entwurfssysteme** zur Beschreibung von intelligent vernetzten Systemen (CPS, respektive 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 Zwillings ermöglichen
 - Entwicklung und Etablierung von Ansätzen zur Validierung digitaler Zwillinge
 - 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 sowie zur Optimierung des Ressourcenverbrauchs
 - Modellierung hochvernetzter multidisziplinärer Techniksyste-me, inklusive der damit verbundenen Smart Services und den dafür benötigten Daten- und Informationsflüssen
 - Auslegung, Beschreibung und Simulation von funktionso-rientierten Sensor- und Aktor-Systemen als Modullösungen („Plug & Play“) für Industrie 4.0
- Erforschung der **Fähigkeiten des Data Engineerings**⁵³ (Datenbedarfe, Auslegung der benötigten Daten, Datensammlung, -verdichtung, -analyse, -visualisierung, -interpretation, -reduktion und -archivierung etc.) als eigenständige Disziplin und in enger Verbindung zum ASE, insbesondere für KMU

52 Vgl. BDVA/euRobotics 2019.

53 Data Engineering umfasst insgesamt acht Disziplinen. Vgl. Stark 2022.

- Entwicklung neuer Methoden und Ansätze zur Integration und Nutzung von **(hybrider) KI**, etwa in Anwendungen, die das Internet der Dinge mit KI-Technologien verbinden (siehe [Kapitel 2.2](#))
- **Industrie 4.0-Validierungs- und Verifikationsmodelle („Mock-ups“)** als interaktionsfähige Planungs- und Entscheidungsprototypen für Personen, die vernetzte Lösungen entwickeln, planen, analysieren oder darüber entscheiden; dienen jenseits klassischer Business Intelligence Dashboards und produktbeziehungswise Fabrik-DMUs zur Ablösung der bisher bekannten klassischen analogen Planungstische oder statischer Business Cockpits
- Simulation und Modellierung von **Industrie 4.0-Systemlösungen**, die auch in **unvorhersehbaren Situationen** fähig sind, erweiterte Ziele zu erreichen und zu erlernen⁵⁴
 - Modellierung der Verbindung komplexer Systeme, beispielsweise durch Systemmodelle
 - Simulation der Interaktion des Menschen mit Industrie 4.0-Lösungen durch KI-Modelle, kognitive Modelle und die Anpassung bisheriger Modelle und Tools
 - Integration von Realdaten (Messdaten) in Simulationsmodelle
- **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
 - Erstellung von Konzepten für einen allgemeinen Basisstandard, zur nachhaltigen Sicherstellung der Interoperabilität und der gemeinsamen Ausgestaltung der europäischen Souveränität
- Entwicklung neuer Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0, unter anderem zur Integration funktionaler und nichtfunktionaler Systemeigenschaften, für IT-Sicherheit, Nachhaltigkeit, Benutzerfreundlichkeit, Resilienz
- **Sichere dynamische Systems-of-Systems** (Engineering-Methoden, Architekturen, Qualitätssicherung, Laufzeittechnologie etc.)
- Methodischer Unterbau für die Ausrichtung von Industrie 4.0 auf **Life-Cycle- und Kreislaufwirtschaft** im Sinne einer Symbiose zwischen **Digitalisierung und Nachhaltigkeit**, zum Beispiel in einer Update-Factory
- Erforschung und Entwicklung **nachhaltiger Engineering- und Produktionsprozesse** mit gut aufeinander abgestimmten Methodenpaketen sowie einer umfassenden Methodik zur Entwicklung nachhaltiger Systeme („**Sustainability by Design**“) unter Berücksichtigung und Integration der Wechselwirkung mit anderen Zielen, wie Verlässlichkeit, Resilienz und Usability
- **Transfer des wissenschaftlichen Fundaments in die industrielle Praxis für eine integrative, Semantik erfassende Modellierungstheorie** innerhalb des gesamten Wertschöpfungsnetzwerks; insbesondere 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 verbundenen digitalen Werkzeugen aus der Informatik mit neuen digitalen Modellierungsverfahren für die Beschreibung der Vernetzung von CPS
- **Skalierbare, 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
- Entwicklung von „**No-Code-**“ sowie „**Low-Code-Industrie 4.0-Applikationen**“ für eine niederschwellige Befähigung von unterschiedlichen Beschäftigtengruppen, Funktionsbereichen, Qualifikationsniveaus und Hierarchiestufen, lokal verfügbare Daten analysieren zu können; erweiterte Datenanalysen sind im Zusammenspiel mit den klassischen Programmierumgebungen realisierbar

54 Für eine umfassende Erläuterung der hierfür benötigten Forschungs- sowie zusätzliche Entwicklungsbedarfe vgl. Forschungsbeirat/acatech (2021 d).

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 4.0⁵⁵ 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 praxisfähigen Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeugen 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 Fertigungskonzeptionen wie Lean Production selten hergestellt. Des Weiteren sind Wechselwirkungen zwischen Methoden, Werkzeugen 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 Betriebsmitteln und Produktionssystemen in den (verteilten) Fabriken, inklusive der damit verbundenen Material- und Informationslogistiken, abgeglichen werden.

Im 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 Systemdesign und Simulation.

Technologische Befähiger, wie die Cloud-Technologie, zunehmend rechenleistungsstarke und vernetzte eingebettete Systeme, Virtualisierungstechnologien, leistungsfähige Kommunikationstechnik wie die 5G-Netzwerktechnologie und nicht zuletzt KI und maschinelles Lernen, nehmen zunehmend Einfluss auf die Produktion und die damit verbundenen neuen Auslegungs- und Betreibermethoden und IT-Werkzeuge.

Der effiziente Einsatz von KI-Methoden, insbesondere von Methoden des maschinellen Lernens, in der Produktion erfordert die Schaffung einer flächendeckenden und skalierbaren Data Governance, die auch semantische Aspekte zur Interpretation von Daten und Wissensrepräsentationen für lernende Systeme in der Produktion berücksichtigt.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Erforschung beziehungsweise grundlegende konzeptionelle Erweiterung einer **einheitlichen Industrie 4.0-Semantik** zur Integration digitaler Modelle in Produktentwicklungs- und Produktionsprozesse (inklusive der zugehörigen Dienstleistungen) 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 und Modellierung **hochvernetzter multidisziplinärer Techniksysteme** der damit verbundenen Smart Services sowie zur Ermittlung der dafür benötigten Daten- und Informationsflüsse
- Systematisierung der **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

55 Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2022) für einen Einblick in die Landkarte Industrie 4.0.

