

FORSCHUNGSBEIRAT



Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0

Modellierungs- und Simulationsbedarfe der intelligenten Fabrik

Impressum

Herausgeber

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

Projektbüro

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und
Konstruktionstechnik (IPK):
Marvin Manoury, Jörg Brünnhäuser
Dr. Andreas Geiger, Dr. Kai Lindow

Technische Universität Berlin:
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Koordination

Lisa Hubrecht, acatech
Simon Litsche, acatech

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

Adobe Stock (Titel)
KUKA AG

Stand

Dezember 2021



Plattform Industrie 4.0



acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

 **Fraunhofer**
IPK

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

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

- Wertschöpfungsnetzwerke
- Technologische Wegbereiter
- Neue Methoden und Werkzeuge
- Arbeit und Gesellschaft

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

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

Inhalt

Kurzfassung	3
1. Einleitung.....	4
2. Methodisches Vorgehen	5
3. Analyseergebnisse relevanter Arbeiten	7
3.1. Grundlagen und Definitionen	7
3.2. Industrie 4.0-Fähigkeiten in der Literatur.....	12
3.3. Modellierungs- und Simulationsbedarfe sowie Partiallösungen	14
4. Ergebnisse der Interviews	16
4.1. Umgesetzte und angestrebte Industrie 4.0-Fähigkeiten	16
4.2. Genutzte und benötigte Modelle und Simulationen	18
4.3. Benannte Optimierungspotenziale für Modellbildung und Simulation	21
4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse	22
5. Interpretation der Ergebnisse	23
5.1. Reifegrade von Industrie 4.0-Fähigkeiten	23
5.2. Diskussion von Optimierungspotenzialen der Modellierung und Simulation.....	25
5.3. Beantwortung der Forschungsfragen	26
5.4. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe.....	28
6. Zusammenfassung und Ausblick	30
Anhang.....	31
Anhang A: Modellklassen und Charakteristika	31
Anhang B: Interviewleitfaden.....	32
Anhang C: Clusterung der Industrie 4.0-Fähigkeiten laut Literaturanalyse	34
Anhang D: Gesamtheit der Industrie 4.0-Fähigkeiten mit aktuellem Stand der Nutzung und Untersuchung.....	35
Literatur	36
An den Interviews beteiligte Expertinnen und Experten	39
Mitglieder des Forschungsbeirats	39

Kurzfassung

Getrieben durch die transformative Digitalisierung durchdringen Informations- und Kommunikationstechnologien zunehmend alle Lebensbereiche und Produkte. Dabei entstehen Mehrwerte nicht mehr primär durch das singuläre cyber-physische Produkt- beziehungsweise Produktionssystem, sondern durch dessen synergetische und dynamische Vernetzung zu und Interaktion mit hochwertigeren, intelligenten Systemen. Das Zielbild von Industrie 4.0 ist die intelligente Fabrik, in der Maschinen, Bauteile, Werkstücke und Menschen Informationen direkt und in Echtzeit untereinander austauschen, um die Produktion optimal an sich verändernde Rahmenbedingungen anzupassen. Dafür benötigen zukünftige Industrie 4.0-Systemlösungen „intelligente“ Fähigkeiten, die es ihnen erlauben, auf unvorhersehbare Situationen reagieren zu können. Zu diesen sogenannten Industrie 4.0-Intelligenzen gehören systemische Interaktionen, neuartige Steuerungen und datenbezogene Analytiken sowie deren vernetzte Kombination. Die Vorabauslegung und der sichere Betrieb solcher intelligenten Industrie 4.0-Anwendungen erfordern Modellbildung und Simulation.

Die vorliegende Expertise beschäftigt sich mit bestehenden und erforderlichen Ansätzen der Modellierung und Simulation für Industrie 4.0-Intelligenzen. Es wird untersucht, welche Reifegrade von Industrie 4.0-Fähigkeiten damit erfasst, unterstützt oder erst ermöglicht werden und welche Vorhersagen realisierbar sind. Daran schließt sich die Frage an, welcher Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Modellbildung und Simulation besteht, um Industrie 4.0-Systemlösungen mit inhärenten Industrie 4.0-Intelligenzen künftig auslegen und betreiben zu können.

Die Analyse der einschlägigen Fachliteratur sowie eine Befragung von Expertinnen und Experten vermitteln Einblicke in beherrschte und angestrebte Industrie 4.0-Fähigkeiten sowie die zugehörigen Modellierungs- und Simulationstheorien in den Bereichen strategische Planung und Auslegung, Erprobung, Engineering, Betrieb und Kompetenzmanagement von Industrie 4.0-Lösungen. Es zeigt sich, dass gegenwärtig benötigte Industrie 4.0-Fähigkeiten für den Betrieb schon gut durch Modellierung und Simulation unterstützt werden, beispielsweise durch digitale Zwillinge. Verbesserungen wünschen sich die befragten Expertinnen und Experten im Bereich der Erprobung durch die Kombination von virtuellen Modellen mit realen Daten beziehungsweise die direkte Verknüpfung von Modell mit physischem Aufbau. Noch nicht gelöst ist nach Ansicht der Interviewten die semantische Anreicherung für das Mapping von realen Daten und virtuellen Modellen sowie die Simulationskopplung. Auch eine Betrachtung im Systemverbund sehen viele Interviewte als Verbesserungspotenzial. Dafür wäre die Verknüpfung beispielsweise über Systemmodelle erforderlich, die alle Elemente

der Lösung miteinander vereinen. Das Kompetenzmanagement für Industrie 4.0-Lösungen wird von den Befragten bisher dagegen kaum als Bereich benötigter Industrie 4.0-Fähigkeiten gesehen.

Unterteilt man Industrie 4.0-Fähigkeiten hinsichtlich des Umfangs der beteiligten Systemelemente in verschiedene Komplexitätsgrade, lässt sich feststellen, dass für den niedrigsten Grad der Industrie 4.0-Fähigkeiten bereits Modellierungs- und Simulationsansätze existieren. So befindet sich zum Beispiel die prädiktive Instandhaltung auf Basis der Erfassung und Visualisierung von Zuständen einer Industrie 4.0-Lösung mittels bestehender Modellierungsansätze zu Geometrie-, Informations- und Zustandsmodellen bereits vermehrt in der industriellen Umsetzung. Für den höchsten Komplexitätsgrad, der die Befähigung der Integration von Menschen in Industrie 4.0-Systemlösungen umfasst, sind vorhandene Ansätze der Modellierung und Simulation, wie zum Beispiel Kompetenzmodelle oder kognitive Modelle, aktuell nicht ausreichend erforscht und stehen der Industrie nicht zur Verfügung. Das gilt auch für mittlere Komplexitätsgrade angestrebter Industrie 4.0-Fähigkeiten. In der Modellbildung und Simulation sind die hier benötigten gekoppelten, hybriden und übergreifend neutralen Simulationen bislang nicht ausreichend entwickelt. Die Kopplung von klassischen objektbezogenen Simulationen über Co-Simulationen ist aktuell bereits verstärkt in der industriellen Umsetzung. Co-Simulationen sind jedoch noch immer sehr aufwendig in der Erstellung und bringen deshalb nur begrenzten Nutzen. Für die Umsetzung komplexer Industrie 4.0-Intelligenzen sind sie noch nicht ausreichend geeignet. Für hybride Simulationen der neuen, angestrebten Industrie 4.0-Intelligenzen mangelt es aktuell noch an einer ausgereiften Verbindung der verschiedenen Modelle, Daten und der Datenanalytik. Die Semantik spielt bei der Befähigung solcher hybriden Simulationen eine wesentliche Rolle.

Als herausragende Forschungs- und Entwicklungsthemen für die Befähigung zur Simulation von Industrie 4.0-Intelligenzen identifiziert die Expertise die Verbindung komplexer Systeme zur Analyse des Gesamtsystems, die semantische Verknüpfung von Modell- und Realdaten, die Integration des Menschen und seine Interaktion mit Industrie 4.0-Lösungen sowie die Integration von Realdaten und ihrer Auswertungen für adaptive Simulationen.

Diese Themen sollten durch Grundlagenforschung, Verbundforschung und Verbundforschung in Forschungsclustern bearbeitet werden, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie im Zukunftsmarkt der intelligenten Fabriken zu stärken. Die Simulationsfähigkeit von Industrie 4.0-Intelligenzen ist entscheidend für die bedarfsgerechte Auslegung und den sicheren Betrieb solcher zukünftiger kontextbewusster Industrie 4.0-Systemlösungen.

1. Einleitung

In der produzierenden Wirtschaft ist der Wandel der industriellen Wertschöpfung im Zuge der Digitalisierung unter dem Begriff „Industrie 4.0“ zusammengefasst.¹ Das Zielbild der Industrie 4.0 ist die intelligente Fabrik, in der Systeme, Maschinen, Bauteile, Werkstücke und Menschen miteinander vernetzt sind und Informationen untereinander austauschen, die der Anpassung und Optimierung von Produktionsprozessen dienen. Durch die Vernetzung werden neue Formen der Interaktion, Steuerung, Analyse und Weiterentwicklung von technischen Systemen ermöglicht.

Die Nutzung von Industrie 4.0-Lösungen setzt eine systematische Planung, Konzipierung, Entwicklung und Erprobung der zugrundeliegenden technischen Systeme voraus. Produzierende Unternehmen müssen dafür wie für den sicheren Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen bestimmte Fähigkeiten beherrschen und einsetzen. Dabei helfen ihnen Ansätze der Modellierung und Simulation, die in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen müssen. Die Erforschung der methodischen Grundlagen zur Modellierung und Simulation erfolgt an den Hochschulen. In Forschungskooperationen mit Industrieunternehmen wird anschließend an implementierbaren Lösungen gearbeitet.

Als zentrale Befähiger sind dabei die auf den unterschiedlichen Ebenen für die Umsetzung von Industrie 4.0 genutzten digitalen oder virtuellen Modelle sowie Datenströme zu nennen. Beispiele hierfür sind Modelle digitaler Zwillinge, multidisziplinäre Simulationsmodelle oder Metadaten- und Informationsmodelle sowie die aus Datenströmen zu extrahierenden Analytikalküle. Während für die gängigen Modelle in der Produktentwicklung eine Vielzahl an Simulationsmethoden existiert,² sind benötigte Modellierungs- und Simulationstheorien für die systemische Abbildung von Industrie 4.0 bisher nur rudimentär ausgeprägt. Ihre Umsetzung erfolgt lediglich prototypisch.

Um eine resiliente und effiziente Produktion in der intelligenten Fabrik umsetzen zu können, müssen die Industrie 4.0-Systemelemente in Echtzeit interagieren. Eine Herausforderung stellt dabei die zeitnahe und autonome Entscheidungsfindung von Industrie 4.0-Systemsteuerungen auf Grundlage früherer und aktueller Daten dar. Mit diesen Daten lassen sich Simulationen durchführen und Veränderungen prognostizieren, auf deren Basis Lösungen optimiert werden. Fähigkeiten, die Industrie 4.0-Systemlösungen in die Lage versetzen, autonom oder teilautonom Entscheidungen zu treffen, werden als „Industrie 4.0-Intelligenzen“ bezeichnet.

Die steigende Komplexität der Systeme und die Orchestrierung übergeordneter Systemverbünde erfordern neue Modellierungs- und Simulationsmöglichkeiten, die die bisherigen Lösungen der digitalen Fabriksimulation ergänzen.³ Diese müssen auch neue Aspekte, wie neue „intelligente“ Verfahren der Datenanalytik und die zunehmende Selbstlern- und Regulierungsfähigkeit von Systemen, berücksichtigen. Die Neu- und Weiterentwicklung von Modellierungs- und Simulationstheorien im Hinblick auf Industrie 4.0-Intelligenzen stellt eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 dar.

Für den Wissens- und Produktionsstandort Deutschland sind Aufbau, Strukturierung, Standardisierung und Harmonisierung von Fähigkeiten entscheidend, die produzierende Unternehmen befähigen, Industrie 4.0-Intelligenzen zu entwickeln, abzusichern und dauerhaft sicher zu betreiben.

Ziel der vorliegenden Expertise ist es, den Status quo der im industriellen Umfeld beherrschten und angestrebten Industrie 4.0-Fähigkeiten zu ermitteln sowie den Bedarf und Umfang neuer Modellierungs- und Simulationstheorien für Industrie 4.0-Systeme mit inhärenten Industrie 4.0-Intelligenzen zu erkennen und aufzuzeigen. Die folgenden Forschungsfragen wurden hierfür entwickelt:

Forschungsfrage 1:

Welche bestehenden Modellierungen und Simulationen reichen aus, welchen Grad der Industrie 4.0-Fähigkeiten zu erfassen und vorherzusagen?

Forschungsfrage 2:

Welche Fähigkeiten in der Modellbildung und Simulation (gekoppelt⁴, hybrid⁵ oder übergreifend neutral⁶) wurden bislang wissenschaftlich nicht, wenig oder nicht ausreichend erforscht und entwickelt?

In Kapitel 2 wird zunächst das methodische Vorgehen der Expertise erläutert. In Kapitel 3 wird die einschlägige Fachliteratur analysiert. Kapitel 4 stellt die Ergebnisse der Auswertung von Interviews mit Expertinnen und Experten dar. Kapitel 5 interpretiert die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Beantwortung der Forschungsfragen und zeigt Forschungs- und Entwicklungsbedarfe auf.

1 Vgl. BMWi 2019a.

2 Unter anderem Finite-Elemente-Methode (FEM), numerische Strömungsmechanik (CFD) und Mehrkörpersimulationen (MKS).

3 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019.

4 In gekoppelten Simulationen werden Simulationsmodelle von unterschiedlichen Elementen oder Einflüssen miteinander verbunden, um Wechselwirkungen und übergreifende Einflüsse analysieren zu können. Ein typisches Beispiel sind Co-Simulationen mit Functional Mock-Up Units (FMUs).

5 Hybride Simulationen sind Kopplungen aus diskreten und kontinuierlichen Simulationen. Somit können auch diskrete Daten (wie Messdaten aus Realversuchen) in kontinuierliche Simulationen eingebettet werden.

6 Übergreifend neutrale Simulationen sind unabhängig vom Anwendungswerkzeug einsetzbare Simulationen von Gesamtsystemen.

2. Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen zur Erarbeitung der vorliegenden Expertise gliedert sich in vier Phasen, die in Abbildung 1 dargestellt werden.

Initial wurden relevante Arbeiten zu Modellierungs- und Simulationsfähigkeiten im Kontext von Industrie 4.0 recherchiert und analysiert. Aus über 75 relevanten wissenschaftlichen Beiträgen zu Industrie 4.0-Lösungen wurde der aktuelle Stand der Technik zu Industrie 4.0-Intelligenzen ermittelt und festgehalten, welche Industrie 4.0-Fähigkeiten dafür erforderlich sind. Es wurde recherchiert, welche Modelle und Simulationen benötigt werden, um diese Industrie 4.0-Fähigkeiten zu beherrschen.

Die ermittelten Industrie 4.0-Fähigkeiten wurden in fünf Kategorien gegliedert, die sich an den vom Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 identifizierten Themenfeldern⁷ orientieren:

- (1) strategische Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen,
- (2) Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen,
- (3) Engineering von Industrie 4.0-Lösungen,
- (4) Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen und
- (5) Kompetenzmanagement für Industrie 4.0-Lösungen.

Im nächsten Schritt wurden Expertinnen und Experten für Interviews gesucht. Es wurden 41 Personen identifiziert und kontaktiert, die theoretische und praktische Erfahrungen im Rahmen von Industrie 4.0-Projekten aufweisen oder zu Simulation und Modellierung in Industrie 4.0 wissenschaftlich veröffentlicht haben.

Es wurde ein Interviewleitfaden erstellt, der nach einem allgemeinen Fragenblock zum fachlichen und unternehmensspezifischen Hintergrund Fragen zu verschiedenen Themenblöcken umfasst, die nach den fünf Kategorien Planung, Erprobung, Engineering, Betrieb und Kompetenzmanagement von Industrie 4.0-Lösungen

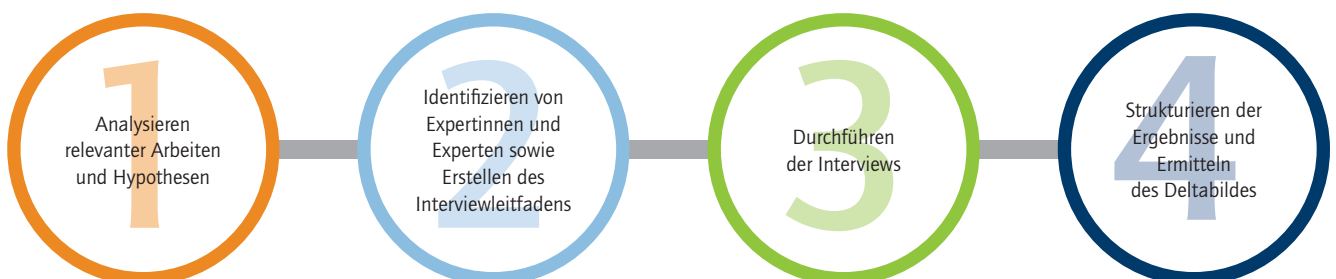
strukturiert sind. Die Tiefe der Befragung zu den einzelnen Themenblöcken orientierte sich an der Expertise der interviewten Personen.

Insgesamt wurden 17 Personen in 15 einstündigen Interviews⁸ nach ihren Erfahrungen gefragt beziehungsweise darum gebeten einzuschätzen, welche Industrie 4.0-Fähigkeiten für ihre Anwendungsfälle von Bedeutung sind und welche Simulationen und Modelle von ihnen eingesetzt werden. Dies wurde spezifisch für jeden Themenblock wiederholt. Darüber hinaus wurde überprüft, in welchen Modell- und Simulationsfeldern Optimierungspotenzial gesehen wird und wo zusätzliche Simulationen und Modelle gewünscht werden, es also noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt. Eine Liste der befragten Expertinnen und Experten befindet sich am Ende dieser Publikation.

Im letzten Schritt erfolgte die analytische Auswertung der Interviews (siehe Abbildung 2). Hierzu wurden die Aussagen der Interviewten für jede genutzte oder nach Stand der Technik angestrebte (zu erwartende) Industrie 4.0-Fähigkeit in zwei Bereiche unterteilt. Zum einen wurde der aktuelle Stand zu verwendeten Modelle und Simulationen erfasst. Zum anderen wurden die derzeitigen Bedarfe, also die fehlenden Simulations- und Modellierungsansätze, aus den Aussagen extrahiert. Anschließend wurde ein Delta-Bild aus beiden Clustern erstellt, um die gut entwickelten und beherrschten Bereiche, aber auch die weißen Flecken auf der Forschungslandkarte zu identifizieren.

Die Erkenntnisse wurden in einem Workshop mit Mitgliedern des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 und weiteren relevanten Teilnehmerinnen und Teilnehmern diskutiert, um weitere Impulse zum Thema zu sammeln. Eine Übersicht der Personen, die am Workshop teilnahmen, ist am Ende der Expertise zu finden. Impulse und Diskussionsergebnisse sind ebenfalls in die Erarbeitung der vorliegenden Expertise eingeflossen.

Abbildung 1: Methodisches Vorgehen zur Erarbeitung der Expertise

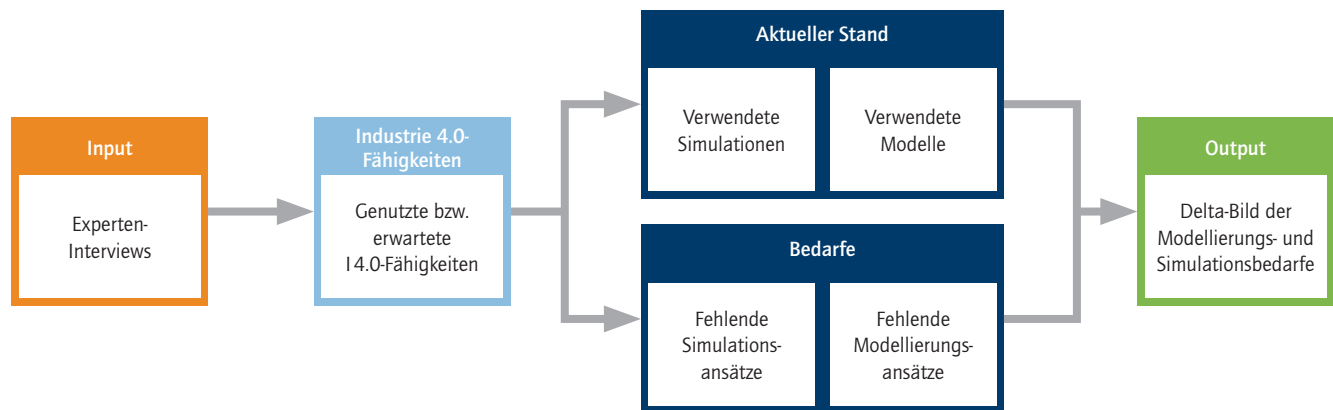


Quelle: eigene Darstellung

⁷ Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019.

⁸ Zwei der Interviews wurden als kombiniertes Interview mit jeweils zwei zeitgleich Interviewten durchgeführt.

Abbildung 2: Auswertung der Interviews und Erstellung des Delta-Bilds



Quelle: eigene Darstellung

3. Analyseergebnisse relevanter Arbeiten

Wie in Abbildung 1 zu sehen, wurden in einem ersten Schritt wissenschaftliche Arbeiten analysiert, um eine Grundlage für die Befragung der Expertinnen und Experten zu schaffen. Die Literaturanalyse hatte zum Ziel, Begrifflichkeiten und den Fokus der Expertise zu klären sowie einen generellen Überblick über den Stand der Technik zu Industrie 4.0-Intelligenzen, den dafür benötigten Industrie 4.0-Fähigkeiten und den diskutierten Simulationstheorien und Modellen, um sie zu beherrschen, zu gewinnen. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse einschlägiger Fachliteratur aufgeführt, ergänzt um Impulse aus dem gemeinsamen Workshop.

3.1. Grundlagen und Definitionen

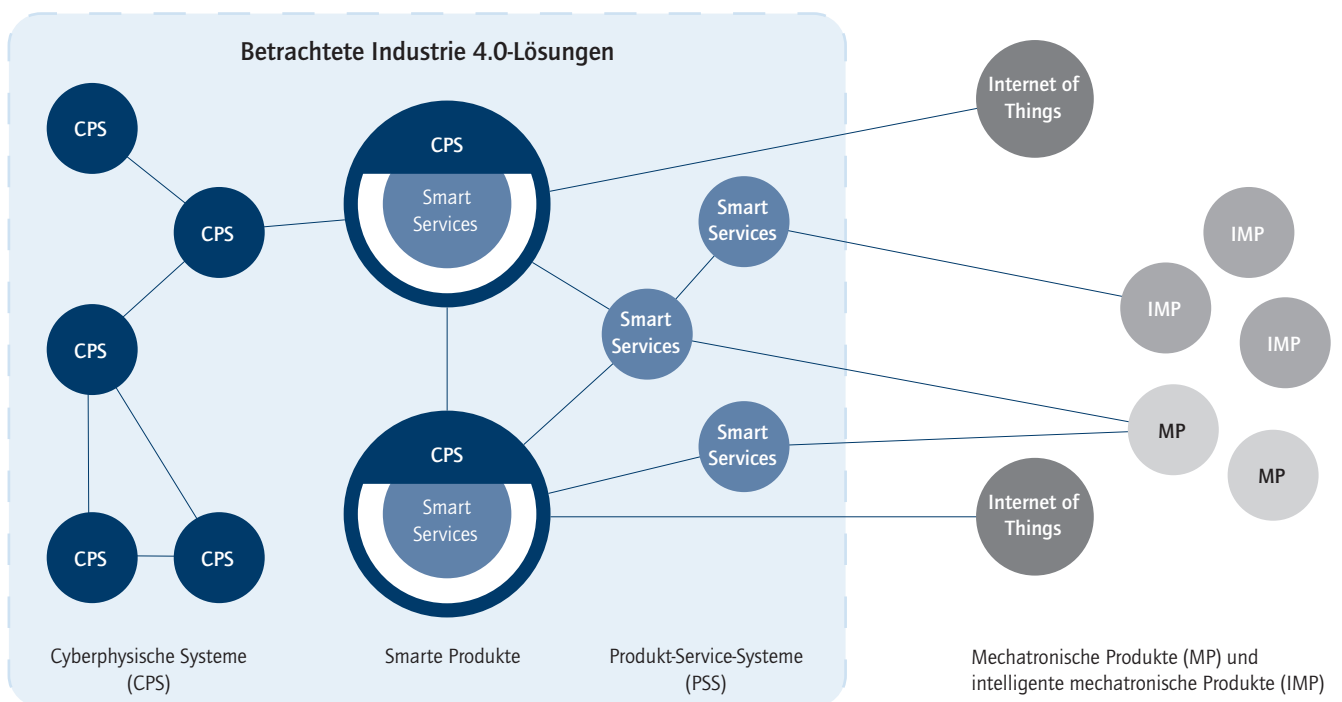
Im Rahmen der Literaturanalyse wurde die Begrifflichkeit für die vorliegende Expertise entwickelt und der Untersuchungsgegenstand genauer bestimmt. Für Begriffe, die nicht tiefer spezifiziert werden, wird auf das Glossar Industrie 4.0⁹ verwiesen.

Eingrenzung der Expertise

Die Verfasserinnen und Verfasser der Referenzarchitektur RAMI 4.0 formulieren den Grundgedanken von Industrie 4.0 als eine „Koordination und Kollaboration technischer Gegenstände, die deren virtuelle Repräsentation und Vernetzung zwingend voraussetzt.“¹⁰ Ausgehend von diesem Grundgedanken und in Anlehnung an Abramovici¹¹ kann als eine Industrie 4.0-Lösung jede Form von Produkt, Service oder Produkt-Service-System (PSS) gesehen werden, die durch Vernetzung mit anderen Industrie 4.0-Lösungen kooperiert. Für diese Expertise wird das gesamte Spektrum von cyber-physischen Systemen (CPS) über smarte Produkte bis hin zu PSS berücksichtigt. Nicht einbezogen werden pure mechanistische Produkte ohne Kommunikationsfunktion. Abbildung 3 zeigt die im Kontext dieser Expertise betrachteten (blau) und nicht berücksichtigten (grau) Klassen von Industrie 4.0-Lösungen.

Bei der Beschreibung der Vernetzung von Industrie 4.0-Lösungen orientiert sich diese Expertise am *Interaktionsmodell* aus dem

Abbildung 3: Spektrum der im Rahmen dieser Expertise betrachteten Industrie 4.0-Lösungen



Quelle: eigene Darstellung

9 Vgl. BMWi 2021d.

10 Siehe DIN SPEC 91345:2016-04, S. 5.

11 Vgl. Abramovici 2018.

*Referenzmodell semantischer Interoperabilität.*¹² Gegenseitige Interaktionen von Systemen werden in diesem Modell über ihren Informationsfluss¹³ und ihre Informationsverarbeitung¹¹ unterschieden.

Vernetzung und Kommunikation von Industrie 4.0-Lösungen sind vielfältig. Als Beispiele können im Konsumbereich Carsharing PSS und im Produktionsbereich die Matrixproduktion dienen (siehe Infobox). Durch die Vernetzung und Kommunikationsfähigkeit der Lösungen werden neue Möglichkeiten in allen Lebenszyklusphasen geschaffen – von der Konzeption und Auslegung über die Entwicklung und das Testen bis hin zum Betrieb, inklusive In- und Außerbetriebnahme sowie End-of-Life¹². Diese Möglichkeiten umfassen unter anderem die Interaktion mit anderen Industrie 4.0-Systemlösungen im Betrieb, die Nutzung der Daten aus dem Betrieb für die Entwicklung neuer Produkte oder die Verwendung eines digitalen Abbilds der Industrie 4.0-Systemlösung für In- und Außerbetriebnahme.

Beispiel 1: Vernetzung und Kommunikation bei Carsharing PSS

Carsharing ist eine Kombination aus Produkt und Dienstleistung: Fahrzeuge werden Kundinnen und Kunden als physische Produkte bereitgestellt. Bezahlt wird nicht für das Produkt, sondern für die Dienstleistung der Schaffung einer Fahrmöglichkeit. Die Abrechnung kann auf verschiedene Arten erfolgen, etwa auf Basis der gefahrenen Strecke oder der Nutzungszeit. Kombinationen von Produkten und Dienstleistungen werden als „Produkt-Service-Systeme“ (PSS) bezeichnet.

Zur Bereitstellung des PSS Carsharing werden verschiedene Arten der Kommunikation und Vernetzung benötigt: Die Fahrzeuge müssen mit einem übergeordneten Dienst verbunden sein, der ihre Verfügbarkeit erfasst und an potenzielle Kundinnen und Kunden kommuniziert. Neben der Position der Fahrzeuge sind auch andere Aspekte relevant, beispielsweise der Tankfüllstand, der intern vernetzt mitgeteilt werden muss. Carsharing-Betreiber müssen darüber hinaus ständig

Abbildung 4: Standardzelle in der Matrixproduktion



Quelle: KUKA AG

¹² Vgl. BITKOM 2020.

¹³ Der Informationsfluss wird hier in unidirektional und bidirektional unterschieden.

¹⁴ Die Informationsverarbeitung wird in den Dimensionen Zustand, Determinismus und Synchronität beschrieben.

¹⁵ Ein Beispiel der End-of-Life-Betrachtung ist das Recycling.

detailliert über den technischen Zustand der Fahrzeuge informiert werden, beispielsweise um die Fahrzeuge rechtzeitig warten zu können.

Beispiel 2: Intelligente Matrix-Produktion durch Kommunikation der technischen Systeme

Kommunikation und Vernetzung zwischen verschiedenen technischen Systemen werden zunehmend auch im Produktionsumfeld umgesetzt. Die Matrixproduktion ist ein Beispiel für den intelligenten Einsatz von Produktionsressourcen, bei dem durch Vernetzung und Kommunikation Produktionsschritte selbständig angepasst werden. Die Produktion ist hier in Zellen organisiert (siehe Abbildung 4), die durch fahrerlose Transportsysteme (FTS) beliefert werden. Je nach produziertem vorliegendem Produkt und vorhandenen Ressourcen passen sich die technischen Systeme über eine übergeordnete Steuerung an. Beispielsweise können FTS je nach Auslastung andere Produktionszellen anfahren oder Roboter in den Produktionszellen das Montagevorgehen anpassen. Um dies zu ermöglichen, wird eine Vernetzung zwischen Transportsystem, Materialsystem, Produktionssystem und Maschinensystem benötigt. Die gegenseitigen Interaktionen der Systeme bergen außerdem Potenzial für Optimierungen der Verbaureihenfolgen oder der Steuerung der Roboter zur Zulieferung.¹⁶

Die vorliegende Expertise fokussiert die Möglichkeiten der Vernetzung von Industrie 4.0-Lösungen im produzierenden Umfeld. Als durchgängiges Beispiel für die folgende Festlegung der Begrifflichkeiten wird die intelligente Matrixproduktion verwendet.

Industrie 4.0-Fähigkeiten, -Kompetenzen und -Intelligenzen

Für die Planung und Entwicklung von Industrie 4.0-Lösungen müssen in den Unternehmen die richtigen Weichen gestellt werden. Die Möglichkeiten, die damit verbundene Aktionen und eingesetzte Systeme schaffen, werden als Industrie 4.0-Fähigkeiten bezeichnet. Mit der Komplexität der Vernetzung und Interaktion der angestrebten Lösung steigen auch die Anforderungen an die Reifegrade der eigenen Industrie 4.0-Fähigkeiten.

Industrie 4.0-Fähigkeiten

sind durch bestimmte Aktionen oder Systeme geschaffene Möglichkeiten, Industrie 4.0-Anforderungen zu genügen oder Industrie 4.0-Funktionen zu erfüllen.

Beispiel für Industrie 4.0-Fähigkeiten in der Matrixproduktion

In der zuvor beschriebenen intelligenten Matrixproduktion sind verschiedene technische Systeme miteinander verknüpft und kommunizieren untereinander und zusätzlich mit dem Menschen, der sich beispielsweise um Wartungsanfragen kümmern kann oder Entscheidungen bestätigen muss. Für diese Form der intelligent vernetzten Produktion sind verschiedene Industrie 4.0-Fähigkeiten erforderlich:

- die Analyse und Optimierung von Verbaureihenfolgen und des Materialflusses
- die Steuerung der Roboter zur Zulieferung
- die Interaktion zwischen Produkt, Transport-, Montage- und Schweißroboter
- die Weiterentwicklung der Roboter bei neuen Anforderungen

Um eine resiliente und effiziente Produktion umsetzen zu können, müssen diese Industrie 4.0-Fähigkeiten in Echtzeit realisiert werden. Das Hauptanforderung dafür stellt die zeitnahe und autonome Entscheidungsfindung der Industrie 4.0-Systemlösung auf Grundlage früherer und aktueller Daten dar. Mit diesen Daten können Simulationen durchgeführt und Veränderungen prognostiziert werden, um die Lösung zu optimieren.

Für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0-Lösungen ist der Mensch unabdingbar. Um in diesem Kontext zielgerichtet agieren zu können, ist Kompetenz im Bereich Industrie 4.0 erforderlich.

„Der Kompetenzbegriff [...] bezeichnet die Fähigkeit und Bereitschaft des Einzelnen, Kenntnisse und Fertigkeiten sowie persönliche, soziale und methodische Fähigkeiten zu nutzen und sich durchdacht sowie individuell und sozial verantwortlich zu verhalten. Kompetenz wird in diesem Sinne als umfassende Handlungskompetenz verstanden.“¹⁷

Die Industrie 4.0-Kompetenzen umfassen daher Fähigkeiten, Bereitschaften, Kenntnisse und Fertigkeiten, die den im Kontext von Industrie 4.0 agierenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern innewohnen oder von ihnen benötigt werden.

Industrie 4.0-Kompetenzen

bezeichnen Fähigkeiten von Menschen, die im Kontext von Industrie 4.0 genutzt oder benötigt werden, sowie die Bereitschaft, diese spezifischen Kenntnisse, Fertigkeiten und Fähigkeiten einzusetzen.

16 Ansätze zur intelligenten Produktion wurden unter anderem in den unter Beteiligung der Autoren durchgeführten Projekten iWePro (<https://www.projekt-iwepro.de/>) und MetamoFAB (<http://metamofab.de/>) aufgezeigt. In MetamoFAB wurde unter anderem eine Übersicht zum Echtzeit-Monitoring von flexiblen Produktionssystemen wie der intelligenten Matrixproduktion erarbeitet (vgl. Oertwig/Gering 2016). iWePro zeigte die Potenziale der intelligenten, selbstorganisierenden Werkstattfertigung auf und stellte Möglichkeiten für die Integration der Beschäftigten heraus (vgl. Uhlmann et al. 2015).

17 Siehe Arbeitskreis Deutscher Qualifikationsrahmen 2011, S. 4.

Beispiel für Industrie 4.0-Kompetenzen in der Matrixproduktion

Für das intelligente Zusammenspiel der Maschinen in der Matrixproduktion und die Überwachung der korrekten Umsetzung des geplanten Ziels ist der Mensch unabdingbar. Bei Bedarf muss er eingreifen, beispielsweise um eine Wartung zu veranlassen oder einzelne Roboter zu optimieren. Auch muss er Entscheidungen der untereinander kommunizierenden technischen Systeme bestätigen. Die Kenntnisse, Fertigkeiten und Fähigkeit, die der Mensch dafür braucht, sowie seine Bereitschaft, sie einzusetzen, werden als Industrie 4.0-Kompetenzen verstanden.

Mit der verstärkten Erforschung und Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) im Produktionsumfeld werden Maschinen zunehmend als *intelligent* wahrgenommen.¹⁸ Dabei mangelt es dem Begriff der *Intelligenz* an einer allgemeingültigen Definition.¹⁹ Der Duden definiert sie als „Fähigkeit [des Menschen], abstrakt und vernünftig zu denken und daraus zweckvolles Handeln abzuleiten“.²⁰ Das amerikanische Wörterbuch Merriam-Webster definiert *intelligence* als

- (1): the ability to learn or understand or to deal with new or trying situations: REASON
also: the skilled use of reason
- (2): the ability to apply knowledge to manipulate one's environment or to think abstractly as measured by objective criteria (such as tests)¹⁸

In der Psychologie stellt *Intelligenz* einen Sammelbegriff für die kognitive Leistungsfähigkeit von Menschen dar¹⁹ und umschreibt damit unter anderem die Fähigkeiten zum Schlussfolgern, Vorstellen und Problemlösen. Rzevski definiert *Intelligenz* im Kontext mechatronischer Systeme als „die Fähigkeit eines Systems, seine Ziele unter Bedingungen der Unsicherheit zu erreichen.“²⁰ Der Aspekt der Unsicherheit spielt hier eine entscheidende Rolle: *Intelligent* ist ein System erst dann, wenn es nicht bloß passiv und regelgeleitet auf vorhersehbare Situationen reagiert, sondern in unbekanntem Situationen anhand gesammelter Informationen aus erlebten oder anderweitig trainierten vorherigen Situationen Entscheidungen trifft.

In diesem Kontext und unter Berücksichtigung der vorgenannten Definitionen werden Industrie 4.0-Intelligenzen wie folgt definiert:

Industrie 4.0-Intelligenzen

sind Fähigkeiten bestimmter Industrie 4.0-Systemlösungen, auch in unvorhersehbaren Situationen, erweiterte Ziele zu erreichen. Solche Ziele können beispielsweise das Ausbalancieren

von Effizienz, Resilienz und Nachhaltigkeit in heterogenen Umgebungen sein. Industrie 4.0-Intelligenzen „lernen“ an im Kontext der Produktion gesammelten Daten, Entscheidungen, zum Beispiel über das Steuern und Überwachen von Industrie 4.0-Systemlösungen, zu treffen. Sie stellen damit eine Weiterentwicklung der Automatisierung dar.