- Sicherstellung von Echtzeitanforderungen während des Wandlungsprozesses
- Beschreibung der zu erwartenden Dynamiken der Adaption an sich ändernde technische Rahmenbedingungen oder Geschäftsprozesse
- Re-Optimierung der Zuordnung der Anwendungen mit ihren Rechen-, Speicher- und Kommunikationslasten auf die verfügbaren Ressourcen durch dynamisches Re-Deployment nach Wandlungsprozessen
- 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 Managementschichten in Form von Diensten, Anwendungen und Tools für ein verteiltes Betriebssystem
 - Architektur von Diensten, dynamische Allokation von Rechenressourcen, vom Edge Device bis hin zum High Performance Cluster im Back-End, und optimale Nutzung der Kommunikationsinfrastruktur
- Fähigkeit zur Ertüchtigung und zum Betrieb von **digitalen Plattformen für Industrie 4.0-Lösungen**, Aufbau und Symbiose branchenübergreifender Lösungen sowie Auslegung nach den Anforderungen heutiger und zukünftiger **Datensouveränität**
- Entwicklung von Metamodellen 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 (Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit und Vertraulichkeit)
- Systematisierung der **Übernahme der Simulationsmodelle aus der Auslegung in die Betriebsphase** (Simulationstechnik)
 - Ausbau von Vorführmodellen („Mock-ups“) zur visuellen Unterstützung bei der Planung und Bewertung von vernetzten Industrie 4.0-Lösungen

4 Arbeit, Unternehmen und Gesellschaft

Industrie 4.0 bringt einen tiefgreifenden Wandel für Arbeit,⁵⁶ Unternehmensorganisation und Gesellschaft mit sich. Dieser Wandel ist gesellschaftspolitisch und unternehmensstrategisch gestaltbar. Die zukünftige Forschung in diesem Feld soll einen Beitrag dazu leisten, das globale Ökosystem Industrie 4.0 erfolgreich und am Menschen orientiert aufzubauen. Ziel ist es, dass Beschäftigte Industrie 4.0 partizipativ mitgestalten 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. Unternehmen profitieren von diesen Innovationen und werden erst dadurch dazu befähigt, die Potenziale von Industrie 4.0 vollumfänglich zu erschließen. 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 sowie des organisationalen Wandels. Darüber hinaus bedarf es eines gesellschaftspolitischen Dialogs, der fortlaufend verschiedenste Interessen einbezieht und zu einem gemeinsamen Ziel vereint. Die Entwicklung von Industrie 4.0 kann somit an den Bedürfnissen der Menschen ausgerichtet werden und dazu beitragen, die gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit zu bewältigen. Dabei wird auch die Zielsetzung der Nachhaltigkeit verstärkt eine Rolle spielen. Die genannten sozialen und ökonomischen Ziele sollen gleichberechtigt und gleichwertig mit der ökologischen Zieldimension in Einklang gebracht werden. Der gesellschaftliche und politische Diskurs setzt hier die Rahmenbedingungen der Wertschöpfung.

Die in Kapitel 4 dargelegten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe beziehungsweise Dialogthemen können dazu beitragen, das Leitbild 2030 der Plattform Industrie 4.0 zu verwirklichen. Insbesondere Forschungsaktivitäten, die mit den Unterpunkten des Leitbilds „Gute Arbeit und Bildung“, „Gesellschaftliche Teilhabe“ und „Klimaschutz und zirkuläre Wirtschaft“ übereinstimmen, tragen zum strategischen Handlungsfeld der „Nachhaltigkeit“ bei. Darüber hinaus sind unter anderem Forschungsbedarfe zu rechtlichen Rahmenbedingungen wichtig für die Sicherheit beziehungsweise „Souveränität“ aber auch „Interoperabilität“ in der Gestaltung digitaler Ökosysteme für Industrie 4.0.

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 Rechtsunsicherheit hinsichtlich der Anwendbarkeit des Datenschutzrechts und der Vorgaben durch abwägungsbedürftige Generalklauseln. Dies bezieht sich auch auf neue Auswertungsmöglichkeiten durch den Einsatz von KI und hybrider Systeme. 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.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Weiterbildungsbedarfe** und Methoden zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für den Umgang mit faktischer und rechtlicher Unsicherheit in kurzen technischen Innovationszyklen sowie mit neuen Technologien, beispielsweise dem sogenannten Human Digital Twin
- **Regulierungsinstrumente zur Gewährleistung von IT-Sicherheit** in Industrie 4.0 auf nationaler und europäischer Ebene, einschließlich angemessener Steuerungsinstrumente für Unternehmen im besonderen öffentlichen Interesse
- **Rahmen beziehungsweise Ansatz zur rechtssicheren Gestaltung von Ökosystemen**

56 Vgl. Hirsch-Kreinsen 2020.

- Entwicklung von Kriterien für die **rechtsgemäße und rechtsverträgliche Gestaltung** der neuen **Technologien** und der **technisch-kadäquaten Fortbildung** des Rechts
- Entwicklung neuer Strategien zur **Erfassung und Weitergabe personenbezogener Daten** und der individuellen Leistungsüberwachung unter Wahrung der individuellen und kollektiven Interessen der Beschäftigten; Identifizierung von sinnvollen Möglichkeiten, aber auch ethischen und rechtlichen Grenzen personalisierter technischer Unterstützung und individueller Leistungsüberwachung bei unterschiedlichsten Arbeitsbedingungen

4.2 Kriterien menschenorientierter System- und Arbeitsgestaltung

Menschenorientierte Gestaltungskriterien, Systemgestaltung und -einführung, Stellenwert menschlicher Arbeit, Kollaborationsmuster Mensch und Maschine, juristische Fragen

Die Voraussetzung einer am Menschen orientierten Systemgestaltung ist ein ganzheitliches – soziale und technologische Dimensionen umfassendes – Verständnis von Industrie 4.0. Angesichts der Fortschritte im Kontext von Industrie 4.0 in den letzten Jahren kommt diesem Grundsatz nicht nur eine weiterhin zentrale Bedeutung für System- und Arbeitsgestaltung zu, sondern es stellen sich neue und kontinuierlich zu bewältigende Herausforderungen. Diese betreffen insbesondere die Nutzung autonomer Systeme im Zuge der „zweiten Welle“⁵⁷ der Digitalisierung, die es erforderlich machen, unterschiedliche Prozess- und Unternehmensbedingungen bei Forschung und Entwicklung zu berücksichtigen.