Erforderlich für die Realisierung von Industrie 4.0-Intelligenzen sind bestimmte Industrie 4.0-Fähigkeiten, beispielsweise die sozio-technische Auslegung, Analyse und Simulation der Befähigung von Interaktionen zwischen technischen Systemen. Das enge Zusammenspiel der gegenseitigen Leistungserbringung und Steuerung der technischen Systeme wird von Menschen mit spezifischen Industrie 4.0-Kompetenzen geplant, weiterentwickelt und im laufenden Betrieb überwacht.

Beispiele für Industrie 4.0-Intelligenz in der Matrixproduktion

Die Matrixproduktion stellt mit der Verknüpfung aus Transport-, Materialfluss-, Produktions- und Maschinensystem eine komplexe Industrie 4.0-Systemlösung dar. Solange keine unvorhergesehenen Störgrößen auftreten, entspricht die Produktion der Produktionsplanung. Es können jedoch beispielsweise folgende unvorhergesehene Situationen auftreten:

- Das Materialsystem zeigt an, dass Material vorhanden ist, obwohl das richtige Material im Lager nicht vorrätig ist, da falsches Material gebucht oder geliefert wurde.
- Ein FTS fällt aufgrund von Materialversagen aus, behindert die Zulieferung einer Station und blockiert den Weg für andere Transportroboter.
- Ein Montageroboter verliert durch ruckartige Bewegungen beim Anlauf einer neuen Produktion seine Kalibrierung.

Eine Industrie 4.0-Intelligenz trifft auf Basis vorhandener Informationen über den Zustand und die Zusammensetzung der Systemlösung und vorheriger Entscheidungen, die sie „gelernt“ hat, neue Entscheidungen für die aktuell gestörte Situation. Mögliche Entscheidungen können sein:

- Neues Material bestellen und auf ein anderes Produkt umplanen, damit die Produktion weiterlaufen kann.
- Die Produktionszelle umfahren oder über den Ausfahrtsweg anfahren. Abtransport des defekten FTS.
- Personal benachrichtigen, damit die Anlage gezielt überprüft wird.

18 Vgl. BMWi 2019c.

19 Siehe Rzevski 2003, S. 1031.

20 Siehe Duden 2021.

21 Siehe Merriam 2021.

22 Vgl. Funke/Vaterrodt 2009, S. 10.

23 Vgl. Rzevski 2003.

Die Entscheidungsfindung kann dabei auf verschiedenen Leveln der Autonomie²⁴ erfolgen:

1. nicht autonom (das System sammelt nur Informationen, analysiert und erklärt sie)
2. durch Zustimmung von Anwenderinnen und Anwendern (Aktionen werden vom System nur vorgeschlagen und verantwortliche Beschäftigte wählen das gewünschte Verhalten aus)
3. autonom mit Ausnahmeregelungen (das System setzt seine Entscheidungen selbstständig um, solange kein negativer Input von Nutzerinnen und Nutzern kommt).

Die vorliegende Expertise bezieht in die Untersuchung der benötigten Industrie 4.0-Fähigkeiten für die Industrie 4.0-Systemen inhärenten Industrie 4.0-Intelligenzen alle drei Level an Autonomie mit ein.

Modelle und Simulationen

Eine gute Datenbasis ist eine fundamentale Voraussetzung für Industrie 4.0-Lösungen. Durch sie wird die virtuelle Produktentstehung überhaupt erst ermöglicht. Dabei geht es darum, auf Basis von Modellen und Daten möglichst (physisch) prototypenfrei zu entwickeln und zu fertigen. Die frühzeitige virtuelle Abbildung realer Szenarien ist wesentlich, um die auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse für die Auslegung und Entwicklung von Industrie 4.0-Lösungen nutzen zu können.²⁵ Die digitale Abbildung erfolgt in Modellen, die das reale Szenario mit seinen zentralen Bestandteilen abstrahieren und für die virtuelle Entwicklung nutzbar machen. Die Abbildung und Ausführung dieser Modelle zum Verstehen, Vorhersagen und Optimieren der Industrie 4.0-Lösungen werden als *Simulation* bezeichnet.

Simulation

stellt die Abbildung und Ausführung realer Szenarien mit Bezug zum betrachteten Zielsystem in Simulationsmodellen dar, um diese Szenarien zu verstehen, vorherzusagen oder zu optimieren.

Um das Zusammenspiel der Bestandteile von Industrie 4.0-Systemlösungen sicherzustellen, werden verschiedene Arten von Simulationen benötigt. Methodisch werden hier kontinuierliche Simulationen von diskreten – zeitdiskreten oder ereignisdiskreten – Simulationen unterschieden.²⁶ Da zeitdiskrete Simulationen eher selten sind, erfolgt in dieser Expertise eine Fokussierung auf ereignisdiskrete Simulationen.

Beispiel für Simulationen in der intelligenten Matrixproduktion

In der intelligenten Matrixproduktion werden kontinuierliche Simulationen des Produktionssystems zum Beispiel für die Optimierung der Schweißpunktplatzierung, Kollisionsprüfungen, die Optimierung des Zusammenspiels der Roboter und zur Absicherung des Schweißverfahrens selbst eingesetzt. Ereignisdiskrete Simulationen werden für die Optimierung der Fahrtwege der FTS, zur Analyse der Leistung, Optimierung von Engpässen und zum Vergleich alternativer Lösungen verwendet.

Um Industrie 4.0-Intelligenzen in ihren Entscheidungen unterstützen oder diese simulieren zu können, ist es erforderlich, die Simulationsmethoden zu verbinden: Für die Fertigung eines neuen und bisher unbekanntes Produkts müssen beispielsweise die erforderlichen Fertigungsschritte mit kontinuierlichen Simulationen abgesichert werden. Die Transportwege und weitere Teile des gesamten Fertigungssystems werden anschließend mit ereignisdiskreten Simulationen optimiert. Auch Entscheidungen, wie das Umplanen bei fehlendem Material oder Ausfall eines Roboters, die durch die Industrie 4.0-Systemlösung getroffen werden sollen, werden ereignisdiskret simuliert.

Besondere Bedeutung hat in diesem Kontext der sogenannte digitale Zwilling. Dieses digitale Abbild kann sowohl als Grundlage für eine Simulation dienen wie auch nur als Repräsentationsform ohne direkten Zusammenhang mit einer Simulation, beispielsweise zur Darstellung des aktuellen Zustands eines Systems. Diese Expertise folgt im Verständnis des digitalen Zwillings der Definition von Stark und Damerau:

Ein digitaler Zwilling

ist eine digitale Repräsentation eines aktiven, einzigartigen Produkts (reales Gerät, Objekt, Maschine, Dienstleistung oder immaterieller Vermögenswert) oder eines einzigartigen Produkt-Service-Systems (ein System, das aus einem Produkt und einer zugehörigen Dienstleistung besteht), die seine ausgewählten Merkmale, Eigenschaften, Bedingungen und Verhaltensweisen mittels Modellen, Informationen und Daten innerhalb einer einzigen oder sogar über mehrere Lebenszyklusphasen hinweg umfasst.²⁷

Digitale Zwillinge sind aktuell ein verbreitetes Forschungsthema und bei vielen Unternehmen Teil der Unternehmensstrategie.²⁸

24 Vgl. Lee/Seppelt 2009, S. 423.

25 Vgl. prostep 2021.

26 Vgl. Bracht et al. 2018, S. 117 ff.

27 Siehe Stark/Damerau 2019, S. 1.

28 Vgl. Samarajiwa et al. 2020.

Obwohl digitale Zwillinge eine Vielzahl an Anwendungsfällen und Vorteilen haben,²⁹ entstehen durch den Einsatz digitaler Zwillinge als Instanzen realer Produkte oder PSS auch Herausforderungen.³⁰ Der digitale Zwilling verfügt beispielsweise nicht mehr nur über die Sollwerte seines realen Gegenstücks, sondern besitzt als Instanz des physischen Systems dessen Ist-Werte und Zustände. Diese wirken sich auf die Ausführung der Simulationen aus und erfordern adaptive Simulationsmethoden.

Beispiel für den Einsatz adaptiver Simulationsmethoden

Für die intelligente Matrixproduktion liegt ein Simulationsmodell für ereignisdiskrete Simulationen vor, mit dem die Produktionssteuerung optimiert werden soll. In der Produktionsanlage treten schnelle Änderungen des Auftragsstands oder des Zustands der Roboter auf. Daher werden Simulationen erforderlich, die mit den aktuellen Daten arbeiten können. Durch den Einsatz adaptiver Simulationsmethoden, die sich beim Start der Simulation dem aktuellen Zustand des Produktionssystems anpassen, lassen sich die Auswirkung eines ausgefallenen Schweißroboters untersuchen und optimal ermitteln.

In der virtuellen Produktentstehung werden eine Vielzahl an Modellen für Simulationen und digitale Zwillinge genutzt. Diese Modelle lassen sich in übergeordneten Klassen zusammenfassen³¹ und charakterisieren. Die Charakteristika betreffen die Dynamik des abgebildeten Sachverhalts, die Vernetzung mit anderen Modellen oder Artefakten und die dahinterliegende Theorie auf Erkenntnisbasis (induktiv) oder theoretischer Grundlage (deduktiv). Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt der aus der Literaturrecherche abgeleiteten Modellklassen, die in [Anhang A](#) in vollem Umfang aufgelistet sind.

Tabelle 1: Auszug identifizierter Modellklassen und der zugehörigen Charakteristika

Modellklasse	Charakteristika
Geometriemodelle	<ul style="list-style-type: none"> • statisch • vorrangig Einzelmodelle • deterministisch
Kognitive Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • dynamisch • Kopplung verschiedener Modelle • deduktiv oder induktiv
Zustandsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • dynamisch • einzeln oder vernetzt • deduktiv oder induktiv

29 Vgl. Jones et al. 2020.

30 Vgl. prostep 2021.

31 Vgl. Hick et al. 2019.

32 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019.

33 Vgl. acatech 2016.

34 Vgl. Meudt et al. 2017, Tantik/Anderl 2016.

35 Vgl. Tantik/Anderl 2017.

3.2. Industrie 4.0-Fähigkeiten in der Literatur

In der Publikation „Themenfelder Industrie 4.0“ formulierte der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 im Jahr 2019 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für Industrie 4.0.²⁹ Diese werden in vier grundlegende Kategorien unterteilt: strategische Planung und Auslegung, Erprobung, Engineering sowie Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen. Da Industrie 4.0-Intelligenzen unter anderem auf hier genannten Methoden und Werkzeugen basieren, wird diese Kategorisierung übernommen, um auch die dafür benötigten Industrie 4.0-Fähigkeiten zu strukturieren. Industrie 4.0-Kompetenzen sind ebenfalls essenziell für die Implementierung und den Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen, wie bereits die acatech POSITION „Kompetenzen für Industrie 4.0“ gezeigt hat.³⁰ Deshalb wird das Kompetenzmanagement als ein weiterer Themenblock aufgenommen, der in den Interviews thematisiert werden soll. Die im Zuge der Literaturanalyse ermittelten Industrie 4.0-Fähigkeiten, die auch im Zusammenhang mit Industrie 4.0-Intelligenzen bedeutsam sind, werden in Abbildung 5 themenblockspezifisch dargestellt und im Folgenden genauer erläutert.

Die analysierte Literatur fokussiert sich im Bereich der strategischen Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen vorrangig auf die Analyse von Wertströmen in Fabriken³¹ und auf serviceorientierte Geschäftsmodelle³². Erkannte Industrie 4.0-Fähigkeiten sind im Bereich der *strategischen Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen* die Schaffung dieser serviceorientierten Geschäftsmodelle und die Optimierung von Wertströmen. Nach den Themenfeldern des Forschungsbeirats sind außerdem im unternehmensplanerischen Bereich die Ausrichtung der Strategie, das Management von Zielen, das Festlegen von Wertschöpfungspotenzialen, das Erkennen von Kerntechnologien sowie das systemische Beherrschen und Beschreiben von Auslegungsmechanismen relevant.³⁶

Ein Mittel zur *Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen* ist die Simulation, beispielsweise durch experimentierbare digitale Zwillinge.³⁷ Weitere benötigte Industrie 4.0-Fähigkeiten in diesem Kontext sind laut Fachliteratur die Erstellung und Durchführung von virtuellen Tests und Testumgebungen sowie die hierarchische Kopplung von Tests beziehungsweise Simulationen.³⁸ Hinzu kommen die Etablierung von Testumgebungen und der Entwurf von generischen Lösungsmustern.³⁹

Nach dem V-Modell zur Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme aus der Richtlinie VDI 2206⁴⁰, die nach Abramovici et al. auch auf das Engineering smarterer Produkte übertragbar ist,⁴¹ gilt es, Anforderungen für eine Industrie 4.0-Lösung zu erheben und zu managen, die Systemarchitektur und das Design zu erstellen sowie die Systemelemente zu implementieren, in das System

36 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019.

37 Vgl. Schluse et al. 2018.

38 Vgl. Smirnov et al. 2018.

39 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019.

40 Vgl. VDI 2020.

41 Vgl. Abramovici 2018.

Abbildung 5: Industrie 4.0-Fähigkeiten in der Literatur

Industrie 4.0-Fähigkeiten in der Literatur				
Strategische Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen	Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen	Engineering von Industrie 4.0-Lösungen	Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen	Kompetenzmanagement für Industrie 4.0-Lösungen
<ul style="list-style-type: none"> • Management von Zielen • Planung und Optimierung von Wertschöpfungsströmen • Festlegen von Wertschöpfungspotenzialen • Erkennen von Kerntechnologien • Systemisches Beherrschen und Beschreiben von Auslegungsmechanismen • Schaffung serviceorientierter Geschäftsmodelle • Ausrichtung der Strategie 	<ul style="list-style-type: none"> • Etablieren von Testumgebungen (Testbeds) • Erstellung und Durchführung von virtuellen Tests und Testumgebungen • Entwurf generischer Lösungsmuster • Hierarchische Kopplung von Simulationen und Tests 	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen des Industrie 4.0-Systementwurfs und der Lösungsarchitektur • Planen • Validieren • Simulieren • Absichern • Verifizieren • Freigeben • virtuelle Inbetriebnahme • Erfassen der Nachverfolgbarkeit der Abhängigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewerten • Ad-hoc-Umplanen • Warten • Reparieren • Anhalten • Außerbetriebnahme • Überwachung und Vorausschau 	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassen vorhandener Kompetenzen zu den Industrie 4.0-Lösungen • Vermitteln von Kompetenzen zu den Industrie 4.0-Lösungen

Quelle: eigene Darstellung

zu integrieren und abschließend zu validieren. Diese Entwicklungsschritte bilden den Rahmen für benötigte Industrie 4.0-Fähigkeiten im Bereich des *Engineering*. Der Forschungsbeirat identifiziert in diesem Bereich folgende benötigte Industrie 4.0-Fähigkeiten:

- Erstellen des Industrie 4.0-Systementwurfs und der Lösungsarchitektur⁴²
- Planen, Validieren, Simulieren, Absichern, Verifizieren, Freigeben, virtuelle Inbetriebnahme
- Erfassen der Nachverfolgbarkeit der Abhängigkeiten

Ein Beispiel für ein Projekt zur Unterstützung der letzten Fähigkeit stellt das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt *Virtuelle Inbetriebnahme mit Smart Hybrid Prototyping* dar, in dem die Grundlagen für eine interaktive virtuelle Inbetriebnahme erforscht wurden.⁴³

Hinsichtlich benötigter Industrie 4.0-Fähigkeiten zum *Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen* thematisiert die Literatur vorrangig Flexibilisierung⁴⁴ und autonome Entscheidungsfindung⁴⁵ (unter anderem als *model predictive control*⁴⁶) von Industrie 4.0-Lösungen. Diese Punkte werden in den Industrie 4.0-Fähigkeiten Bewerten, Ad-hoc-Umplanen, Warten, Reparieren, Anhalten und Außerbetriebnahme zusammengefasst. Zusätzlich identifiziert der Forschungsbeirat das Überwachen und Vorausschauen als relevante Industrie 4.0-Fähigkeiten.⁴⁷

Zum Teil wurden die hier genannten Industrie 4.0-Fähigkeiten in der intelligenten, selbstorganisierenden Werkstattfertigung⁴⁸ bereits erforscht und können für die Auslegung und Realisierung von Industrie 4.0-Intelligenzen berücksichtigt werden.

Als weitere essenzielle Industrie 4.0-Fähigkeit wurde das Vermitteln von Kompetenzen identifiziert, etwa wenn es darum geht, kollaborative Roboter in manuelle Montagelinien zu integrieren⁴⁹. Als weitere Industrie 4.0-Fähigkeit gehört zum Bereich *Kompetenzmanagement* das Erfassen vorhandener Kompetenzen, etwa zur dynamischen Werker-Planung.⁵⁰

Weitere Arbeiten zu Kompetenzen im Kontext von Industrie 4.0 liefert die Arbeitsgruppe 5 „Arbeit, Aus- und Weiterbildung“ der Plattform Industrie 4.0, die sich mit den Herausforderungen der Arbeitsweltgestaltung in einer sich durch Digitalisierung wandelnden Industrie beschäftigt.⁵¹ Als normative Grundlage für die zukünftige Gestaltung von Arbeit und Bildung, auf die sich Vertreterinnen und Vertreter von Unternehmen, Verbänden, Wissenschaftsorganisationen und der Sozialpartner geeinigt haben, veröffentlichte sie 2020 die *Charta für Lernen und Arbeiten in der Industrie 4.0*.⁵²

Ebenfalls nützlich als Hintergrund dieser Expertise sind die Publikationen der Arbeitsgruppe 2 „Technologie- und Anwendungsszenarien“ der Plattform Industrie 4.0, deren Ziel es ist, die industrielle Transformation praxisnah und anschaulich zu beschreiben.

42 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019.

43 Vgl. Stark et al. 2018.

44 Vgl. Burger et al. 2017.

45 Vgl. Rosen et al. 2015.

46 Vgl. Vick et al. 2016.

47 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019.

48 Vgl. Uhlmann et al. 2015.

49 Vgl. Oberc et al. 2019.

50 Vgl. Strang et al. 2016.

51 Vgl. BMWi 2021a.

52 Vgl. BMWi 2020a.

Zwei Wegweiser geben zu Wirkungsweisen von KI in möglichen konkreten Nutzungsszenarien sowie zum Problem der Akzeptanz von Entscheidungen von Industrie 4.0-Intelligenzen Orientierung.⁵³ Ebenfalls relevant im Kontext dieser Expertise sind die Themen Datenhoheit und Schutz von geistigem Eigentum bei Industrie 4.0-Anwendungen. Hier hat die Arbeitsgruppe 4 „Rechtliche Rahmenbedingungen“ der Plattform Industrie 4.0 ihre Einschätzungen veröffentlicht.⁵⁴

Weitere relevante Arbeiten liefert die Plattform Lernende Systeme (PLS), die unter anderem durch Künstliche Intelligenz (KI) entstehende Bedarfe und Anforderungen in Deutschland ermittelt und Empfehlungen für Forschung und Industrialisierung gibt. Des Weiteren versammelt die PLS vielfältige Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele, unter anderem auch für den Einsatz von KI in der Industrie 4.0.⁵⁵

3.3. Modellierungs- und Simulationsbedarfe sowie Partiallösungen

Für die Realisierung von Industrie 4.0-Systemlösungen mit inhärenten Industrie 4.0-Intelligenzen gibt es verschiedene Modellierungs- und Simulationsbedarfe. Da die Intelligenzen besondere Fähigkeiten von Industrie 4.0-Systemlösungen darstellen, gilt es Modelle und Simulationen bereitzustellen, die auch diesen besonderen Fähigkeit der Lösung gerecht werden.

Nach der einschlägigen Fachliteratur werden im Betrieb von Industrie 4.0-Systemlösungen unter anderem Modelle der Zusammenhänge und der Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten, etwa von Sensoren und Aktoren, in Form von Informationsmodellen und Prozessmodellen benötigt, die dynamisch erstellt und verwendet werden können.⁵⁶ Diese Modelle beschreiben zum einen die Struktur der Daten sowie die Daten selbst und zum anderen den geplanten und tatsächlich ablaufenden Produktionsprozess. Die Industrie 4.0-Lösungen sollen zusätzlich autonom in der Lage sein, optimale Parameter in ihrem Betrieb zu ermitteln,⁵⁷ was sich auch auf die dazugehörigen Modelle übertragen lässt.⁵⁸

Das einfache modellbasierte Prozessmonitoring⁵⁹, bei dem der Produktionsprozess auf seine korrekte Durchführung überwacht wird, ist einer der Kernanwendungsfälle für die Verwendung von Modellen im Kontext von Industrie 4.0-Lösungen. Die virtuelle Inbetriebnahme von Industrie 4.0-Systemlösungen ist ein weiterer verbreiteter Anwendungsfall, bei dem Steuerungen über Steuerungsmodelle virtualisiert und simuliert werden.⁶⁰ Diese Steuerungsmodelle dienen vorrangig der Planung der den Industrie 4.0-Systemlösungen

inhärenten Steuerungen. Sie eignen sich jedoch ebenfalls zur aktiven Umsetzung der Steuerung durch dynamische Anpassungen der Parameter und zur Nutzung der Ergebnisgrößen zur Verhaltensbeeinflussung der Industrie 4.0-Systemlösung.

Um schnell auf erforderliche Änderungen im Produktionsablauf, beispielsweise durch geänderte Marktsituationen, reagieren zu können, werden unter anderem auch Flexibilitätsmodelle vorgeschlagen.⁶¹ Diese sollen Änderungsvarianten darstellen und erfordern ein geeignetes Abbild sowie eine starke Vernetzung der interagierenden Industrie 4.0-Lösungen. Da sie eine Kombination aus Informations- und Prozessmodellen darstellen, werden sie im Kontext dieser Expertise nicht gesondert betrachtet, sondern als Teil dieser beiden Modellklassen. Für Industrie 4.0-Lösungen, mit denen effizient über verschiedene Anwendungen interagiert werden soll, entweder direkt über Steuerelemente an der Industrie 4.0-Lösung oder beispielsweise in Anwendungen von virtueller und augmentierter Realität (VR/AR), werden häufig gekoppelte Modelle benötigt, beispielsweise Geometrie- und Kinematikmodelle zur Darstellung der geometrischen Interaktionen der Industrie 4.0-Systemlösung gekoppelt mit Informationsmodellen.⁶²

Optimierungsziele wie die Lastverteilung müssen mathematisch beschrieben werden, um mit computerbasierten Ansätzen gelöst werden zu können.⁶³ Auf diese Weise wird die Grundlage für Simulationen geschaffen. Dabei ist von Bedeutung, die simulierten Modelle dynamisch zu gestalten, um erforderliche Änderungen, wie neue Zielparameter oder Ist-Parameter, schnell einfließen lassen zu können.⁶⁴

Die Erstellung von Modellen muss für die Optimierung von Industrie 4.0-Systemlösungen möglichst intuitiv sein. Die schnelle und einfache Modellierung an mobilen Geräten, wie sie im MobiSim-Projekt erforscht wurde,⁶⁵ ist hierfür ein geeignetes Beispiel. Auch die Nutzung von Modellen in AR kann bei der immersiven Modellerstellung und Anpassung genutzt werden.⁶⁶

Zur Optimierung von Architekturen wird unter anderem die Anwendung von Graphenmodellen vorgeschlagen.⁶⁷ Sie stellen eine besondere Form von Informationsmodellen dar, bei der die Daten nicht tabellarisch aufbereitet werden, sondern jedes Element als Knoten dargestellt wird und die Zusammenhänge zu anderen Elementen über Kanten abgebildet werden. Dadurch sind komplexe Informationsstrukturen einfach abbildbar. Von Kiesel et al. wird das Datenaustauschformat AutomationML als ein Ansatz zur automatischen Erstellung von Modellen über Graphenmodelle zur virtuellen Inbetriebnahme untersucht.⁶⁸

53 Vgl. BMWi 2020b, BMWi 2021c.

54 Vgl. BMWi 2021b

55 Vgl. acatech 2021a.

56 Vgl. Bonci et al. 2016.

57 Vgl. Siegert et al. 2020.

58 Vgl. Brecher et al. 2017.

59 Vgl. Klocke et al. 2017.

60 Vgl. Kutscher et al. 2020.

61 Vgl. Burger et al. 2017.

62 Vgl. Kiesel et al. 2017.

63 Vgl. Elfaham et al. 2017.

64 Vgl. Galaske et al. 2015.

65 Vgl. Meudt et al. 2017.

66 Vgl. Herr et al. 2018.

67 Vgl. Elfaham et al. 2017.

68 Vgl. Kiesel et al. 2017.

Eine Partillösung für komplexe Problemstellungen bei Industrie 4.0-Systemlösungen ist die Nutzung von hybriden Simulationen, die verschiedene Simulationsarten, wie agentenbasierte Simulationen oder ereignisdiskrete Simulationen, kombinieren.⁶⁹ Um den Erfolg von Industrie 4.0-Lösungen zu gewährleisten, sind hier weit mehr grundlegende Simulationsstrategien erforderlich. Modellierung und Simulation können dabei auf verschiedenen Leveln, von der einzelnen Komponente bis hin zum Verbund der Industrie 4.0-Lösung, erfolgen.⁷⁰ Die Kombination der Simulationen kann dabei auch als Co-Simulation gestaltet sein,⁷¹ beispielsweise über das Functional Mock-up Interface (FMI)⁶⁹ oder die Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA).⁷⁰

Dieser Ausschnitt aus dem Stand der Forschung zeigt, dass es bereits partielle Lösungen der Modellierung und Simulation für Industrie 4.0-Fähigkeiten gibt, die als Grundlage auch für die Simulation von Industrie 4.0-Intelligenzen verwendet werden können. Es scheint jedoch in der Industrie kein konfigurierbares Lösungsportfolio für passfähige Modelltypen für Industrie 4.0-Fähigkeiten

vorhanden zu sein. In Bezug auf die Transferfähigkeit der Lösungen in die Industrie zeigt sich bereits ein vermehrter Forschungs- und Entwicklungsbedarf, beispielsweise bei Verbundprojekten mit Industriepartnern.

Die für den Einsatz im Kontext von Industrie 4.0 in der Literatur identifizierten Modellklassen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der identifizierten Modellklassen der Literaturrecherche mit Relevanz für Industrie 4.0-Intelligenzen

Modellklasse	Relevanz für Expertise
Informationsmodelle	Herstellung von Verknüpfungen zwischen den Industrie 4.0-Lösungen
Prozessmodelle	Autonome Entscheidungsfindung in der Prozessoptimierung
Steuerungsmodelle	Zur Umsetzung von Entscheidungen der Industrie 4.0-Intelligenz
Geometriemodelle & Kinematikmodelle	Visuelle Abbildung, etwa zur Interaktion mit der Industrie 4.0-Lösung

69 Vgl. Thiede et al. 2019.

70 Vgl. Demkovich et al. 2018.

71 Vgl. Hensel et al. 2016.

72 Vgl. Modelica Association 2021.

73 Vgl. OPC Foundation 2021.

4. Ergebnisse der Interviews

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Interviews zu folgenden Aspekten vorgestellt:

- umgesetzte oder angestrebte Industrie 4.0-Fähigkeiten
- eingesetzte oder benötigte Simulationen und Modelle zur Umsetzung von Industrie 4.0-Fähigkeiten
- Optimierungspotenziale für den Einsatz von Simulations- und Modellierungsansätzen

Das direkte Fragen nach angestrebten oder umgesetzten Industrie 4.0-Intelligenzen und den dafür benötigten Modellen und Simulationen führte in den ersten Gesprächen häufig zu Missverständnissen und Verwechslungen mit den benötigten Industrie 4.0-Kompetenzen. Deshalb entschieden sich die Interviewer, wie in der Literaturrecherche vorzugehen und allgemeiner nach umgesetzten oder angestrebten Industrie 4.0-Fähigkeiten zu fragen, deren Beherrschung prinzipiell auch für Systemlösungen mit Industrie 4.0-Intelligenzen notwendig sind. Den Interviewleitfaden finden Sie in [Anhang B](#).

4.1. Umgesetzte und angestrebte Industrie 4.0-Fähigkeiten

Bei der Auswertung der Interviews wurden zunächst die von den Interviewten angestrebten oder bereits genutzten Industrie 4.0-Fähigkeiten ermittelt. Die in den Interviews genannten Industrie 4.0-Fähigkeiten wurden zu 28 unterschiedlichen Fähigkeiten geclustert. Sie verteilen sich auf die 5 in der Literaturanalyse gebildeten Themenblöcke, die auch die einstündigen Befragungen strukturierten.

Strategische Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen

Den ersten Themenblock bilden die von den Befragten genannten umgesetzten oder angestrebten Industrie 4.0-Fähigkeiten zur *strategischen Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen*, die im Folgenden näher erläutert werden.

(1) Ermitteln und Nutzen realitätsnaher Anforderungen an Industrie 4.0-Lösungen

Um geplante Industrie 4.0-Lösungen für realitätsnahe Szenarien auszulegen, zu entwickeln und zu testen, müssen realitätsnahe Anforderungen ermittelt und verwaltet werden. Diese Anforderungen sollten vorrangig auf Daten aus dem Nutzungsumfeld der Industrie 4.0-Lösung oder ähnlicher Lösungen basieren. Anschließend müssen diese Anforderungen in die Entwicklung neuer Industrie 4.0-Lösungen eingebracht werden können, weshalb diese Industrie 4.0-Fähigkeit sowohl bei der Planung und Auslegung als auch im Themenblock *Engineering* genannt wurde.

(2) Relevante Umgebungs- und Nutzungsbedingungen ermitteln

Neben den Anforderungen an die Industrie 4.0-Lösung muss die Umgebung, in der die Industrie 4.0-Lösung in Betrieb genommen werden soll, analysiert werden. Für diese Industrie 4.0-Fähigkeit müssen neben den direkten Nutzungsdaten der Industrie 4.0-Systemlösung auch solche erfasst und genutzt werden, die über die direkten Daten der Industrie 4.0-Lösung hinausgehen. Es geht darum, alle möglichen Betriebszenarien für die Industrie 4.0-Lösungen zu ermitteln.

(3) Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus und der Geschäftsmodelle während der Planung, Auslegung, Entwicklung und Nutzung

Das Geschäftsmodell ist ein essenzieller Bestandteil der Industrie 4.0-Lösung. Daher muss es auch bei crossfunktionaler Auslegung, Planung, Entwicklung sowie Nutzung bekannt sein und berücksichtigt werden. Außerdem gilt es, sich nicht nur auf einen Ausschnitt des Lebenszyklus, etwa die Produktion, zu fokussieren, sondern stets den gesamten Lebenszyklus der Industrie 4.0-Lösung zu betrachten.

(4) Rentabilität der Industrie 4.0-Lösung überprüfen

Es sollte möglich sein, zu jedem Zeitpunkt im Produktlebenszyklus die Rentabilität der Industrie 4.0-Lösung zu überprüfen. Dafür muss deren kompletter Produktlebenszyklus erfasst und betrachtet werden.

(5) Globales Optimum der Produktnutzung ermitteln

Eine Vielzahl an Simulationslösungen zielt darauf ab, lokale Optima für spezifische Lösungen und Problemstellungen zu finden. Da die Industrie 4.0-Lösungen jedoch vorrangig im Verbund agieren und somit von anderen Systemen abhängig sind, ist es notwendig, sich auf globale Optima zu fokussieren.

Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen

(6) Digitales Testen der Industrie 4.0-Lösung auf Realdaten

Durch die Vielzahl an möglichen Szenarien, die unter anderem durch (2) erfasst werden, ist das vollständige physische Testen nicht mehr möglich. Digitale beziehungsweise virtuelle Tests sind erforderlich, um alle relevanten Szenarien mit vertretbarem Aufwand zu analysieren. Um dies möglichst realitätsnah zu gestalten, sind diese Tests an Realdaten erforderlich.

(7) Virtuelle Darstellung von Lösung, Umgebung und Prüfstand

Um die virtuelle Planung, Entwicklung und Absicherung möglichst immersiv, das heißt stimmig und realitätsgetreu und damit nutzerfreundlich, zu gestalten, ist eine entsprechende virtuelle

Darstellung der Lösung sowie der dazugehörigen Umgebung und des Prüfstands (Test Bench) notwendig.

(8) Teststrategien generieren und optimieren, um Tests zu reduzieren

Durch virtuelles Testen wird die Durchführung relevanter Tests zwar ermöglicht, dies ist jedoch angesichts der Vielzahl an Szenarien mit hohem Kapazitätsaufwand verbunden. Es ist daher anzustreben, die Teststrategien so zu optimieren, dass die Anzahl erforderlicher Tests reduziert werden kann.

(9) Mapping von virtuellen und realen Versuchen

Selbst mit einer nahezu prototypenfreien virtuellen Produktentstehung sind physische Tests in bestimmten Fällen erforderlich. Das Mapping von physischen und realen Tests ist daher eine essenzielle Fähigkeit des Testens von Industrie 4.0-Lösungen.

Engineering von Industrie 4.0-Lösungen

(10) Industrie 4.0-Lösungen im Systemverbund betrachten

Da Industrie 4.0-Lösungen ihre Funktionalitäten vorrangig über Smart Services oder über Kommunikation mit anderen CPS realisieren, sollte eine Möglichkeit geschaffen werden, die Lösungen im Systemverbund zu betrachten.

(11) Auswertungen von Parametereinflüssen

Es sollte möglich sein, Parametereinflüsse schnell und effizient vor Ort auszuwerten. Parameterveränderungen sollten auf ihre Auswirkungen überprüft und zeitnah ein Ergebnis generiert werden können.

(12) Wiederverwendung bereits verwendeter Daten (Reduced-order Models)

Da die Erstellung von Modellen immer mit einem Aufwand und einem gewissen Grad an Expertise im jeweiligen Bereich verbunden ist, sollte es möglich sein, bereits verwendete Entwicklungsdaten und -modelle als reduzierte Modelle wieder- und weiterzuverwenden.

(13) Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen Systemkomponenten erfassen

Um die für die Semantik erforderlichen Systemkomponenten ermitteln zu können, sind die Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Systemelementen zu ermitteln.

(14) Integrationslösungen schaffen

Es muss die Möglichkeit bestehen, an der Schnittstelle Mensch-Technik Integrationslösungen zu schaffen, mit denen die Anwenderinnen und Anwender eigene Anwendungen erstellen können. In ihrer Interaktion mit der Industrie 4.0-Lösung sind die Beschäftigten zur Schaffung beziehungsweise Adaption der Lösung, beispielsweise durch Programmierung eigener Anwendungen, zu befähigen.

(15) Überführung von Entwicklungsdaten in digitale Zwillinge

Digitale Zwillinge sind in vielen Unternehmen in Planung und Umsetzung. Ihre Erstellung ist jedoch mit hohem manuellem Aufwand verbunden. Eine benötigte Industrie 4.0-Fähigkeit stellt daher die Überführung von Entwicklungsdaten in digitale Zwillinge dar.

(16) Industrie 4.0-Lösung auf makro- und mikroskopischer Ebene betrachten

Auch wenn Industrie 4.0-Lösungen vorrangig im makroskopischen Systemverbund betrachtet werden, um den Gesamtüberblick zu behalten, ist ein schneller Wechsel zur Betrachtung der Systemelemente auf der mikroskopischen Ebene essenziell, um in die Tiefe blicken zu können.

(17) Mensch als Teil der Industrie 4.0-Lösung berücksichtigen

Der Mensch rückt durch seine Interaktion mit der Industrie 4.0-Lösung verstärkt in den Fokus und sollte daher zu jedem Zeitpunkt als Teil davon berücksichtigt werden können. Diese Fähigkeit wurde auch im Kontext der *Planung* erwähnt.

Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen

(18) Erkennen von Mustern im Verhalten

Es ist notwendig, Muster im Verhalten von Industrie 4.0-Lösungen erkennen zu können. Dies schafft die Grundlage für das Prognostizieren von Zuständen und Parametern (20).

(19) Physische Komponenten virtuell ersetzen (virtuelle Steuerung)

Eine angestrebte und in Forschungsprojekten bereits umgesetzte Industrie 4.0-Fähigkeit ist die Substitution physischer durch virtuelle Komponenten. Vor allem im Bereich virtueller Steuerungen ergeben sich dadurch neue Möglichkeiten der Interaktion mit der Industrie 4.0-Lösung.

(20) Zustände und Parameter der Industrie 4.0-Lösung erfassen, visualisieren, prognostizieren und beeinflussen

Bereits weit verbreitet im Kontext von Industrie 4.0 sind das Erfassen, Visualisieren und Prognostizieren von Zuständen und Parametern der Industrie 4.0-Lösung (Predictive Maintenance). Es muss darüber hinaus jedoch auch möglich sein, die Parameter der Industrie 4.0-Lösung so zu beeinflussen und zu ändern, wie sie im aktuellen Kontext benötigt werden.

(21) Filtern von relevanten Funktionalitäten

Nicht alle Funktionalitäten der Industrie 4.0-Lösung sind in jedem Kontext relevant. Es muss daher eine Möglichkeit geben, die Funktionalitäten für den benötigten Kontext zu filtern.

(22) Anpassung der Lösung an veränderte Randbedingungen sowie Flexibilisierung

Verschiedene Einflüsse verändern die Planung und Auslegung einer Industrie 4.0-Lösung, deshalb muss es möglich sein, Anpassungen möglichst flexibel vorzunehmen.

(23) Informationen der Lösungen koppeln

Das Sammeln der Informationen ist bei vielen Industrie 4.0-Lösungen bereits erfolgreich implementiert. Es wird jedoch vermehrt angestrebt, diese Informationen über eine gemeinsame Semantik zu koppeln, um möglichst übergreifende Auswertungen durchführen zu können.