Zur menschenorientierten Arbeits- und Organisationsgestaltung bei der Implementierung von Industrie 4.0 bedarf es einer ganzheitlichen Strategie, die an die Bedürfnisse der Beschäftigten angepasst ist. Vielfach fehlen dafür bisher jedoch klare, vor allem domänenspezifische Kriterien und Methoden. Zu berücksichtigen sind hier die unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten bei verschiedensten Bedingungen, etwa in unterschiedlichen Beschäftigungssegmenten mit je spezifischen Qualifikationsniveaus. Darüber hinaus stellt die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion 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 – vor allem auch unter den Bedingungen der Nutzung von KI-basierten Systemen.

Es stellen sich zudem neue arbeitssituative Herausforderungen, die infolge eines übersteigerten Vertrauens in die autonomen Systeme („Complacency“) oder eines ständigen Wechsels zwischen Unter- und Überforderung („Vigilanz“) entstehen können. Daher ist bei der Kriterienerstellung für eine ganzheitliche Strategie 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 sowie ethische Fragestellungen 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. Ferner können dadurch Beiträge für die weitere Verwirklichung der Nachhaltigkeit – in Hinblick auf soziale Ziele – geleistet werden.

Forschungsbedarfe

- **Systematischer Entwurf von Gestaltungsprinzipien der Mensch-Maschine-Interaktion** und der Funktionsteilung zwischen technischem und personellem System bis hin zu vollkommen hybriden Formen sowie der Kontrollverteilung und optimalen komplementären Systemauslegung zwischen Mensch und Maschine
 - Gestaltung von hybriden **Teams aus Beschäftigten und kollaborativen Robotern in der Fertigung, neue Formen der Team-Robotik** unter der Leitung von menschlichem Fachpersonal, das mit Robotern **sicher zusammenarbeitet** und komplexe Fertigungsaufgaben löst
 - 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 oder bei Kollaborationen von Mensch und Maschine in automatisierten Entscheidungsprozessen; Klärung der rechtlichen Verantwortlichkeit im Außenverhältnis sowie innerhalb hybrider Konstellationen im Falle von haftungsrechtlich relevanten Schäden
- Konzepte und Methodenentwicklung zur Gewährleistung der kontinuierlichen kompetenten **Beteiligung der Beschäftigten an laufenden Veränderungs- und Innovationsprozessen**, soziale Einbindung bei der Systemgestaltung (unter Berücksichtigung von Industrie 4.0-Ansätzen wie dem Human Digital Twin), unter anderem in Hinblick auf:

57 Vgl. Interview mit Prof. Wolfgang Wahlster in Ciupek 2021.

- den Erhalt ihrer Kompetenzen und Erfahrungen
- die Weiterentwicklung ihrer Lern- und Handlungsfähigkeit
- **Überwindung arbeitssituativer Herausforderungen** aufgrund zunehmender Vernetzung und Kommunikation, etwa Fragestellungen nach der Sprache, in der Maschinen mit Menschen kommunizieren; nach dem Umgang mit Missverständnissen und nach der Sprache an sich (zum Beispiel Englisch, Deutsch, technische Sprachen, Abkürzungen etc.) sowie nach den sonstigen psychosozialen Veränderungen in hybriden Systemen und Teams
- **„Home-Workbenches“**, welche die mobile Steuerung, Wartung und Reparatur von Fabrikanlagen im Fernzugriff erlauben
- **Entwicklung domänenspezifischer, ganzheitlicher, soziotechnischer Gestaltungskriterien** für unterschiedliche Beschäftigtengruppen, Funktionsbereiche, Qualifikationsniveaus und Hierarchiestufen – unter Berücksichtigung von (unter anderem öffentlich geförderten) Gestaltungsprojekten von Arbeit
- Methoden und Verfahren einer **systematischen soziotechnischen Systemgestaltung und -einführung** für unterschiedliche Unternehmenstypen
- **Systematischer Entwurf von Gestaltungsprinzipien der Mensch-Maschine-Interaktion**, der Funktionsteilung zwischen technischem und personellem System bis hin zu vollkommen hybriden Formen sowie der Kontrollverteilung und optimalen komplementären Systemauslegung zwischen Mensch und Maschine. Zu berücksichtigen sind:
 - Gestaltungskriterien zur Erhaltung der Lern- und Erfahrungsfähigkeit der Menschen und der Systeme
 - Situationsadäquate Kollaborationsmuster zwischen Mensch und Maschine
- Entwicklung spezifischer menschenorientierter **Kriterien, Methoden und Best Practices für verschiedene Arten der Transformation von Produktionssystemen** – von vollkommen neuen Fabriken („Greenfield Projects“) bis hin zur Adaption bestehender Produktion („Brownfield Projects“)

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 auch in Zukunft angesichts der sich (auch infolge der Corona-Krise) beschleunigenden Digitalisierung als die zentralen Stellhebel, den digitalen Wandel sozial und ökonomisch erfolgreich zu bewältigen.⁵⁸ Die Dynamik des digitalen Wandels, insbesondere der Diffusion von KI, erfordert ein genaues und kontinuierlich erarbeitetes Wissen über zukünftige Kompetenzbedarfe in Unternehmen (Kompetenzmonitoring). Darüber hinaus sind die Voraussetzungen und Methoden des lebensbegleitenden Lernens zu fördern – sie sind unerlässlich, um im Zuge des technischen Fortschritts nicht abgehängt zu werden. Zudem besteht die Anforderung, dass die zunehmend komplexeren und selbststeuernden Systeme im Störfall stets den kompetenten Eingriff des Menschen benötigen. Doch auch im Bereich des Engineerings gilt es, Kompetenzen entsprechend des ASE-Leitbilds aufzubauen (vgl. [Kapitel 3.3](#)). Insgesamt ist es notwendig, durch entsprechende Methoden der Kompetenzentwicklung Erfahrungswissen zu sichern, weiterzuentwickeln und Tendenzen der Dequalifizierung infolge einer technikzentrierten Einführung autonomer Systeme zu vermeiden.