(24) Klassifizierung von Modellen beziehungsweise Varianten von Industrie 4.0-Lösungen

Aktuell werden Produkte vorrangig über Klassifizierung in Varianten betrachtet. Auch wenn Industrie 4.0-Lösungen individuell erfasst und ausgewertet werden können, sollte es möglich sein, auch sie zu übergeordneten Klassen zu verbinden, um beispielsweise Muster zu erkennen. Dazu müssen die einzelnen Industrie 4.0-Lösungen wiedererkennbar sein.

(25) Virtuelle Inbetriebnahme

Ist eine Industrie 4.0-Lösung in virtueller Form vorhanden (unterstützt durch Industrie 4.0-Fähigkeit (7)), bietet es sich an, sie auch virtuell in Betrieb zu nehmen. Auf diese Weise müssen Fachkundige nicht vor Ort sein und können dennoch ihre volle Expertise einbringen. Außerdem können dadurch Wartungszeiten und Inbetriebnahmezeiten signifikant verkürzt und ein schnellerer Produktionsstart erreicht werden.

(26) Autonome Entscheidungsfindung des Systems (beispielsweise bei der Wartung)

Sobald die Lösungen ihre Zustände und Parameter selbst erfassen und prognostizieren können, wird eine autonome Entscheidungsfindung der Lösungen angestrebt. Somit soll eine Industrie 4.0-Lösung in der Lage sein, beispielsweise einfache Wartungsentscheidungen selbst zu treffen.

Kompetenzmanagement für Industrie 4.0-Lösungen

(27) Wissen und Informationen über die Industrie 4.0-Lösung speichern und verständlich dokumentieren

Das Wissen über eine Industrie 4.0-Lösung muss verfügbar sein, um es für digitale Methoden nutzbar zu machen. Für die Wissensrepräsentation müssen alle notwendigen Informationen gespeichert und verständlich dokumentiert werden.

(28) Ermittlung und Vermittlung von Kompetenzen für die Bedienung der Industrie 4.0-Lösung

Damit den Beschäftigten eine Interaktion mit der Industrie 4.0-Lösung ermöglicht wird, ist die Vermittlung entsprechender Kompetenzen erforderlich. Um diese Vermittlung effizient durchführen zu können, ist auch die Ermittlung der Kompetenzen simulationsbasiert zu unterstützen.

Die benötigten Industrie 4.0-Fähigkeiten, die von den Interviewten eingesetzt oder angestrebt werden, zeigen große Überschneidungen mit den aus der Literatur analysierten erforschten Industrie 4.0-Fähigkeiten. In Literatur wie Praxis widmen die Expertinnen und Experten die meiste Aufmerksamkeit den Industrie 4.0-Fähigkeiten, die für den Betrieb von Industrie 4.0-Lösung benötigt werden. Industrie 4.0-Fähigkeiten für Planung, Engineering, Erprobung oder Kompetenzmanagement finden weniger Beachtung.

Die Interviewten wurden auch zu genutzten und benötigten Modellen für die angestrebten und eingesetzten Industrie 4.0-Fähigkeiten befragt. Die Ergebnisse der Analyse ihrer Äußerungen werden im kommenden Abschnitt dargestellt.

4.2. Genutzte und benötigte Modelle und Simulationen

Mithilfe der Interviews wurde der Ist-Zustand für aktuell genutzte Modelle und Simulationen im Kontext von Industrie 4.0 ermittelt. Nach Möglichkeit wurden die verwendeten Modelle den im vorherigen Abschnitt ermittelten Industrie 4.0-Fähigkeiten zugeordnet, wobei jedoch nicht immer eine klare Zuordnung möglich war. Abschließend wurde analysiert, welche der im Zuge der Literaturanalyse identifizierten Modellklassen (siehe Anhang A) von den Interviewten bereits zur Beherrschung von Industrie 4.0-Fähigkeiten genutzt oder angestrebt werden, welche in speziellen Fällen eingesetzt werden und welche nicht genannt wurden.

Anforderungsmodelle werden von Befragten verwendet, um zum Beispiel aus bestehenden Nutzerprofilen oder basierend auf physikalischen Parametern zukünftige Anforderungen abzuleiten. Auch die Nutzung von Systemmodellen, beispielsweise in Form der System Modeling Language (SysML)⁷⁴, wurde in den Interviews angegeben. Die Absicht ist hier, das Verständnis für die funktionalen Zusammenhänge zu erhöhen. Beide Modellklassen wurden für den Bereich Planung und Auslegung von Industrie 4.0-Lösungen genannt, insbesondere bei den Industrie 4.0-Fähigkeiten *Ermitteln realitätsnaher Anforderungen an Industrie 4.0-Lösung (1)* und *Ermittlung relevanter Umgebungs- beziehungsweise Nutzungsbedingungen (2)*.

Eine weitere Modellklasse, die in den Interviews oft genannt wurde, waren Informationsmodelle. Laut den gesammelten Aussagen werden diese Modellvarianten bereits eingesetzt, um die Rentabilität von Anlagen zu überprüfen, zum Beispiel zur Verbesserung

der Genauigkeit oder zur Optimierung der Ausnutzung beziehungsweise des Ausschusses. Des Weiteren finden Informationsmodelle Verwendung, um das globale Optimum für die Produktnutzung zu ermitteln und die Anlagen semantisch zu beschreiben. Semantische Informationsmodelle werden weiterhin benutzt, um Abhängigkeiten zwischen Systemkomponenten zu beschreiben. Allerdings wurde auch erwähnt, dass diese Semantik teilweise noch fehlt. Ebenfalls von Bedeutung sind Informationsmodelle beim Aufbauen von Tests aus Realdaten, beim Generieren von Testfällen zum Prüfen der Betriebsphasen oder bei der Erstellung von Instandhaltungsinformationen im Betrieb. Nach den Äußerungen der Interviewten konnten Informationsmodelle der Beherrschung folgender Industrie 4.0-Fähigkeiten zugeordnet werden:

- *Rentabilität der Industrie 4.0-Lösung überprüfen (4)*
- *globales Optimum der Produktnutzung ermitteln (5)*
- *digitales Testen der Industrie 4.0-Lösung auf Realdaten (6)*
- *Teststrategien generieren und optimieren, um Tests zu reduzieren (8)*
- *Mapping von virtuellen und realen Versuchen (9)*
- *Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen Systemkomponenten erfassen (13)*
- *Filtern von relevanten Funktionalitäten (21)*
- *Informationen der Lösungen koppeln (23)*
- *Wissen und Informationen zur Industrie 4.0-Lösung speichern und verständlich dokumentieren (27)*

Geometriemodelle, physikalische und kinematische Modelle wurden ebenfalls als bereits genutzte Modelle benannt. Sie werden im Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen verwendet, zum Beispiel bei der Visualisierung des digitalen Zwillinges. Auch bei der virtuellen Inbetriebnahme werden Geometriemodelle herangezogen, ebenso wie physikalische und kinematische Modelle auf Ebene der einzelnen Produktionsmaschine. Auf Prozessebene werden zum Beispiel thermische Prozesse simuliert oder es wird die Finite-Elemente-Methode (FEM), ein allgemeines numerisches Verfahren zur strukturmechanischen Analyse, mit dem sich beispielsweise Wärmeverteilungen nachbilden lassen, angewandt. Aber auch eine Ebene höher bei der Simulation von Produktionszellen können physikalische und kinematische Modelle eingesetzt werden. Zusammenfassend wurden in den Interviews Geometrie, physikalische und kinematische Modelle im Zusammenhang mit folgenden Industrie 4.0-Fähigkeiten genannt:

- *Digitales Testen der Industrie 4.0-Lösung auf Realdaten (6)*
- *Virtuelle Darstellung von Lösung, Umgebung und Prüfstand (7)*
- *Auswertungen von Parametereinflüssen (11)*
- *Zustände und Parameter der Industrie 4.0-Lösung erfassen, visualisieren, prognostizieren und beeinflussen (20)*
- *Anpassung der Lösung an veränderte Randbedingungen (22)*

Bei der virtuellen Inbetriebnahme oder bei der Planung der Fabrikbelastung werden Materialflussmodelle und -simulationen eingesetzt, zum Beispiel in den Industrie 4.0-Fähigkeiten *Anpassung der Lösung an veränderte Randbedingungen (22)* oder *virtuelle Darstellung von Lösung, Umgebung und Prüfstand (7)*. Auch Betriebsmittelmodelle sind nach Angabe der Befragten von Bedeutung, zum Beispiel bei der bedarfsgerechten Betriebsmitteldimensionierung. Beim Anlaufmanagement, bei der operativen Planung oder dem Service von Industrie 4.0-Lösungen werden Prognosemodelle und Kapazitätsmodelle eingesetzt, insbesondere wird dies in der Fähigkeit *Anpassung der Lösung an veränderte Randbedingungen sowie Flexibilisierung (22)* verortet. Diese Modelle werden als Formen von Informationsmodellen und Prozessmodellen betrachtet und daher im Weiteren nicht gesondert aufgeführt. Weiterhin finden Prozesssimulationen oder Prozessmodelle im Betrieb und im Service Anwendung, zum Beispiel bei der Überprüfung der Rentabilität der Anlage oder beim Neukalibrieren von Prozessen. Für die Planung auf Shopfloor-Ebene oder den Betrieb werden eventdiskrete Simulationen eingesetzt, die für die Fähigkeit *Virtuelle Darstellung von Lösung, Umgebung und Prüfstand (7)* von Bedeutung sind. Die Befragten gaben an, dass auch der digitale Zwilling verwendet werde, und zwar zur Optimierung der Auslegung und Dimensionierung von Industrie 4.0-Lösungen oder für die operative Planung. Digitale Zwillinge finden außerdem Verwendung, um *Zustände der Maschinen zu erfassen und zu prognostizieren (20)*.

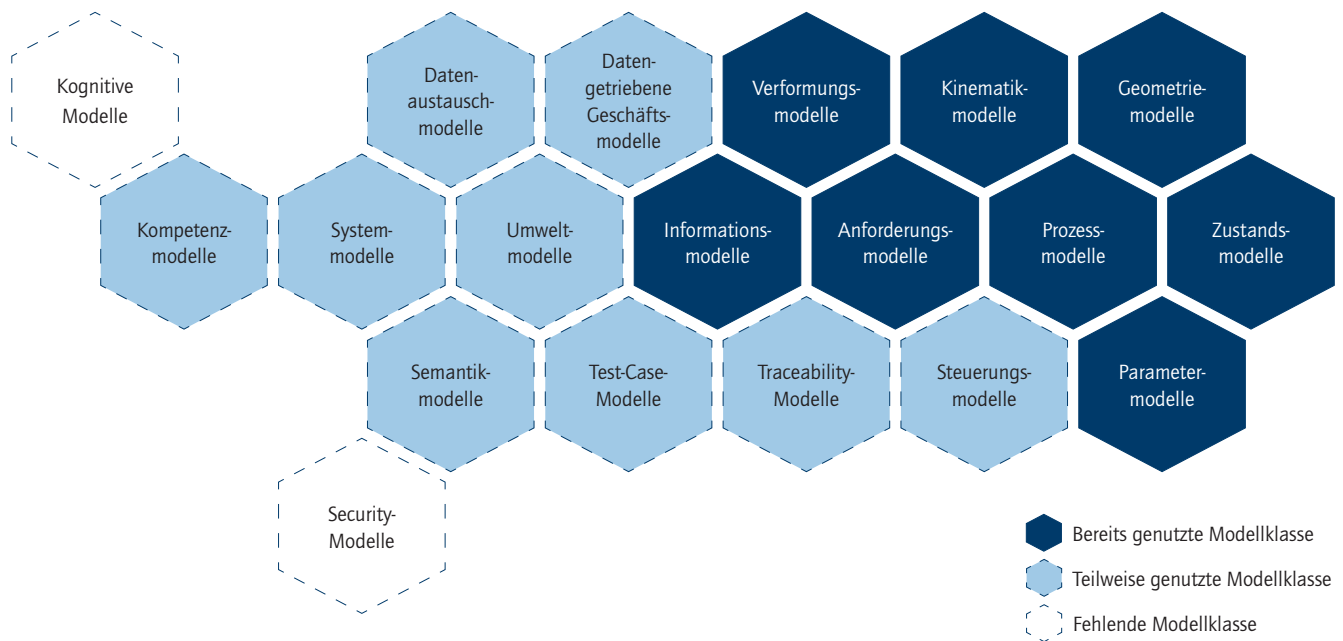
Bei der Planung von flexiblen Industrie 4.0-Anlagen und der Anpassung an Veränderungen werden Systemmodelle eingesetzt. Der Fokus liegt dabei auf solchen, die sich mit der Beschreibung der Systemarchitektur beschäftigen und damit eine Flexibilisierung ermöglichen. Auch werden Kompetenzmodelle für die Industrie 4.0-Fähigkeit *Wissen und Informationen zur Industrie 4.0-Lösung speichern und verständlich dokumentieren (27)* benutzt, um das Wissen der angestellten Expertinnen und Experten zu konservieren. Zur Verbesserung der Produktnutzung wurden in den Interviews auch Nutzungsmodelle genannt und der Industrie 4.0-Fähigkeit *Ermitteln des globalen Optimums der Produktnutzung (5)* zugeordnet. Zudem wurden Test-Case-Modelle für das *Generieren beziehungsweise Optimieren von Teststrategien zur Reduktion von Tests (8)* angeführt. Diese werden für eine optimale Teststrategie bei der Einführung von Variantentests verwendet. Laut einer weiteren Aussage kommen auch Verhaltensmodelle zum Einsatz.

Abbildung 6 stellt dar, welche der im Zuge der Literaturrecherche identifizierten Modellklassen (siehe Anhang A) nach den Angaben der Interviewten bereits für Industrie 4.0-Fähigkeiten genutzt werden (dunkelblau), welche in speziellen Fällen genutzt werden (gestrichelter Rand und hellblau) und welche nicht genannt wurden (gestrichelter Rand und weiß).

Geometriemodelle, Zustandsmodelle, Parametermodelle und *Informationsmodelle* werden bereits häufig eingesetzt, vor allem im Zusammenhang mit Industrie 4.0-Fähigkeiten, die das Visualisieren der Industrie 4.0-Lösung erfordern. Besonders entscheidend ist dies etwa beim Erfassen, Visualisieren und Beeinflussen von Zuständen.

Die Erfassung der Anforderungen erfolgt bereits zunehmend über *Anforderungsmodelle* in dafür entwickelten Tools.

Abbildung 6: Übersicht über die genutzten, teilweise genutzten und nicht genutzten Modellklassen für Industrie 4.0-Intelligenzen



Quelle: eigene Darstellung

Gerade für die Verwaltung von volatilen Anforderungen auf der Basis von Realdaten wird diese schnell anpassbare Modellierung zunehmend erforderlich.

Auch die klassischen Simulationsmodelle in Form von *Verformungsmodellen* und *Kinematikmodellen* sind für das virtuelle Testen von Industrie 4.0-Lösungen bereits verbreitet. Hierzu lässt sich anmerken, dass die Einbindung realer Daten und der Verbund verschiedener Modelle gegenwärtig Forschungsthemen darstellen.

Prozessmodelle werden bereits intensiv für die Flexibilisierung eingesetzt. Potenziale liegen hier vor allem in der Kopplung mit weiteren Modellen, etwa Modellen zum Einsatz für KI, um eine automatisierte Umplanung einfacher zu gestalten.

Teilweise genutzt werden *Traceability-Modelle* und *Systemmodelle*, vorrangig wenn es um äußerst komplexe Systeme geht und Ansätze des Modellbasierten Systems Engineering (MBSE) zur Handhabung erprobt werden. Jedoch werden hier noch nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft, da es bei der Nutzung von Systemmodellen vorrangig um die Darstellung von Systemarchitekturen geht, diese jedoch nicht aktiv genutzt werden.

Semantikmodelle werden grundsätzlich bereits verwendet. Es mangelt jedoch unter anderem noch an der Kopplung mit Informationsmodellen, um einen optimalen Mehrwert zu generieren.

Steuerungsmodelle wurden bisher vorrangig als Forschungsthema untersucht. Diese gilt es, vermehrt in die Praxis zu bringen, um so die Vorteile der virtuellen Steuerung zur Gänze ausschöpfen zu können.

Die Umweltberücksichtigung über die Erfassung realer Umgebungsbedingungen in *Umweltmodellen* nannten die Befragten als wichtiges Thema, das jedoch bisher selten adressiert wird. Umweltmodelle bilden die Grundlage für die realdatenbasierte Umsetzung von Industrie 4.0-Fähigkeiten.

Zur Optimierung der Teststrategien eignen sich *Test-Case-Modelle*, die flexibel angepasst und optimiert werden können. Diese wurden jedoch bisher nur vereinzelt eingesetzt.

Kompetenzmodelle wurden nur teilweise als wichtig im Zusammenhang mit Industrie 4.0-Fähigkeiten zum Kompetenzmanagement erachtet, was unter anderem damit verbunden ist, dass das Kompetenzmanagement bisher erst wenig Beachtung gefunden hat. Um die Kompetenzen effizient zu erweitern, ist es jedoch erforderlich, diese Form der Modelle unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen zu verwenden.

Eine in den Äußerungen der Befragten eher implizit vorkommende Modellklasse sind *datengetriebene Geschäftsmodelle*. Sie wurden selten direkt als Industrie 4.0-Fähigkeit erwähnt, möglicherweise weil Geschäftsmodelle der Industrie 4.0 für die Befragten völlig selbstverständlich datenbasierte Geschäftsmodelle sind.

Die Klasse der *Datenaustauschmodelle* wird als ein zentrales Thema der Vernetzung von Lösungen angesehen, wurde bisher jedoch ebenfalls nur teilweise implementiert. Viele Lösungen bauen auf proprietären Modellen auf, die nicht zum Austausch genutzt werden können. Eine durchgehende Standardisierung zur Schaffung von Schnittstellen könnte die Vernetzung der Modelle unterstützen.

Aktuell von den Befragten noch nicht genutzt und ihrer Ansicht nach auch nicht benötigt werden kognitive Modelle und Security-Modelle, die im Zuge der Literaturanalyse als Modellklassen identifiziert wurden. Insbesondere für die Vorhersage des Verhaltens von Nutzerinnen und Nutzern und für die Einbindung des Menschen in Industrie 4.0-Lösungen stellen *kognitive Modelle* jedoch ein geeignetes Mittel dar. Da Industrie 4.0-Lösungen mit anderen Lösungen kommunizieren und interagieren, sind auch *Security-Modelle* von Bedeutung, beispielsweise wenn es um die autonome Entscheidungsfindung von Industrie 4.0-Lösungen geht.

4.3. Benannte Optimierungspotenziale für Modellbildung und Simulation

Neben der Frage, welche Modelle und Simulationen aktuell Verwendung finden oder benötigt werden, galt ein weiterer Schwerpunkt der Interviews der Frage, wie sich genutzte Modellierungs- und Simulationsansätze optimieren ließen, um benötigte Industrie 4.0-Fähigkeiten besser zu unterstützen. Hierfür wurden die erfassten Aussagen zu Clustern thematisch ähnlicher Punkte zusammengefasst.