Das bestehende Bildungssystem fördert bisher noch zu wenig das lebensbegleitende Lernen. Die etablierten Weiterbildungsangebote können die komplexen Kompetenzentwicklungsbedarfe von Industrie 4.0 nicht ausreichend vermitteln. Gleichzeitig herrscht in den Unternehmen wenig Transparenz über den Bestand und den strategischen Bedarf an Kompetenzen. Schon verfügbares Wissen, zum Beispiel aus öffentlich geförderten Gestaltungsprojekten zur Kompetenzentwicklung, wird zu wenig genutzt und die Förderung von Digitalisierungsprojekten ist zu wenig auf Qualifizierungsfragen ausgerichtet.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Kontinuierliche **Analyse von zukünftigen Kompetenzbedarfen** (unter anderem im Kontext der technischen und interdisziplinären Weiterentwicklung) in Unternehmen, wobei unterschiedliche Prozess- und Unternehmenstypen sowie Job- und Tätigkeitsprofile Berücksichtigung finden müssen (Kompetenzmonitoring – auch personalisiert durch zukünftige Möglichkeiten des Human Digital Twin)
- Erforderliche **Rahmenbedingungen für neue Lernformen**, wie selbstorganisierte Lernpfade und -formate, kollaborative Lernformen, oder für die Integration informeller oder netzwerk-basierter Kompetenzentwicklung
- Entwicklung von **Arbeitsbedingungen**, die schwerpunktmäßig auf die erforderliche **kontinuierliche Weiterbildung** setzen
- Weiterentwicklung der Konzepte zur Integration des Industrie 4.0-Profiles und der Anforderungen im Umgang mit autonomen Systemen in das **duale System der Berufsausbildung**

58 Vgl. acatech 2016.

- Neue Anforderungen an **Kompetenzen** durch aktuelle Entwicklungen, wie dem Wandel von **Managementfunktionen und Führungsstilen** oder der gestiegenen Bedeutung von **Open Source** und **ökologischer Nachhaltigkeit**
- **Entwicklung von Kompetenzen** und Ansätzen des „**Managerial Sensemaking**“ zur Definition von (**digitalen**) **Geschäftsmodellen als Treiber der Nachhaltigkeit** in Industrie 4.0
- **Wertschöpfungsintegrierte Kompetenzentwicklung** mittels **cyber-physischer Assistenzsysteme** für die **menschzentrierte Kompetenzentwicklung**
- Gestaltung und Konzeption einer **In-Situ-Kompetenzerfassung** im Wertschöpfungsprozess und die **echtzeitnahe** Erfassung und Aktualisierung von **Kompetenzprofilen**
- Neue Anforderungen an **Kompetenzen** in Hinblick auf **ökologische Nachhaltigkeit**
- Entwicklung neuer 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
- Entwurf von Konzepten eines (Methoden-)Wandels von Bildungs- und Qualifizierungsprozessen hin zu Formen der **skalierbaren Nutzung digitaler Methoden**

4.4 Organisationaler Wandel

Organisation, Förderung von Akzeptanz, Mitbestimmung, Partizipationsformen, informelle Prozesse, Managementfunktionen, Führungsstile und -kulturen, Changemanagement

Für die erfolgreiche Implementierung von Industrie 4.0 sowie der damit verbundenen Geschäftsmodelle sind massive unternehmensinterne Anpassungen notwendig, die von der Arbeits- bis zur Führungsebene auch sämtliche Organisationsstrukturen umfassen können. Die Faktoren Akzeptanz,⁵⁹ Partizipation sowie Commitment der Mitarbeitenden, Führungskultur und Changemanagement sind dafür ausschlaggebend. Industrie 4.0 verändert tradierte Rollen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Führungskräften und Mitgliedern der Betriebsräte sowie deren Legitimation. Digitale Kommunikationsmedien machen Information und Wissen inner- und überbetrieblich transparenter. Führungsfunktionen differenzieren

sich auf verschiedenen Ebenen – hierarchisch, horizontal, im Netzwerk etc.– aus. Trends wie Agilität oder Start-up-Kultur überlagern dies zusätzlich. Insgesamt lässt sich konstatieren, dass eine mangelnde Ausprägung von Lessons Learned, eine fehlende adäquate Fehlerkultur sowie unzureichende Lösungen der Wissensspeicherung und des Wissenstransfers in der Organisation (insbesondere in global verteilten Unternehmen) wesentliche Gründe darstellen, warum viele Unternehmen nicht über den Prototypen-Status im Kontext von Industrie 4.0 hinauskommen. Es müssen nicht nur tradierte Denkweisen und Prozesse überwunden, sondern darüber hinaus durch geeignete Methoden des Changemanagements Umbrüche in Kultur und Organisationsstruktur von Unternehmen herbeigeführt werden. Ein adäquater Lösungsweg wird häufig in der organisationalen Ambidextrie gesehen.⁶⁰ 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 sowie vielversprechender Ansätze zu deren Bewältigung bleibt offen, warum die Praxis oftmals hinter den bestehenden Erkenntnissen zurückbleibt. Darüber hinaus fehlen weitere systematische Untersuchungen und positive Beispiele. Offen ist, wie die Faktoren Akzeptanz, Partizipation und Führungskultur die Einführung von Industrie 4.0 fördern oder hemmen. Außerdem 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.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- **Analyse des Wandels der Unternehmensorganisation aufgrund neuer Geschäftsmodelle und ihrer Öffnung hin zu neuen Partnern**; Stichworte sind der Wandel von Wertschöpfungsketten in digitalen Ökosystemen, Serviceorientierung, Kreislaufwirtschaft, Open Innovation, Open Source und Interdisziplinarität; Gestaltung der Unternehmensschnittstellen und neue Anforderungen an die betroffenen Beschäftigtengruppen
- Erschließung der Potenziale einer **kollaborativen Strategieentwicklung** und Transformation einer Branche durch Nutzung von **Industrieökosystemen** und **Wertschöpfungsplattformen**
- Untersuchung des **Wandels** der **Managementfunktionen** und **Führungsstile** im Zeitalter der hybriden Intelligenz aus Maschinen- und menschlicher Intelligenz (Leadership 4.0)
- Ansätze einer **strukturellen** und **organisationalen Ambidextrie** für Industrie 4.0, die es ermöglichen, dass das traditionelle

59 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019a.

60 Dabei werden in Anpassung an neue technologische Möglichkeiten oder Bedingungen neue Unternehmens- beziehungsweise Organisationseinheiten parallel zu den bestehenden Strukturen etabliert. Vgl. fortiss 2016.

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 **Changemanagements** (insbesondere in einer frühen Phase des Transformationsprozesses) und der **kulturellen Transformation**
- Entwicklung neuer **agiler Formen der Unternehmens- und Arbeitsorganisation sowie der Arbeits- und Lernkultur** unter systematischer Berücksichtigung verschiedener Rahmenbedingungen
- Unterschiedliche **Partizipationsformen der betrieblichen Mitbestimmung** im Hinblick auf neue Anforderungen für eine teilhabeorientierte sowie sachlich und zeitlich sinnvolle Gestaltung von Industrie 4.0, auch über Unternehmensgrenzen hinweg
- 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, Nachhaltigkeit

Der Wandel zu Industrie 4.0 betrifft die ganze Gesellschaft. Eine 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 beispielsweise gute Arbeit, Bildung oder Klimaschutz befördert werden können, ist vor allem auch eine Frage der Teilhabe – dazu können auch neue Formen der Stakeholder-Integration, zum Beispiel in Living Labs, eine wichtige Rolle spielen. Voraussetzung eines produktiven gesellschaftspolitischen Dialogs ist ein adressatengerechter

Erkenntnistransfer. Ziele sind die Aufklärung und Versachlichung der Diskussion. Ein gesellschaftspolitischer Dialog, der unterschiedliche Interessen ernst nimmt und die Partizipation und den Austausch vieler gesellschaftlicher Gruppen ermöglicht, ist unverzichtbar.