Am häufigsten wurde Optimierungspotenzial im Bereich der Verknüpfung verschiedener Simulationen, Modelle oder Domänen gesehen. Industrie 4.0-Lösungen bestehen häufig aus unterschiedlichen Systemen und aus verschiedenen Fachgebieten, die erst durch ihr Zusammenwirken die Funktion der Industrie 4.0-Lösung erfüllen. Eine in den Interviews genannte Herausforderung ist die fehlende direkte Kopplung vieler Tools, ebenso die Verbindung der Entwicklungspartner mit dem Prozesspartner. Weiterhin stören zum Teil proprietäre Modellformate die Integration, wenn es um den Informationsaustausch zwischen Modellen geht, und erschweren es, eine Industrie 4.0-Lösung in ihrer Gesamtheit betrachten zu können. Hier knüpft eine Aussage an, dass eine Normierung oder Standardisierung sinnvoll wäre, um eine Brücke zwischen verschiedenen Simulationen und Modellen zu schlagen. Schwierig ist allerdings grundsätzlich, dass bei Nutzung verschiedener Modelle die direkten Wechselwirkungen nicht leicht abgebildet werden können. In einer Aussage wurde als weiteres grundlegendes Problem bemängelt, dass meist nur Teilaspekte simulierbar wären statt Gesamtverbänden. Auch bei der Aktualisierung und Verknüpfung von Daten wird Optimierungspotenzial gesehen, zum Beispiel, dass eine sofortige Datenverfügbarkeit hergestellt werden muss, die im Idealfall auch automatisch erfolgt. Dazu ist ein Wandel von statischen hin zu dynamischen Modellen erforderlich, die kein manuelles Einpflegen von Änderungen erfordern, sondern sich auf Basis von Modellverknüpfungen anpassen können. Ein Interviewpartner sieht Verbesserungspotenzial in einer engeren Verknüpfung zwischen realer und virtueller Welt beim Engineering von Industrie 4.0-Lösungen, zum Beispiel bei der virtuellen Inbetriebnahme oder beim Aktualisieren einer Fabrik-Simulation. Auch sollte die Kopplung verschiedener Modelle erhöht werden, um Auswertungen zu generieren. Eine befragte Person erachtet es als erforderlich, beim Abgleich von Simulation und realem Versuch eine bessere Synchronität herzustellen.

Für die Vernetzung der Modelle und Industrie 4.0-Lösungen ist die Semantik ein relevanter Aspekt. Die meisten Lösungen sind bereits weit entwickelt im Akkumulieren von Informationen, können diese mit weiteren Lösungen jedoch häufig nicht vernetzen, weil eine gemeinsame Semantik fehlt. Dieses Problem spiegelt sich auch in den von den Befragten genutzten Modellen wider: Um miteinander interagieren zu können, müssten sie eine gemeinsame Semantik unterstützen. Die Interviewten wünschen sich beispielsweise, dass Informationsmodelle semantisch unterstützt werden, um die Verarbeitbarkeit der Informationen zu verbessern.

Durch den hohen Vernetzungsgrad, die Dynamik und das erforderliche Skalieren der Systemebene auf die Ebene der Systemelemente

wird für Simulationen eine Flexibilisierung erforderlich. Die Simulationen müssen einfach gekoppelt und entkoppelt werden können, um zum jeweiligen Zeitpunkt die optimalen Einsatzbedingungen zu ermitteln. Da der Einsatz von Simulationslösungen bei steigender Komplexität von Industrie 4.0-Lösungen zunehmend erforderlich wird, müssen die Ergebnisse und damit die Vorgänge in der Simulation nachvollziehbar sein. Ähnlich wie das Konzept der Explainable Artificial Intelligence benötigen Simulationen einen Ansatz, der sie nachvollziehbar werden lässt. Hier ist in Anlehnung an Produktdaten- und Produktlebenszyklussysteme (PDM/PLM) der Einsatz von Simulationsdatenmanagement vorstellbar. Hierdurch soll es etwa bei Schadensfällen möglich werden, die genutzten Simulationsmodelle, Simulationsergebnisse und betrachteten Randbedingungen für die Auslegung der Industrie 4.0-Lösung zu ermitteln.

Teilweise wird eine Erhöhung der Transparenz und Verständlichkeit von Simulationen angestrebt, beispielsweise bei der Kapazitätsplanung. Bemängelt wurde, dass die schwer verständliche Mathematik hinter manchen Simulationen eine Fehlersuche verkompliziert. Als weiteres Ziel für Verbesserung wurde die Schaffung von Informationstransparenz bei Variantentests gesehen.

Bezüglich des Einsatzes von KI zur Unterstützung von Industrie 4.0-Fähigkeiten wurden ebenfalls Aussagen über Verbesserungspotenziale getätigt. Nutzen Modelle KI in Simulationen bestehen oft Unsicherheiten: Wie gut kommt die KI im System zurecht? Wie schnell lernt sie? Wie akkurat ist sie? In einer Aussage wurde auch darauf hingewiesen, dass die Nutzung realer Daten in KI-Modellen verbessert werden müsse. Zudem werden in evolutionären Algorithmen oder Reinforcement-Learning allgemeine Verbesserungsmöglichkeiten für die Optimierung der Produktnutzung gesehen.

Viel Optimierungspotenzial wurde darin gesehen, Simulationen und Modelle einfacher nutzbar und zugänglicher zu machen. So sei zum Beispiel schon heute eine beschleunigte Modellierung durch Objekttemplates möglich, aber dennoch müssten noch weitere Wege gefunden werden, die Modellierung schneller und einfacher gestalten zu können, sodass sie effizient für Industrie 4.0-Fähigkeiten eingesetzt werden könne. Ein weiterer Kommentar bezog sich darauf, dass Simulationen Expertensysteme darstellten. Da Simulationsfachkräfte sowohl teuer als auch schwer zu finden wären, sollten Simulationen demokratisiert und für weitere Entwicklungsbeiträge zugänglich gemacht werden, zum Beispiel durch KI-Modelle oder Experimental Digital Twins. Die Forderung nach Demokratisierung der Simulation erhob auch ein weiterer Interviewpartner, um Simulationen auch Nichtfachleuten zugänglich zu machen.

Einige Interviewte wünschten sich eine Reduktion notwendiger physischer Tests. Zum einen könnten Verbesserungen in der Teststrategie das physische Testen auf das Ende der Entwicklung beschränken. Zum anderen könnten Testzeiten reduziert und dadurch die Entwicklungszeiten verkürzt werden, wenn mehr virtuelle Tests möglich wären.

Ein weiterer Ansatzpunkt für Verbesserungen wird in der Beschleunigung von Simulationen gesehen. Hier ließe sich laut einer Aussage sowohl die Leistung der Hardware als auch die Schnelligkeit der Simulationssoftware optimieren.

4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Interviews, die in den vorherigen Abschnitten präsentiert wurden, zusammengefasst.

Aus den Interviews wurden 28 eingesetzte beziehungsweise angestrebte Industrie 4.0-Fähigkeiten ermittelt. Es wurde erhoben, welche Modellierungs- und Simulationsansätze zur Unterstützung dieser Fähigkeiten zum Einsatz kommen und wie sich diese nach Ansicht der Interviewten optimieren ließen.

Mit digitalen Zwillingen und den dazugehörigen Modellen und Simulationen können Wertschöpfungsströme bereits gut erkannt, geplant und optimiert werden. Kapazitäten lassen sich dadurch virtuell abbilden und die optimalen Parameter für Industrie 4.0-Lösungen bestimmen. Um die gesamte Wertschöpfung bestmöglich abzubilden, sind jedoch verstärkt offene Formate der Modelle erforderlich, damit ein starker Austausch zwischen den verschiedenen Stakeholdern erfolgen kann. So lassen sich beispielsweise virtuelle Repräsentationen der digitalen Geschäftsmodelle über KI-Modelle effizient optimieren.

Für die Erprobung von Industrie 4.0-Lösungen werden zukünftig verstärkt Industrie 4.0-Fähigkeiten notwendig. Diese beziehen sich vorrangig auf das virtuelle Testen, auch in Kombination mit physischen Tests beziehungsweise realen Daten. Es zeigte sich hier, dass virtuelle Modelle und physische Aufbauten zunehmend kombiniert werden müssen. Dabei kann es sich sowohl um die Nutzung physischer Tests zur Verifizierung spezifischer Simulationsergebnisse handeln, die anschließend in der Simulation simultan für verschiedene Konfigurationen berechnet werden, als auch um das direkte Verknüpfen von Modell und physischem Aufbau, etwa bei Smart Hybrid Prototyping.⁷⁵

Für das Mapping von realen Daten und virtuellen Modellen ist eine semantische Anreicherung erforderlich. Die Daten müssen über semantische Informationsmodelle einfacher nutzbar gemacht werden. Visuelle Modelle, wie Geometriemodelle, gewinnen dabei verstärkt an Bedeutung, um den Ablauf und die Ergebnisse der Erprobung entsprechend darstellen zu können. Noch nicht gelöst sind die Simulationskopplung. Benötigt wird die Kopplung von Datenanalytik, inklusive der aus Daten mithilfe von KI-Methoden und -Verfahren

gewonnenen Erkenntnisse, mit physikbasierten deterministischen Simulationsverfahren des Verhaltens sowie mit angestrebten eventbasierten Simulationsmodellen der gesamten Fabrik.

Die Semantiken bilden auch die Grundlage für benötigte Industrie 4.0-Fähigkeiten zur autonomen Entscheidungsfindung von Industrie 4.0-Lösungen. Ohne das Wissen, welche Form der Daten vorliegt, kann nicht maschinenbasiert entschieden werden, ob beispielsweise eine Wartung durchgeführt werden muss oder eine Fehleingabe vorliegt. Durch die Substitution physischer Komponenten in Industrie 4.0-Lösungen durch modellbasierte Komponenten, etwa eine virtuelle Steuerung, werden physisch bedingte Verzögerungen und Störungen ausgeschlossen und es wird eine höhere Adaptabilität erreicht. Dies ist auch bei der Flexibilisierung von Industrie 4.0-Lösungen hilfreich.

Sowohl im Betrieb als auch im Engineering ist es von Bedeutung, Industrie 4.0-Lösungen im Systemverbund sowie auf Systemelementebene betrachten zu können. Dazu ist eine Verknüpfung beispielsweise über Systemmodelle erforderlich, die alle Bestandteile der Lösung miteinander vereinen. Relevant ist außerdem, den Modellierungsaufwand gering zu halten, um eine möglichst hohe Effizienz zu erzielen. Das kann unter anderem durch die Wiederverwendung von Modellen als Modelle reduzierter Ordnung sowie die automatische Überführung in Modelle für digitale Zwillinge gelingen.

Das Kompetenzmanagement für Industrie 4.0-Lösungen wird bisher kaum als Bereich notwendiger Industrie 4.0-Fähigkeiten gesehen. Zwar wird der Mensch als Teil der Industrie 4.0-Lösung betrachtet, die Vermittlung des benötigten Wissens für den Umgang mit Industrie 4.0-Lösungen dagegen kaum. Hier ist verstärkt darauf zu achten, dass die Lösungen für die Beschäftigten, die damit interagieren, handhabbar bleiben. Versuche in virtuellen Umgebungen, bei denen Interaktionen mit Industrie 4.0-Lösungen simuliert werden, können für die Wissensvermittlung hilfreich sein.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die meisten benötigten Industrie 4.0-Fähigkeiten durch Modellierung und Simulation unterstützt beziehungsweise durch diese zum Teil erst ermöglicht werden. Es sind jedoch teilweise Verbesserungen bisheriger Modellierungs- und Simulationstheorien erforderlich.

5. Interpretation der Ergebnisse

Aufbauend auf den Ergebnissen der Literaturanalyse und der Interviewauswertung werden im folgenden Kapitel die Forschungsfragen der Expertise beantwortet. Dafür erfolgt zunächst eine Einteilung der benannten benötigten Industrie 4.0-Fähigkeiten in Reifegrade und die Diskussion der Optimierungspotenziale

5.1. Reifegrade von Industrie 4.0-Fähigkeiten

Industrie 4.0-Intelligenzen stellen Fähigkeiten von verbundenen Industrie 4.0-Systemlösungen dar. Diese Industrie 4.0-Intelligenzen ermöglichen die Umsetzung von Industrie 4.0-Fähigkeiten, die sich entsprechend ihrer Komplexität kategorisieren lassen. Dadurch wird die Bewertung des aktuellen Stands bestehender Modellierungs- und Simulationstheorien ermöglicht.

Die Einordnung von Industrie 4.0-Fähigkeiten nach Reifegraden orientiert sich am Umfang der Systemelemente, die in die Beherrschung der Industrie 4.0-Fähigkeiten involviert sind. Ein ähnliches Vorgehen ist beim im PEGASUS-Projekt spezifizierten Modell zur systematischen Beschreibung von Szenarien im automatisierten Fahren zu finden.⁷⁶ Hier umfasst das unterste Level die Geometrie und Topologie der Straße und das höchste Level die digitalen Informationen, etwa als digitale Karten.

- **1. Grad:** Industrie 4.0-Fähigkeiten des niedrigsten Reifegrads beziehen sich auf singuläre Industrie 4.0-Systemlösungen und die direkt damit verbundenen Daten. Hierzu zählen:
 - *Digitales Testen der Industrie 4.0-Lösung auf Realdaten (6)*
 - *Generierung von Teststrategien (8)*
 - *Mapping von virtuellen und realen Versuchen (9)*
 - *die Auswertung von Parametereinflüssen (11)*
 - *Wiederverwendung bereits verwendeter Daten (12)*
 - *Überführung von Entwicklungsdaten in digitale Zwillinge (15)*
 - *Erkennen von Mustern im Verhalten (18)*
 - *das virtuelle Ersetzen physischer Komponenten (19)*
 - *das Erfassen, Visualisieren, Prognostizieren und Beeinflussen von Zuständen und Parametern der Industrie 4.0-Lösung (20)*
 - *die virtuelle Inbetriebnahme (25)*
 - *die autonome Entscheidungsfindung des Systems bei einfacheren Problemstellungen, etwa zur Klärung des Erfordernisses einer Wartung (26).*

Beispiel für den Einsatz von Industrie 4.0-Fähigkeiten

1. Grads

Bei der Auslegung eines Schweißroboters in der Matrixproduktion wird das Schweißverfahren simulativ abgesichert. Um die korrekte Auslegung in der Erprobung zu überprüfen, werden Versuche gefahren und die realen Ergebnisse an den Roboter zum Abgleich mit seinen Simulationsergebnissen zurückgespielt. Mit diesen Daten kann der Roboter anschließend kontinuierlich sein Schweißverfahren optimieren.

- **2. Grad:** Auf einer höheren Ebene sind Industrie 4.0-Fähigkeiten zu sehen, die weitere Daten aus ihrer Umgebung erfordern. Dazu zählen
 - *die Ermittlung und Nutzung realitätsnaher Anforderungen an die Industrie 4.0-Lösung (1)*
 - *das Ermitteln relevanter Umgebungs- und Nutzungsbedingungen (2)*
 - *die Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus und der Geschäftsmodelle während der Planung, Auslegung, Entwicklung und Nutzung (3)*
 - *die Überprüfung der Rentabilität der Industrie 4.0-Lösung (4)*
 - *das Filtern relevanter Funktionalitäten (21)*
 - *die Anpassung der Lösung an veränderte Randbedingungen (22)*

Beispiel für den Einsatz von Industrie 4.0-Fähigkeiten

2. Grads

Der Schweißroboter in der Matrixproduktion wird von verschiedenen äußeren Randbedingungen beeinflusst. Beispielsweise hängt die korrekte Platzierung der Schweißpunkte davon ab, wie die Bauteile in der Produktionszelle positioniert sind. Deshalb muss der Schweißroboter in der Produktion darauf reagieren und sein Programm zur Schweißpunktplatzierung für jedes neue Teil anpassen.

- **3. Grad:** Die Analyse komplexer Systemverbände ist auf dem dritten Level zu finden. Hierzu zählen:
 - *das globale Optimum der Produktnutzung zu ermitteln (5)*
 - *die virtuelle Darstellung von Lösung, Umgebung und Prüfstand (7)*

- die Betrachtung der Industrie 4.0-Lösung im Systemverbund (10)
- die Erfassung von Abhängigkeiten und Zusammenhängen zwischen den Systemkomponenten (13)
- die Betrachtung auf mikro- und makroskopischer Ebene (16)
- das Koppeln der Informationen verschiedener Industrie 4.0-Lösungen (23)
- die Klassifizierung von Modellen beziehungsweise Varianten von Industrie 4.0-Lösungen oder Industrie 4.0-Lösungsverbänden (24)

Beispiel für den Einsatz von Industrie 4.0-Fähigkeiten 3. Grads

Der Schweißroboter arbeitet in seiner Zelle mit verschiedenen anderen Robotern zusammen. Für die korrekte Bahnplanung muss er sich mit den anderen Robotern in der Fertigungszelle abstimmen und so das globale Optimum der Bahnplanung bestimmen.

- **4. Grad:** Den höchsten Grad an Industrie 4.0-Fähigkeiten stellen die Integrationen mit dem Menschen dar. Hierunter fallen:
 - das Schaffen von Integrationslösungen an der Schnittstelle Mensch-Technik (14)

- die Betrachtung des Menschen als Teil der Lösung (17)
- das Speichern und verständliche Dokumentieren des Wissens und der Informationen zur Industrie 4.0-Lösung (27)
- die Ermittlung und Vermittlung von Kompetenzen (28)

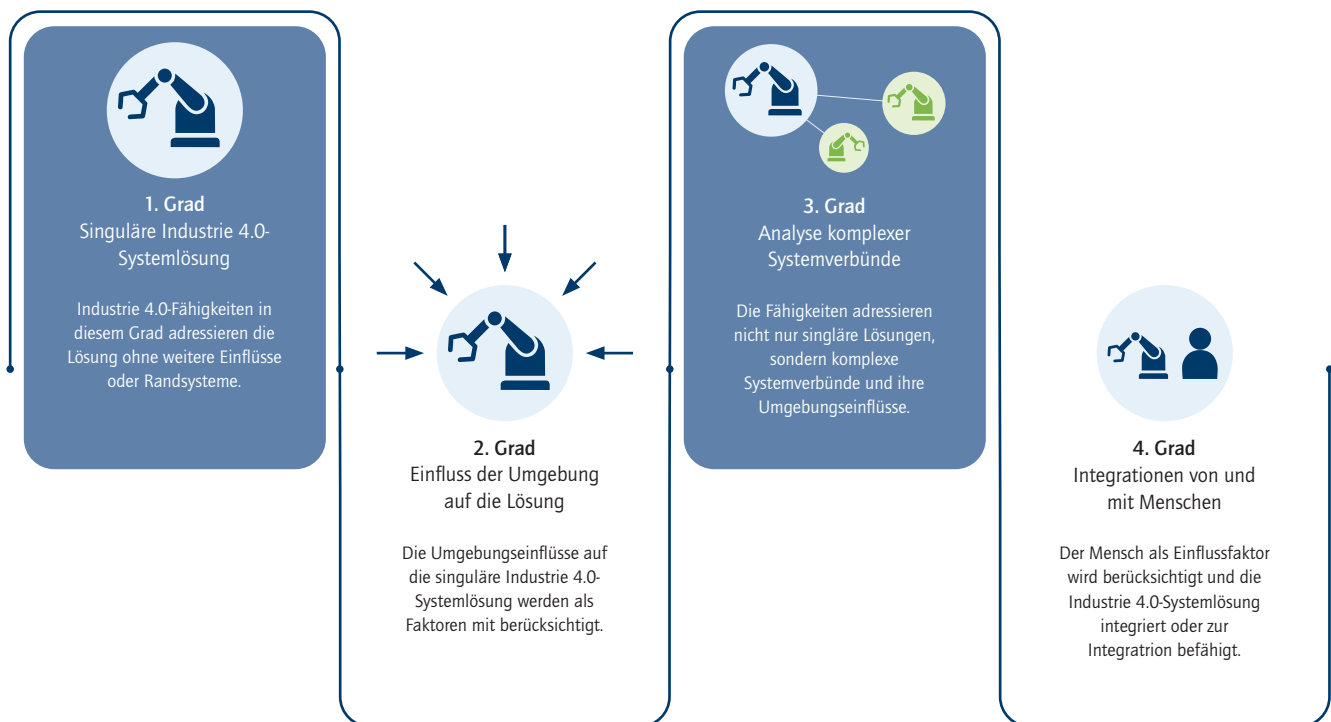
Beispiel für den Einsatz von Industrie 4.0-Fähigkeiten 4. Grads

Einzelne Produktionsschritte können nur von Menschen ausgeführt werden. In der Fertigungshalle ist daher eine Vielzahl an Menschen unterwegs, die von den Industrie 4.0-Systemlösungen berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise müssen sie den Menschen die wichtigsten Informationen zur Fehlerbehebung beim Ausfall einer Komponente vermitteln können, damit diese die erforderlichen Schritte einleiten können.