Um die wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und ökologischen Ziele von Industrie 4.0 im Kontext der durch industrielle KI ermöglichten „zweiten Welle“ der Digitalisierung zu erreichen, ist ebenfalls ein kontinuierlicher Dialog mit der Politik, den Sozialpartnern und der Zivilgesellschaft unabdingbar. Das Leitbild der Plattform Industrie 4.0 kann dabei als Vision dienen, um verschiedene Stakeholder für eine gemeinsame Mission und ein gemeinsames Ziel zu begeistern. Zum Beispiel könnte eine Wertorientierung an Nachhaltigkeit – statt bisher nur monetäre Anreize – Hemmungen beim Datenaustausch über Organisationsgrenzen hinweg abbauen helfen.

Dialogthemen

- **Soziale Chancen und Risiken** der sozioökonomischen Entwicklung durch den Wandel von Arbeitsmarktbedingungen, einschließlich der Beschäftigungsmöglichkeiten von gering qualifizierten Arbeitskräften
- **Sozialpolitische Gestaltung**, beispielsweise für eine (auch im europäischen Vergleich) gesamtgesellschaftliche Teilhabe an steigender Wertschöpfung; Zukunft der Mitbestimmung; Vermeidung zunehmender sozialstruktureller Polarisierung und sozialer Ungleichheit; kreative Modelle sozialpolitischer Regulation
- Steigerung der **Attraktivität von Industriearbeit, neue Formen von Arbeit** („New Work“), Ausgestaltung digital gestützter flexibler Arbeitsformen („Homeoffice“) und **neue Gestaltungsmöglichkeiten der Work-Life-Balance** aufgrund des Fachkräftemangels
- Voraussetzungen und Rahmenbedingungen zur **Umsetzung von New Work** auch auf **Shopfloor-Ebene**
- Die Bedeutung von Industrie 4.0 für das Erreichen **gesellschaftlicher Ziele, wie Nachhaltigkeit und Souveränität** (insbesondere Datenschutz versus neue technologische Anwendungsfelder und -möglichkeiten); die Anforderungen von Nachhaltigkeit und Souveränität an Industrie 4.0

Zusammenfassung

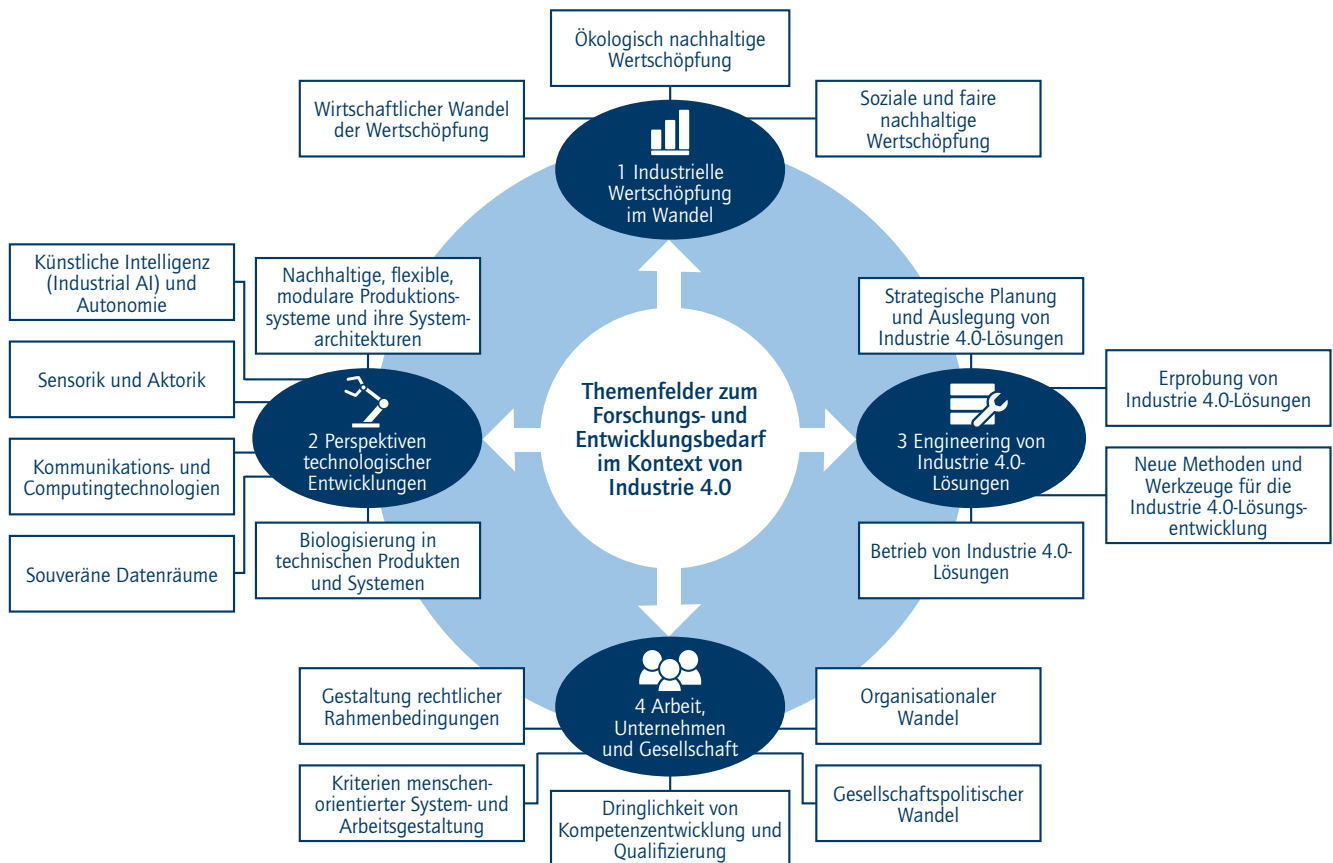
Mit der Herausarbeitung des aktuellen wie zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0 zielt der Forschungsbeirat als unabhängiges und strategisches Beratungsgremium darauf ab, einen wichtigen Beitrag zur Sicherung des Wirtschaftsstandorts Deutschland im Zuge der digitalen Transformation zu leisten und die souveräne Rolle Deutschlands als Leitmarkt und -anbieter von Industrie 4.0-Lösungen zu festigen. Industrie 4.0 ist für die Realisierung gesellschaftspolitischer Ziele, wie Nachhaltigkeit und Resilienz, essenziell. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in diesem Bereich sind deshalb grundlegend, um Auswirkungen der Klimakrise oder von Pandemien und internationalen Konflikten bewältigen zu können und die Zukunftsfähigkeit Deutschlands als Industriestandort zu festigen.

Definiert werden vier spezifische Themenfelder, die den aktuellen Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten kategorisieren. Bereits im Jahr 2019 hatte der Forschungsbeirat erste Themenfelder veröffentlicht, die nun aktualisiert und ergänzt worden sind, um den technischen, ökonomischen und institutionellen Entwicklungen seitdem Rechnung zu tragen. Innerhalb der jeweiligen Themenfelder erfolgt eine Darstellung des Status quo, einschließlich der

sich gegenwärtig abzeichnenden Defizite. Daneben werden inhaltliche Bezüge zum Leitbild der Plattform Industrie 4.0 aufgezeigt. Die sich daraus ableitenden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe werden für jedes Themenfelds konkretisiert. Die nachfolgende Grafik verdeutlicht die Systematik der identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe.

Das erste Themenfeld „Industrielle Wertschöpfung im Wandel“ definiert den Forschungs- und Entwicklungsbedarf primär aus ökonomischer Sicht und zeigt dabei den umfassenden Transformationsprozess im Zuge der Umsetzung von Industrie 4.0 auf. Vor dem Hintergrund des wirtschaftlichen Wandels der Wertschöpfung werden die zu überwindenden Herausforderungen im Kontext der Realisierung der Plattformökonomie, der Gestaltung und Implementierung von Geschäftsnetzwerken und Ökosystemen sowie der zunehmenden Komplexität, Interdisziplinarität und Autonomie von Produkten und Lösungen hervorgehoben. In diesem Kontext erfolgt ebenfalls eine Darstellung der Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur Konzeption und Umsetzung innovativer, datenbeziehungswise wissensgetriebener Geschäftsmodelle, auch unter Einsatz neuer Finanztechnologien. Aus der Perspektive einer ökologisch nachhaltigen Wertschöpfung werden hingegen die

Abbildung 3: Themenfelder zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Kontext von Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für die vertikale und horizontale Integration zur Verminderung der Ressourcenverbräuche beziehungsweise Emissionen und zur Steigerung der Energieeffizienz sowie des Einsatzes erneuerbarer Energien fokussiert. Die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur Realisierung einer sozialen und fairen nachhaltigen Wertschöpfung richten sich schließlich insbesondere auf ethische Grundsätze beim Aufbau und beim Betreiben von Wertschöpfungsnetzwerken.

Im zweiten Themenfeld erfolgt die Ableitung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs im Kontext der „Perspektiven technologischer Entwicklungen“. Der Schwerpunkt liegt hier einerseits auf nachhaltigen, flexibel und modular konfigurierbaren Produktionssystemen und ihrer Systemarchitekturen und andererseits auf den maßgeblichen technologischen Treibern. Dabei werden wesentliche Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in den Bereichen Industrial AI und Autonomie, Sensorik und Aktorik, Kommunikations- und Computingtechnologien, souveräne Datenräume sowie Biologisierung in technischen Produkten und Systemen identifiziert.

Das „Engineering von Industrie 4.0-Lösungen“ bildet die dritte Themenfeld-Kategorie. Dort wird konkreter Forschungs- und Entwicklungsbedarf vor allem in neuen Methoden und Werkzeugen für die Industrie 4.0-Lösungsentwicklung gesehen. Darüber hinaus erfolgt eine Differenzierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs nach strategischer Planung und Auslegung, Erprobung sowie dem Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen.

Das vierte Themenfeld „Arbeit, Unternehmen 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 und Qualifizierung und den organisationalen Wandel. 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 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 – so wie bisher – auch in 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.⁶¹

61 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019b.

Literatur

acatech 2016

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Kompetenzen für Industrie 4.0 – Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze* (acatech POSITION), München: Herbert Utz Verlag 2016. URL: <https://www.acatech.de/publikation/kompetenzen-fuer-industrie-4-0-qualifizierungsbedarfe-und-loesungsansaetze/download-pdf/?lang=de> [Stand: 25.02.2022].

acatech 2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Smart Service Welt 2018: Wo stehen wir? Wohin gehen wir?*, 2018. URL: www.acatech.de/publikation/smart-service-welt-2018-wo-stehen-wir-wohin-gehen-wir/download-pdf/?lang=de [Stand: 25.02.2022].

Bauernhansl et al. 2019

Bauernhansl, T./Brecher, C./Drossel, W.-G./Gumbsch, P./ten Hompel, M./Wolperdinger, M. (Hrsg.): *Biointelligenz: eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung: Ergebnisse der Voruntersuchung zur biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (Biotrain)*, Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2019. URL: www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/BIOTRAIN-Voruntersuchung.pdf [Stand: 24.05.2022].

Bergs et al. 2020

Bergs, T./Schwaneberg, U./Barth, S./Hermann, L./Grunwald, T./Mayer, S./Biermann, F./Sözer, N.: „Application Cases of Biological Transformation in Manufacturing Technology“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 2020, S. 68-77.

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. URL: https://futurium.ec.europa.eu/system/files/ged/ai_ppp_srida-consultation_version-june-2019_-_online_v1.3.pdf [Stand: 17.06.2022].

Bloomberg 2022

Bloomberg: *NFT Market Surpassed \$40 Billion in 2021, New Estimate Shows*, 2022. URL: www.bloomberg.com/news/articles/2022-01-06/nft-market-surpassed-40-billion-in-2021-new-estimate-shows [Stand: 30.05.2022].

Bonfiglio 2021

Bonfiglio, F.: *GAIA-X: Vision & Strategy*, 2021. URL: <https://gaia-x.eu/sites/default/files/2021-12/Vision%20%26%20Strategy.pdf> [Stand: 16.12.2021].

Boston Consulting Group 2021

Boston Consulting Group: *Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*, Gutachten für den BDI, Oktober 2021. URL: <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf> [Stand: 17.06.2022].

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)(Hrsg.): *Weißer Biotechnologie – Chancen für eine biobasierte Wirtschaft*, 2015. URL: www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/pdf/weisse-biotechnologie.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Stand: 30.05.2022].