Die Realisierung von Industrie 4.0-Intelligenzen ist somit von zwei Aspekten abhängig: der Anzahl der dafür notwendigerweise in Kombination abzudeckenden Industrie 4.0-Fähigkeiten und ihrem jeweiligen Reifegrad. Industrie 4.0-Intelligenzen, die das Zusammenspiel mit dem Menschen erfordern, können somit als wesentlich komplexer angesehen werden als Industrie 4.0-Intelligenzen, die lediglich auf Systemebene realisiert werden.

Abbildung 7 stellt die Grade der Industrie 4.0-Fähigkeiten in einer Übersicht dar.

Abbildung 7: Übersicht der Grade der Industrie 4.0-Fähigkeiten



Quelle: eigene Darstellung mit Symbolen von flaticon.com

5.2. Diskussion von Optimierungspotenzialen der Modellierung und Simulation

In Abschnitt 4.3 wurden die von den Interviewten genannten Optimierungspotenziale der Modellierung und Simulation zur Unterstützung von Industrie 4.0-Fähigkeiten dargestellt. Im Folgenden werden diese Aussagen aufgegriffen und diskutiert.

Verknüpfung verschiedener Simulationen und Modelle

Die Verknüpfung von Modellen und Simulationen stellt eine Kernanforderung für Industrie 4.0-Fähigkeiten ab dem 2. Grad dar. An der Entwicklung von Industrie 4.0-Lösungen sind deutlich mehr Einzelsysteme beteiligt als bei konventionellen Systemen. Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, existieren bereits geeignete Modelle und Simulationen, um einzelne Komponenten und Aspekte abzubilden, allerdings fehlt es an der Verbindung zu einem Gesamtsystem. Die Interviewten wünschen sich Investitionen in die Optimierung von Modellen und Simulationen, damit diese besser Gesamtsysteme simulieren können statt lediglich Teilaspekte. Für die Verknüpfung wurden die folgenden Optimierungspotenziale identifiziert:

- Befähigung zur Kopplung verschiedener Tools für den Informationsaustausch zwischen Modellen, die unmittelbare und allgemeine Zurverfügungstellung von Daten und das Simulieren von Gesamtverbänden und -systemen
- Normierung und Standardisierung des Datenaustausches zwischen verschiedenen Teilmodellen und -simulationen
- Etablierung eines integrierten Daten- und Simulationsmanagements

Normierung und Standardisierung sind für einen effizienten Informationsaustausch erforderlich, der die Basis für eine erfolgreiche Simulation von Gesamtsystemen bildet. Dies ist ebenfalls von Bedeutung, um Echtzeitdaten in Simulationen und Modelle zu übertragen und dadurch den aktuellen Entwicklungsstand der Industrie 4.0-Lösung abzubilden, was zum Beispiel bei der Entwicklung von digitalen Zwillingen hilfreich ist. Ähnliche Anforderungen und Bedarfe werden auch in der Entwicklung des automatisierten Fahrens und in der Entwicklung von Luftfahrzeugen gesehen.⁷⁷

Wichtig ist ein integriertes Daten- und Simulationsmanagement, das in der Lage ist – ähnlich einem PLM-System –, verschiedene Simulationen und Modelle miteinander zu verknüpfen. Insbesondere eine durchgehende Nachverfolgbarkeit der Eingangsdaten, der verwendeten Modelle und der Simulationsergebnisse führt zu mehr Transparenz bei den digitalen Abläufen und versetzt die Benutzenden in die Lage, Fehler zu finden, Wartungsarbeiten durchzuführen und Systeme zu erweitern. Es ist zusätzlich wichtig, einschätzen zu können, wie valide die Simulationsergebnisse sind, zum Beispiel auf der Basis von Informationen über die angewendeten Modelle die

Herkunft der Eingangsdaten.⁷⁸ Hierfür ist ein integriertes Daten- und Simulationsmanagement ein zielführender Lösungsansatz.

Beispiel für ein Simulationsmanagementsystem

Die Industrie 4.0-Intelligenzen treffen ihre Entscheidungen auf Basis von Simulationen mit aktuellen und historischen Daten. So optimiert der Schweißroboter in der intelligenten Matrixproduktion seine Bahnplanung für die Schweißpunkte auf Basis vorheriger Verschweißungen und aktueller Parameter der weiteren Roboter. Sollte bei der Qualitätskontrolle festgestellt werden, dass ein Schweißpunkt fehlerhaft platziert wurde, sind die Daten für die Berechnung dieses Schweißpunkts nachzuverfolgen, um zukünftig diese Abweichung zu vermeiden.

Datenbasis

Die Interviewten sahen auch Verbesserungsmöglichkeiten in Bezug auf die Datengrundlage von Industrie 4.0-Lösungen:

- Vereinfachung der Einbindung neuer Datenquellen durch Standardisierung und Normierung
- Kontextsensitivität der Daten durch den Einsatz von Semantik
- die Verbesserung der allgemeinen Datenlage in den Unternehmen

Bei einer durchgehenden Standardisierung ist es einfacher, Datenquellen ohne größeren Aufwand einzubinden und dadurch eine bessere Datengrundlage zu schaffen. Forschungspotenzial gibt es bezüglich der Verbesserung der Datengrundlage für Modelle und Simulationen. Nach Aussage der Interviewten wird auch hier als wünschenswert angesehen, die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten herzustellen und zu erhöhen. Ebenso existiert Forschungsbedarf hinsichtlich der Kopplung von Datenströmen mit Modellen, da diese Kopplung bisher nur partiell funktioniert.

Für die Standardisierung der Verknüpfung ist das Verständnis des Kontexts, in dem die Daten gewonnen und genutzt werden, entscheidend. Hierfür ist es erforderlich, durch Einsatz von Semantiken kontextsensitive Daten und Modelle zu erzeugen. Mit diesen kann das System in spezifischen Situationen besser zwischen Anwendungsdaten und möglichen Ergebnissen von Simulationen unterscheiden.

Grundsätzlich besteht Bedarf, die Datengrundlage zu verbessern, da die Durchführung mancher Modellierungen und Simulationen andernfalls nur schwer möglich ist.⁷⁹ Ohne Daten kann beispielsweise keine belastbare Aussage zur Planung der Auslastung oder der Kapazitäten getroffen werden.

77 Vgl. prostep 2021.

78 Vgl. ebd.

79 Vgl. prostep 2021.

Eine solide und umfangreiche Datenbasis ermöglicht nicht nur eine umfassendere Echtzeitüberwachung, sondern auch den Einsatz von datengetriebenen Services und Algorithmen. Beim zu erwartenden erhöhten Datenaufkommen in der Industrie 4.0 kann eine gute Datengrundlage einen Vorteil verschaffen, ein Beispiel ist das Training von Machine-Learning-Modellen.

Beispiel für den Einsatz von Semantiken

In einem komplexen Montageprozess existieren viele verschiedene Datenquellen. Diese sind oftmals auf mehrere IT-Systeme verteilt und liegen in verschiedenen Formaten vor. Durch die separaten Datensilos müssen bei auftretenden Problemen mehrere Datenquellen durchforstet werden. Hier kann durch den Einsatz von Semantiken, zum Beispiel durch das Verknüpfen der Daten als semantisches Netz, eine Kontextualisierung hergestellt werden. So können jeweils zusammenhängende Informationen angezeigt werden, ohne aktiv danach suchen zu müssen, was umso wichtiger ist, je komplexer die zu untersuchenden Systeme sind.

Transparenz, Verständlichkeit und Zugänglichkeit

Als weiteren Punkt für Optimierung haben die Interviewten die Erhöhung der Transparenz und Verständlichkeit von Simulationen und Modellen benannt:

- breite Benutzbarkeit von Simulationen und Modellen
- sozio-technische Gestaltung von Industrie 4.0-Lösungen.

Sowohl der Mangel an Fachleuten als auch der hohe Kostenfaktor bei ihrem Einsatz ist ausschlaggebend für diesen Verbesserungswunsch. Es sollen Mittel und Wege gefunden werden, wie auch Personen ohne hochspezialisierte Expertise mit Modellen und Simulationen arbeiten können. Die Herausforderung hierbei besteht im Abwägen zwischen Komplexität und Benutzbarkeit. Nicht bei jedem Modell und jeder Simulation kann Allgemeinverständlichkeit erreicht werden. Der Einsatz von digitalen Zwillingen kann dazu beitragen, die Ist-Situation einfacher erfassen zu können. Auch können gut abbildbare Simulationen in Blackboxes oder auch in trainierten Modellen für den KI-Einsatz versteckt werden. Dieser Ansatz wäre nutzerfreundlich, stünde jedoch der ebenfalls geforderten Transparenz entgegen.

Mehr Transparenz und Verständlichkeit ist nicht nur vorteilhaft in der Benutzung, sondern wird auch dabei helfen, Fehler leichter zu identifizieren und zu beheben sowie Verbesserungspotenziale zu entdecken. Von Bedeutung ist zum Beispiel bei zu erwartendem Anstieg der Komplexität Transparenz bezüglich der Herkunft der verwendeten Informationen herzustellen.

Ein Forschungsbedarf in diesem Zusammenhang ist die Untersuchung der sozio-technischen Gestaltung von KI-basierten

Industrie 4.0-Lösungen. Durch steigende Automatisierung werden die Tätigkeiten für die Überwachenden monotoner, die Häufigkeit, eingreifen zu müssen, sinkt, ebenso wie die Systemtransparenz abnimmt. Dies führt auf der anderen Seite dazu, dass das Verständnis bei unerwarteten oder sogar kritischen Systemzuständen gering ist und die Reaktionsfähigkeit leidet.⁸⁰ Diese unerwünschten Auswirkungen einer höheren Automatisierung müssen besser untersucht werden. Darüber hinaus wird von den Autoren für die Untersuchung von KI im Kontext der Simulation von Industrie 4.0-Intelligenzen die Ausarbeitung einer gesonderten Expertise empfohlen.

Beispiel für die breite Benutzbarkeit von Modellen

Von der Auslegung über das Engineering, die Erprobung bis hin zum Betrieb wird eine Vielzahl an Modellen und Simulationen benötigt und erzeugt. Viele davon sind sehr komplex. So ist beispielsweise die Schweißsimulation zur Auslegung des Schweißprozesses von Personen, die die Wartung durchführen, nicht so einfach zu verstehen. Das Finden eines Fehlers oder Testen neuer Konfigurationen ist deshalb oft nur hochspezialisiertem Fachpersonal möglich. Ein Blackbox-Modell, in dem neue Parameter eingegeben und getestet werden können, kann hier die Wartung beschleunigen und so einen schnelleren Wiederanlauf der Produktion gewährleisten.

5.3. Beantwortung der Forschungsfragen

Auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse können die Forschungsfragen der Expertise nun beantwortet und Rückschlüsse auf die Realisierung von Industrie 4.0-Intelligenzen gezogen werden.

Forschungsfrage 1:

Welche bestehenden Modellierungen und Simulationen reichen aus, welchen Grad der Industrie 4.0-Fähigkeiten zu erfassen und vorherzusagen?

Die Antwort auf diese Frage erschließt sich bei Betrachtung der verwendeten Modellklassen in [Abbildung 6](#). Hier zeigt sich, dass die bestehenden Modellierungs- und Simulationstheorien für Industrie 4.0-Fähigkeiten 1. Grads ausreichend sind. Zu diesen Fähigkeiten zählen unter anderem die *virtuelle Darstellung von Lösung, Umgebung und Prüfstand (7)*, das *Erkennen von Mustern im Verhalten (18)*, die *Erfassung und Visualisierung von Zuständen des Systems (20)* und die *virtuelle Inbetriebnahme (25)*, die vorrangig auf Geometrie-, Zustands-, Prozess- und Test-Case-Modellen basieren.

Bei Industrie 4.0-Fähigkeiten 2. und 3. Grads mangelt es an einer Verknüpfung der verschiedenen Modellierungs- und Simulationsansätze. Für das *digitale Testen auf Realdaten (6)* und das *Mapping von virtuellem und realem Test (9)* müssen beispielsweise Semantikmodelle stärker in Simulationen eingebunden werden, damit

die Zuordnung von Realdaten in den relevanten Kontext erfolgen kann. Für *die Erfassung der Zusammenhänge in Industrie 4.0-Systemlösungen (13)* muss verstärkt auf Architekturbeschreibungen zurückgegriffen werden, zum Beispiel auf Systemmodelle, wie sie im Modellbasierten Systems Engineering (MBSE) verwendet und bisher erst wenig genutzt werden.

Noch gar nicht abgedeckt werden Industrie 4.0-Fähigkeiten 4. Grads, für die eine tiefere Integration des Menschen erforderlich ist. Hierzu zählen Industrie 4.0-Fähigkeiten rund um die *Betrachtung des Menschen als Teil der Industrie 4.0-Systemlösung (17)* sowie zur *Kompetenzerfassung (27)* und *Kompetenzvermittlung (28)* im Kontext von Industrie 4.0. Hier wird vermehrt die Zusammenarbeit zwischen den Arbeitsgruppen und Plattformen benötigt, etwa der Arbeitsgruppe „Arbeit, Aus- und Weiterbildung“⁸¹ der Plattform Industrie 4.0 und der PLS.⁸²

Für die vollständige Simulation von Industrie 4.0-Intelligenzen, die eine Kombination verschiedenster Industrie 4.0-Fähigkeiten erfordern, reichen die aktuellen Modellierungs- und Simulationstheorien nicht aus. Für solche Simulationen sind die Kopplung von Modellierungs- und Simulationsansätzen unabdingbar. Adaptive Simulationsansätze werden genauso benötigt wie die Möglichkeit, hybride Modelle, das heißt Kombinationen aus Virtualität und Realität, in die Simulationen einzubetten. Hierzu werden im folgenden Abschnitt verschiedene Forschungs- und Entwicklungsbedarfe identifiziert und zusammengefasst.

Forschungsfrage 2:

Welche Fähigkeiten in der Modellbildung und Simulation (gekoppelt, hybrid oder übergreifend neutral) wurden bislang wissenschaftlich nicht, wenig oder nicht ausreichend erforscht und entwickelt?

Die Analyse der einschlägigen Fachliteratur zu Modellierungs- und Simulationsbedarfen sowie Partillösungen hat gezeigt, dass die Befähigung der Kopplung von Simulationen beispielsweise in Co-Simulationen vermehrt wissenschaftliche Aufmerksamkeit erhält,

allerdings eine tiefere Industrialisierung hin zu übergreifenden verknüpfbaren Modellklassen und Simulationen bislang fehlt. Co-Simulationen wurden beispielsweise mit dem FMI- und dem OPC-UA-Standard grundlegend erforscht und standardisiert, sind aber noch nicht durchgehend in der industriellen Praxis angelangt. Hier ist vor allem die Entwicklung einfach zu bedienender Lösungen gefragt.

Hybride Simulationen befinden sich in der grundlegenden Erforschung, beispielsweise in der Hybridisierung agentenbasierter und eventdiskreter Simulationen. Es mangelt jedoch auch hier noch an der semantischen Verknüpfung der Daten, um durchgehend kontextsensitive Simulationen durchführen zu können. Ohne semantische Verknüpfung sind Entwicklung und Industrialisierung nicht erreichbar.

Übergreifend neutrale Simulationen sind bislang weder in der industriellen Praxis noch im Forschungskontext vertreten. Der einzige bisherige Anwendungsfall sind Datenaustauschmodelle beispielsweise auf dem STEP-Standard für Geometriemodelle. Es mangelt an einer abstrakteren Abbildung des betrachteten Gesamtsystems, beispielsweise über entsprechende Systemmodelle. Auf Basis solcher Modelle und Simulationen können später viele Aspekte der allgemeinen Optimierungspotenziale abgedeckt werden, wie die Verknüpfung von Simulationen und Modelle.

Tabelle 3: Aktueller Stand der Fähigkeiten zur Modellbildung und Simulation

Fähigkeiten in der Modellbildung und Simulation	Aktueller Stand
gekoppelt	Forschung und Standardisierung mit FMI und OPC-UA bereits fortgeschritten. Industrialisierung bisher noch begrenzt.
hybrid	Mangel an semantischer Verknüpfung, um Kontextsensitivität als Basis herzustellen.
übergreifend neutral	Bisher nicht erforscht oder entwickelt. Einziger Einsatz bisher im Datenaustausch.

81 Vgl. BMWi 2021a.

82 Vgl. acatech 2021.

5.4. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Aus den erkannten Optimierungspotenzialen und dem aktuellen Stand vorhandener Modellierungs- und Simulationstheorien ergeben sich verschiedene Forschungs- und Entwicklungsbedarfe. Diese Bedarfe können den Themenfeldern Industrie 4.0 des Forschungsbeirats (siehe Abbildung 8) zugeordnet werden.

Forschungsbedarfe sind dort zu sehen, wo Grundlagen bisher nicht ausreichend erforscht sind oder Methoden noch nicht industrialisiert werden konnten. Entwicklungsbedarfe beziehen sich auf Themen, die bereits erforscht sind, aber noch nicht ausreichend in der Industrie umgesetzt werden konnten.