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2021

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)/Referat Zukunft von Arbeit und Wertschöpfung; Industrie 4.0 (Hrsg.): *Zukunft der Wertschöpfung. Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit*, 2021. URL: www.zukunft-der-wertschoepfung.de/files/BMBF_Broschure_Zukunft_Wertschoepfung_n-Vorwort.pdf [Stand: 25.02.2022].

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): „Deutsche Klimaschutzpolitik“, 2022. URL: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html#:~:text=Am%2024.06.2021%20hat%20der,Minderungsziel%20von%20minus%2055%20Prozent [Stand: 25.04.2022].

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.

Byrne et al. 2018

Byrne, G./Dimitrov, D./Monostori, L./Teti, R./van Houten, F./Wertheim, R.: „Biologicalisation: Biological Transformation in Manufacturing“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, 2018, S. 1-32.

Catena-X 2022

Catena-X: *Catena-X – The First Open and Collaborative Data Ecosystem*, 2022. URL: https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/Vereinsdokumente/Catena-X_UEbersicht.pdf [Stand: 07.07.2022].

Ciupek 2021

Ciupek, M.: „Industrielle KI erlaubt die zweite Welle der Digitalisierung“. In: *VDI-Nachrichten* (01.04.2021). URL: www.vdi-nachrichten.com/technik/informationstechnik/industrielle-ki-erlaubt-die-zweite-welle-der-digitalisierung/ [Stand: 25.02.2022].

Dumitrescu et al. 2021

Dumitrescu, R./Albers, A./Riedel, O./Stark, R./Gausemeier, J. (Hrsg.): *Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft, Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering*, 2021. URL: www.advanced-systems-engineering.de/documents/20210602_ASE_Engineering_in_Deutschland.pdf [Stand: 25.02.2022].

Europäische Kommission 2022

Europäische Kommission: *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und Rates über harmonisierte Vorschriften für einen fairen Datenzugang und eine faire Datennutzung (Datengesetz): COM(2022) 68 final*, 2022. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022PC0068&from=DE> [Stand: 24.05.2022].

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. URL: www.vdi.de/news/detail/ki-und-autonome-systeme-10-offene-fragen [Stand: 25.02.2022].

Fleischer et al. 2021

Fleischer, J./Albers, A./Anderl, R./Aurich, J. (Hrsg.): *5G in der Industrie. Wege in die Technologieführerschaft in Produktentwicklung und Produktion* (acatech IMPULS), München. URL: www.acatech.de/publikation/5g-in-der-industrie/download-pdf/?lang=de [Stand: 25.02.2022].

Forschungsbeirat et al. 2018

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/Abramovici, M. (Hrsg.): *Engineering smarter Produkte und Services*, 2018. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-fb-smart.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 17.06.2022].

Forschungsbeirat/acatech 2019a

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Akzeptanz von Industrie 4.0*, 2019. URL: <https://www.acatech.de/publikation/akzeptanz-und-attraktivitaet-in-der-industriearbeit-4-0/download-pdf/?lang=de> [Stand: 17.06.2022].

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 agiles und flexibleres Innovationssystem in Deutschland*, 2019. URL: www.acatech.de/publikation/memorandum-des-forschungsbeirats/download-pdf/?lang=de [Stand: 17.06.2022].

Forschungsbeirat/acatech 2021a

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Kommuniqué. Spitzendialog des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 am 16. Juni 2021*, 2021. URL: www.acatech.de/wp-content/uploads/2021/06/2021_Spitzendialog_Kommunique.pdf [Stand: 25.02.2022].

Forschungsbeirat/acatech 2021b

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Industrie 4.0 – Forschung für die Gestaltung der Zukunft*, 2021. URL: www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-forschung-fuer-die-gestaltung-der-zukunft/download-pdf/?lang=de [Stand: 25.02.2022].

Forschungsbeirat/acatech 2021c

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Wertschöpfungsnetzwerke in Zeiten von Infektionskrisen* (Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0), 2021. URL: www.acatech.de/publikation/wertschoepfungsnetzwerke-in-zeiten-von-infektionskrisen-expertise/download-pdf/?lang=de [Stand: 25.04.2022].

Forschungsbeirat/acatech 2021d

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Modellierungs- und Simulationsbedarfe der intelligenten Fabrik* (Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0), 2021. URL: <https://www.acatech.de/publikation/modellierungs-und-simulationsbedarfe-der-intelligenten-fabrik-expertise/download-pdf/?lang=de> [Stand: 29.04.2022].

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. URL: https://download.fortiss.org/public/digitale_transformation/digitale_transformation_de_gesamt.pdf [Stand: 25.02.2022].

Full et al. 2019

Full, J./Miehe, R./Kiemel, S./Bauernhansl, T./Sauer, A.: „The Biological Transformation of Energy Supply and Storage – Technologies and Scenarios for Biointelligent Value Creation“. In: *Procedia Manufacturing*, 39, 2019, S. 1204-1214.

Gartner 2022

Gartner: *Gartner Glossary – Big Data*, 2022. URL: www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data [Stand: 30.05.2022].

Green House Gas Protocol 2022

Green House Gas Protocol: *About us*, 2022. URL: <https://ghgprotocol.org/about-us> [Stand: 29.05.2022].

Heise Online 2022

Heise Online: *Gigantisches Wachstum: 2021 mit NFTs 25 Milliarden US-Dollar umgesetzt*, 2022. URL: www.heise.de/news/Gigantisches-Wachstum-2021-mit-NFTs-25-Milliarden-US-Dollar-umgesetzt-6323600.html [Stand: 29.05.2022].

Hirsch-Kreinsen 2020

Hirsch-Kreinsen, H.: *Digitale Transformation von Arbeit. Entwicklungstrends und Gestaltungsansätze*. Stuttgart: Kohlhammer 2020.

IDTA 2022

Industrial Digital Twin Association e.V. (IDTA): *IDTA – Der Standard für den Digitalen Zwilling*, 2022. URL: <https://industrialdigitaltwin.org/> [Stand: 24.05.2022].

Lanza et al. 2018

Lanza, G./Nyhuis, P./Fisel, J./Jacob, A./Nielsen, L./Schmidt, M./Stricker, N.: *Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0* (acatech Studie), München: Herbert Utz Verlag 2018. URL: www.acatech.de/publikation/wandlungsaehige-menschenzentrierte-strukturen-in-fabriken-und-netzwerken-der-industrie-4-0/download-pdf/?lang=de [Stand: 30.05.2022].

MDS 2022

Mobility Data Space (MDS): *Mobility Data Space*, 2022. URL: <https://mobilitydataspace.eu/de> [Stand: 29.05.2022].

Meier/Uhlmann 2017

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

Meudt et al. 2017

Meudt, T./Pohl, M./Metternich, J.: *Die Automatisierungspyramide – Ein Literaturüberblick*, 2017. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/6298/1/2017%20Die%20Automatisierungspyramide%20-%20Ein%20Literatur%3%BCberblick-2.pdf> [Stand: 29.05.2022].

Miehe et al. 2018

Miehe, R./Bauernhansl, T./Schwarz, O./Traube, A./Lorenzoni, A./Waltersmann, L./Full, J./Horbelt, J./Sauer, A.: „The Biological Transformation of the Manufacturing Industry – Envisioning Biointelligent Value Adding“. In: *Procedia CIRP*, 72, 2018, S. 739–743.

Miehe et al. 2019

Miehe, R./Fischer, E./Berndt, D./Herzog, A./Horbelt, J./Full, J./Bauernhansl, T./Schenk, M.: „Enabling Bidirectional Real Time Interaction between Biological and Technical Systems: Structural Basics of a Control Oriented Modeling of Biology-Technology-Interfaces“. In: *Procedia CIRP*, 81, 2019, S. 63–68.

Miehe et al. 2020

Miehe, R./Bauernhansl, T./Beckett, M./Brecher, C./Demmer, A./Drossel, W. G./Elfert, P./Full, J./Hellmich, A./Hinlage, J./Horbelt, J./Jutz, G./Krieg, S./Maufroy, C./Noack, M./Sauer, A./Schließmann, U./Scholz, P./Schwarz, O./ten Hompel, M./Wrycza, P./Wolperdinger, M.: „The Biological Transformation of Industrial Manufacturing – Technologies, Status and Scenarios for a Sustainable Future of the German Manufacturing Industry“. In: *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 2020, S. 50–61.

Miehe et al. 2021

Miehe, R./Buckreus, L./Kiemel, S./Sauer, A./Bauernhansl, T.: „A Conceptual Framework for Biointelligent Production – Calling for Systemic Life Cycle Thinking in Cellular Units“. In: *Clean Technologies*, 3:4, 2021, S. 844–857.

Nyhuis et al. 2008

Nyhuis, P./Reinhart, G./Abele, E. (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme – Heute die Industrie von morgen gestalten*, Garbsen: TEWISS/PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008.

Plattform Industrie 4.0 2019a

Plattform Industrie 4.0: *POSITIONSPAPIER. Leitbild 2030 für Industrie 4.0 – Digitale Ökosysteme global gestalten*, 2019. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Positionspapier%20Leitbild.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [Stand: 25.02.2022].

Plattform Industrie 4.0 2019b

Plattform Industrie 4.0: *Leitbild 2030 für Industrie 4.0. Digitale Ökosysteme global gestalten*, 2019. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Leitbild-2030-f%C3%BCr-Industrie-4.0.pdf?__blob=publicationFile&v=11 [Stand: 25.02.2022].

Plattform Industrie 4.0 2019c

Plattform Industrie 4.0: *Die Verwaltungsschale im Detail – von der Idee zum implementierbaren Konzept*, 2019. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-pr%C3%A4sentation.pdf?__blob=publicationFile&v=14 [Stand: 29.05.2022].

Plattform Industrie 4.0 2019d

Plattform Industrie 4.0: *Technologieszenario „Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0“* (Working Paper), 2019. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KI-industrie-40.pdf?__blob=publicationFile&v=16 [Stand: 29.05.2022].

Plattform Industrie 4.0 2021

Plattform Industrie 4.0: *POSITIONSPAPIER. Der Datenraum Industrie 4.0 – Die Plattform Industrie 4.0 lädt ein, die digitalen Ökosysteme von morgen zu gestalten*, 2021. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/PositionPaper-DataSpace.pdf?__blob=publicationFile&v=7 [Stand: 29.05.2022].

Plattform Industrie 4.0 2022

Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.): *Landkarte Industrie 4.0*, 2022. URL: www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/karte-anwendungsbeispiele-formular.html [Stand: 25.02.2022].

Sandner 2022

Sandner, P.: *Tokenization Of Industrial Goods: ‚Tractor-As-A-Token‘*, Forbes. URL: www.forbes.com/sites/philipsandner/2022/01/11/tokenization-of-industrial-goods-tractor-as-a-token/ [Stand: 11.01.2022].

Schmidt 2016

Schmidt, F. A.: *Arbeitsmärkte in der Plattformökonomie – Zur Funktionsweise und den Herausforderungen von Crowdwork und Gigwork*, 2016. URL: <https://library.fes.de/pdf-files/wiso/12826.pdf> [Stand: 07.07.2022].

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*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2019. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1 [Stand: 29.04.2022].

Stark 2022

Stark, R.: *Virtual Production Creation in Industry. The Difficult Transformation from IT Enabler Technology to Core Engineering Competence*, Heidelberg: Springer Verlag 2022.

Trapp et al. 2020

Trapp, M./Naab, M./Rost, D./Nass, C./Koch, M./Rauch, B.: „Digitale Ökosysteme: Welche Herausforderungen stellt der Aufbau und wie gelingt er?“. In: *Informatik Aktuell* (23.06.2020). URL: <https://www.informatik-aktuell.de/management-und-recht/digitalisierung/digitale-oekosysteme-welche-herausforderungen-stellt-der-aufbau-und-wie-gelingt-er.html> [Stand: 29.04.2022].

Umweltbundesamt 2021

Umweltbundesamt: *Treibhausgas-Emissionen*, März 2021. URL: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen [Stand: 15.03.2022].

VDI/VDE 2016

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): *Digitale Chancen und Bedrohungen – Geschäftsmodelle für Industrie 4.0* (Statusreport), 2016. URL: www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/geschaeftsmodelle-fuer-industrie-40-digitale-chancen-und-bedrohungen [Stand: 07.07.2022].

Wieland/Wallenburg 2013

Wieland, A./Wallenburg, C.: „The Influence of Relational Competencies on Supply Chain Resilience: A Relational View“. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43: 3, 2013, S. 300–320.

Mitglieder des Forschungsbeirats

Vertreterinnen und Vertreter der Wissenschaft

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

Vertreterinnen und Vertreter der Industrie

Klaus Bauer, TRUMPF Werkzeugmaschinen SE & Co. KG
Dr. Jan-Henning Fabian, ABB AG
Dr. Ursula Frank, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG
Dr. Christina Franke, Robert Bosch GmbH
Dietmar Goericke, VDMA – Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e.V.
Prof. Torsten Kröger, Intrinsic
Dr. Uwe Kubach, SAP SE
Prof. Peter Post, Festo AG & Co. KG
Dr. Harald Schöning, Software AG
Dr. Georg von Wichert, Siemens AG
Dr. André Walter, Airbus Operations GmbH