Der Forschungsbeirat empfiehlt, Entwicklungs- und Forschungsbedarfe nach folgenden möglichen Forschungsformaten zu unterscheiden:

- **Grundlagenforschung:** universitäre Forschung an Themen, die noch keine methodischen Grundlagen haben.
- **Verbundforschung:** Konsortien, die sich unterschiedlichen Herausforderungen der Forschungs- und Entwicklungsbedarfe widmen. Hier werden Themen bearbeitet, die schon gute

Grundlagen aufweisen, denen es aber an der Industrialisierung fehlt.

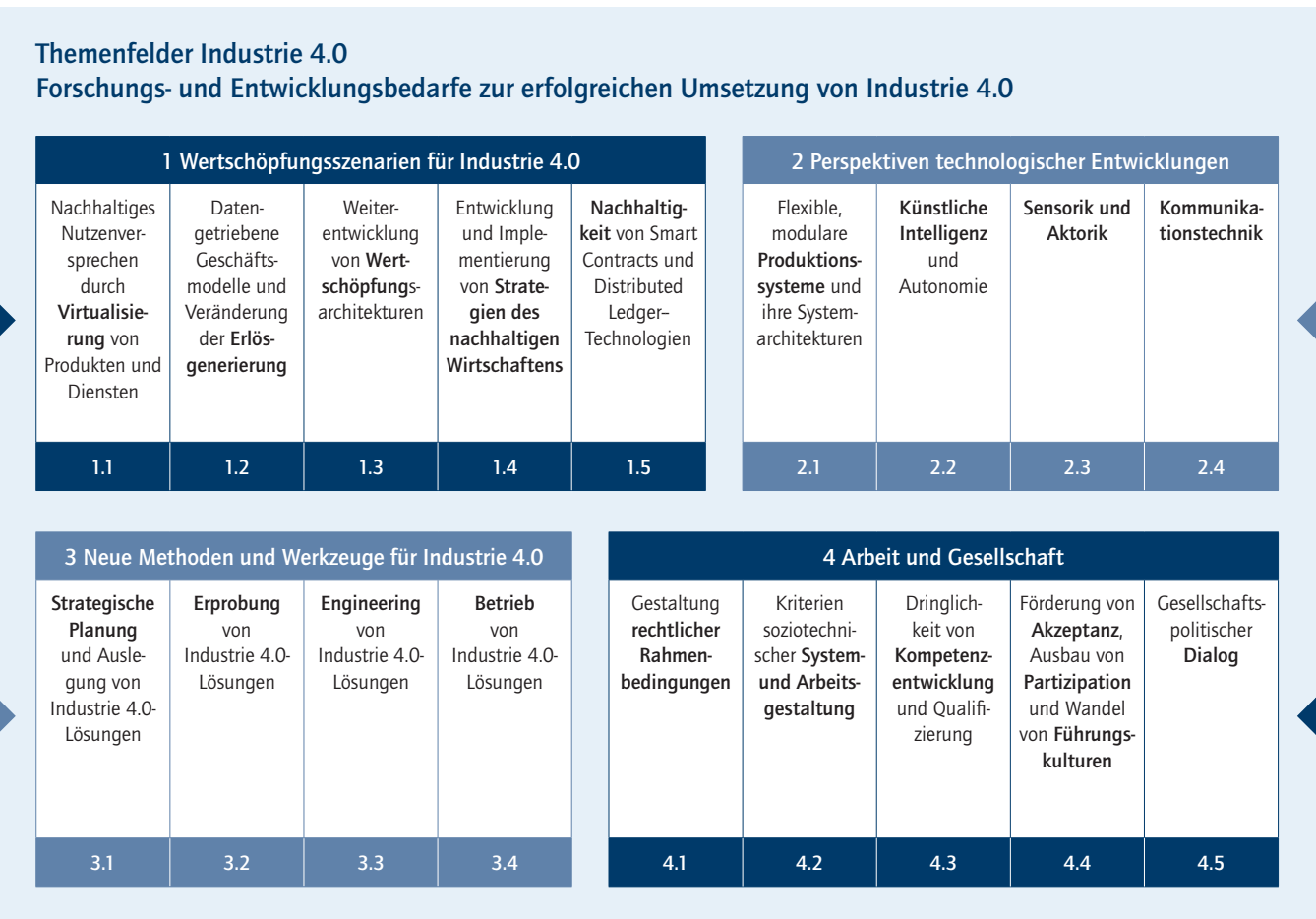
- **Verbundforschung in Forschungsclustern:** Hier werden mit Forschungsbeteiligung branchenübergreifende industrielle Forschungs- und Entwicklungsbedarfe adressiert.

Modellierung der Verbindung komplexer Systeme

Ausgeprägter Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der Modellierung der Verbindung komplexer Systeme, beispielsweise durch die Erstellung und Nutzung von Systemmodellen für Industrie 4.0-Lösungen. Dieser kann vorrangig den Themenfeldern 2 *Perspektiven technologischer Entwicklungen* und 3 *Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0* in Abbildung 8 zugeordnet werden. Die Verbindung der Industrie 4.0-Systemlösungen über Systemmodelle ermöglicht die einfachere Untersuchung und Entwicklung komplexer Systeme.

- **Forschungsbedarfe:**
 - Architekturmodelle sind nicht per Definition ausführbar, was bedeutet, dass sich die Interaktionen der Industrie 4.0-Lösung nicht simulieren lassen. Es gilt zu ermitteln,

Abbildung 8: Themenfelder des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0



Quelle: in Anlehnung an Forschungsbeirat/acatech 2019

wie statische Systemmodelle in dynamische Systemmodelle beziehungsweise komponentenspezifische Simulationen überführt und mit diesen gekoppelt werden können (Grundlagenforschung).

- Es ist außerdem zu erforschen, welche Formen von Systemmodellen Industrie 4.0-Intelligenzen effizient unterstützen können (Verbundforschung).
- Die möglichst einfache Erstellung dieser Systemmodelle (Usability) ist ebenfalls ein bisher nicht beherrschtes Thema, das weitere Forschung benötigt (Verbundforschung).

● **Entwicklungsbedarf:**

Ein Erfordernis der Verbindung komplexer Systeme ist die verstärkte Integration von Architekturmodellen in die Entwicklung und den Betrieb von Industrie 4.0-Lösungen. Diese Architekturmodelle helfen bei der Organisation der Systemelemente und der Koordination in der Entwicklung (Verbundforschung).

Semantik für Industrie 4.0-Lösungen

Die Semantik hinter den Industrie 4.0-Lösungen und den dazugehörigen Modellen wird bisher ebenfalls nicht ausreichend beherrscht. Das Standardisierungsnetzwerk der Plattform Industrie 4.0 setzt sich stark für die Schaffung von Semantiken ein, diese sind jedoch bisher noch nicht ausreichend in der Industrie vertreten. Dieser Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist im Themenfeld 2 *Perspektiven technologischer Entwicklungen* verortet. Hierzu liefert das vor kurzem veröffentlichte „Referenzmodell semantischer Interoperabilität“⁸³ erste Anstöße.

● **Forschungsbedarf:**

Es muss eine einheitliche Semantik zwischen Industrie 4.0-Lösungen und den zugehörigen Modellen erreicht werden. Dadurch lassen sich Lösungen effizient austauschen und in ihrer Funktion erweitern (Verbundforschung in Forschungsclustern).

● **Entwicklungsbedarf:**

Die Semantik muss für Industrie 4.0-Lösungen durchgehend umgesetzt werden. Dazu müssen Projekte wie „Verwaltungsschale vernetzen“⁸⁴ von Industrieteilnehmern stärker genutzt und zur verpflichtenden Maßnahmen für Industrie 4.0-Lösungen werden (Verbundforschung). Standardisierungstätigkeiten wie beim OPC-UA-Standard sind in allen Bereichen der

Modellierung und Simulation im Kontext von Industrie 4.0 erforderlich.

Interaktionsmöglichkeiten

Da der Mensch vermehrt in Interaktion mit Industrie 4.0-Lösungen tritt beziehungsweise partiell als Teil davon anzusehen ist, muss menschliches Verhalten in Modellen und Simulationen einfach abgebildet werden können. Dieser Bedarf betrifft sowohl das Themenfeld 3 *Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0* als auch Themenfeld 4 *Arbeit und Gesellschaft*.

● **Forschungsbedarf:**

Neben KI-Modellen sind auch kognitive Modelle, die menschliches Verhalten darstellen können, vermehrt erforderlich. Hier gilt es, effiziente Wege der Erstellung und Integration zu finden (Grundlagenforschung).

● **Entwicklungsbedarf:**

Bisherige Modelle und Tools müssen vermehrt Möglichkeiten schaffen, Menschen als Teil der Einflüsse auf das Problem einzupflegen (Verbundforschung).

Integration von Realdaten

Für die erfolgreiche Simulation von Industrie 4.0-Intelligenzen wird die Integration von Realdaten (Messdaten) in Simulationsmodelle benötigt. Die zugehörigen Bedarfe betreffen die Themenfelder 2 *Perspektiven technologischer Entwicklungen* und 3 *Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0*.

● **Forschungsbedarfe:**

- Anpassung bestehender Modellklassen zur Befähigung von Modellen, Realdaten zu integrieren (Grundlagenforschung)
- Ableitung optimierter Simulationsparameter auf Basis von Realdaten (Verbundforschung)
- Bestehende Modelle müssen auf Basis von durch Realdaten optimierter Simulationsmodelle automatisiert optimiert werden können (Verbundforschung).

● **Entwicklungsbedarf:**

Kombination von Real- mit Simulationsdaten zur Optimierung der Simulation und Verbesserung der Vorhersagequalität (Verbundforschung)

83 Vgl. BITKOM 2020.

84 Vgl. BMWi 2019b.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der Fokus dieser Expertise liegt auf den Grundlagen für die Befähigung zur Simulation von Industrie 4.0-Intelligenzen. Kombinationen von aktuell eingesetzte und angestrebte Industrie 4.0-Fähigkeiten werden für die Realisierung von Industrie 4.0-Intelligenzen benötigt.

Wir konnten zeigen, dass die existierenden Modellierungs- und Simulationstheorien für Industrie 4.0-Fähigkeiten der niedrigsten Komplexitätsstufe ausreichen. Für eine Vielzahl benötigter Industrie 4.0-Fähigkeiten höherer Grade, die für die Umsetzung von Industrie 4.0-Intelligenzen erforderlich sind, bedarf es jedoch weiterer Forschung und Kompetenzerweiterungen. Beispielsweise lässt sich die globale Optimierung eines Industrie 4.0-Systemlösungsverbands, bei der kontextsensitiv viele Modellen und Simulationen gekoppelt und analysiert werden müssen, mit den bestehenden Fähigkeiten noch nicht beherrschen.

Aus den Ergebnissen wurden die folgenden zentralen Forschungs- und Entwicklungsthemen abgeleitet:

1. Verbindung komplexer Systeme zur Analyse des Gesamtsystems einer Industrie 4.0-Lösung
2. Semantik zur Verknüpfung von Industrie 4.0-Lösungen mit den Modelldaten
3. Interaktion des Menschen mit den Industrie 4.0-Lösungen
4. Integration von Realdaten (Messdaten) in Simulationsmodelle

Um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu stärken, erfordern diese Themen Aufmerksamkeit sowohl in der Grundlagenforschung als auch in Verbundforschung und Verbundforschung in Forschungsclustern.

Des Weiteren bestehen im Feld der KI große Forschungsbedarfe, die nicht im Rahmen dieser Expertise adressiert werden konnten. Es wird empfohlen, eine gesonderte Expertise zum Einsatz von KI im Industrie 4.0-Umfeld umzusetzen.

Auch das Simulationsmanagement und adaptive Simulationsmethoden sollten verstärkte Beachtung bekommen. Sie stellen entscheidende Schritte auf dem Weg zur erfolgreichen Simulation von Industrie 4.0-Intelligenzen dar.

Anhang

Abbildungen

Abbildung 1: Methodisches Vorgehen zur Erarbeitung der Expertise.....	5
Abbildung 2: Auswertung der Interviews und Erstellung des Delta-Bilds.....	6
Abbildung 3: Spektrum der im Rahmen dieser Expertise betrachteten Industrie 4.0-Lösungen.....	7
Abbildung 4: Standardzelle in der Matrixproduktion.....	8
Abbildung 5: Industrie 4.0-Fähigkeiten in der Literatur.....	13
Abbildung 6: Übersicht über die genutzten, teilweise genutzten und nicht genutzten Modellklassen für Industrie 4.0-Intelligenzen.....	20
Abbildung 7: Übersicht der Grade der Industrie 4.0-Fähigkeiten.....	24
Abbildung 8: Themenfelder des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0.....	28

Tabellen

Tabelle 1: Auszug identifizierter Modellklassen und der zugehörigen Charakteristika.....	12
Tabelle 2: Übersicht der identifizierten Modellklassen der Literaturrecherche mit Relevanz für Industrie 4.0-Intelligenzen.....	15
Tabelle 3: Aktueller Stand der Fähigkeiten zur Modellbildung und Simulation.....	27

Anhang A: Modellklassen und Charakteristika

Modellklasse	Charakteristika	Modellklasse	Charakteristika
Geometriemodelle	<ul style="list-style-type: none"> statisch vorrangig Einzelmodelle mathematische und physikalische Modellierung deterministisch vorrangig deduktiv, aber auch induktiv (beispielsweise Scans) 	Umweltmodelle	<ul style="list-style-type: none"> dynamisch Einzelmodelle oder verknüpft mit Datenmodellen physikalische Modellierung wahrscheinlichkeitsbasiert deduktiv und induktiv
Kinematikmodelle	<ul style="list-style-type: none"> dynamisch Kopplung mit Verhaltensmodellen physikalische Modellierung deterministisch deduktiv 	Steuerungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> dynamisch Einzelmodell oder vernetzt mit physischem Gegenstück logische Modellierung deterministisch induktiv
Verformungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> statisch oder dynamisch vorrangig Einzelmodelle mathematische und physikalische Modellierung deterministisch deduktiv 	Traceability-Modelle	<ul style="list-style-type: none"> statisch Kopplung verschiedener Modelle logische Modellierung deterministisch deduktiv
Datenaustauschmodelle	<ul style="list-style-type: none"> statisch oder dynamisch Einzelmodelle mathematische oder logische Modellierung deterministisch deduktiv 	Test-Case-Modelle	<ul style="list-style-type: none"> statisch Einzelmodelle logische Modellierung deterministisch deduktiv
Kognitive Modelle	<ul style="list-style-type: none"> dynamisch Kopplung verschiedener Modelle psychologische Modellierung wahrscheinlichkeitsbasiert deduktiv oder induktiv 	Security-Modelle	<ul style="list-style-type: none"> statisch Einzelmodelle logische Modellierung deterministisch induktiv
Zustandsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> dynamisch einzel oder vernetzt logische Modellierung deterministisch deduktiv oder induktiv 	Anforderungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> statisch Einzelmodelle oder verknüpft mit anderen Modellen logische Modellierung deterministisch induktiv

Modellklasse	Charakteristika
Parametermodelle	<ul style="list-style-type: none"> • statisch • verbunden mit anderen Modellen • logische Modellierung • deterministisch • deduktiv
Systemmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • dynamisch • Verbund aus Modellen • logische Modellierung • deterministisch • induktiv
Verhaltensmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • dynamisch • Einzelmodelle oder vernetzt • logische und physikalische Modellierung • deterministisch • deduktiv
Semantikmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • statisch • Einzelmodelle • logische Modellierung • deterministisch • deduktiv

Modellklasse	Charakteristika
Prozessmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • statisch • Einzelmodelle oder im Verbund mit anderen Modellen • logische Modellierung • deterministisch • induktiv
Informationsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • statisch • Einzelmodell oder vernetzt mit physischem Gegenstück • logische Modellierung • deterministisch • induktiv
Datengetriebene Geschäftsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • dynamisch • vernetzt mit Geräten und Modellen für Daten • betriebswirtschaftliche Modellierung • deterministisch • induktiv
Kompetenzmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • statisch • Einzelmodelle oder vernetzt mit Menschen • psychologische oder logische Modellierung • deterministisch • induktiv

Anhang B: Interviewleitfaden

Leitfaden für ein etwa einstündiges Gespräch zur Erhebung der Bedarfe und Umfänge neuer Modellierungs- und Simulationstheorien auf Basis bestehender Simulationsfähigkeiten und -umfänge.

Hypothesen:

Für angestrebte I4.0-Intelligenzen sind neue Modellierungs- und Simulationstheorien notwendig.

Bereich 1: Strategische Planung und Auslegung von I4.0-Lösungen

Für die Planung und Ausrichtung von I4.0-Ansätzen fehlen anwendbare Methoden und Modelle, insbesondere in den Bereichen systemisches Beherrschen und Beschreiben von Auslegungsmechanismen, Verstehen und Beherrschen von Kerntechnologien, Festlegung der Wertschöpfungspotenziale, Management verfolgter Ziele und Ausrichtung der Strategie.

Bereich 2: Erprobung von I4.0-Lösungen

Für die Erprobung von I4.0-Lösungen fehlt es an geeigneten Vorgehensweisen, Methoden und Modellen, insbesondere in den Bereichen Aufbau von Testumgebungen, Aufbau und Durchführung von Experimenten sowie Entwurf generischer Lösungen. (Es ist an dieser Stelle nachzuweisen, dass bestehende Lösungen nicht angewendet werden können.)

Bereich 3: Engineering von I4.0-Lösungen

Im Engineering fehlt es an adaptierten oder neuen Lösungen, insbesondere in den Bereichen Planen, Validieren, Simulieren, Absichern, Verifizieren, Freigeben und ViB. Auch die Gestaltung der Systementwürfe und Lösungsarchitekturen sowie die darauf aufbauende Nachverfolgbarkeit der Abhängigkeiten im System

können mit aktuellen Modellierungs- und Simulationstheorien nicht vollständig abgedeckt werden.

Bereich 4: Betrieb von I4.0-Lösungen

Der Betrieb von I4.0-Lösungen wird nicht ausreichend durch Methoden und Modelle unterstützt. Insbesondere die Überwachung und Vorhersage sowie die Pflege in Form von Bewertungen, Ad-hoc-Umplanungen, Wartungen, Reparaturen, Anhalten und Außerbetriebnahmen werden schlecht unterstützt.

Bereich 5: Kompetenzmanagement für I4.0-Lösungen

Das Kompetenzmanagement für I4.0-Lösungen ist nicht ausreichend methodisch hinterlegt. Insbesondere die Kompetenzvermittlung sowie die Erhebung bestehender Kompetenzen werden in einem nicht ausreichenden Maß unterstützt.

(1) Demographische Einordnung

1. In welcher Branche ist Ihr Unternehmen hauptsächlich tätig?
2. Wie viele Personen arbeiten in Ihrem Unternehmen?
3. Welche Rolle nehmen Sie im Unternehmen ein?
4. Seit wann sind Sie in dieser Rolle aktiv?
5. Seit wann beschäftigen Sie sich mit dem Thema der Modellbildung und Simulation?

(2) Fachliche Einordnung

1. Welche Systeme bilden Sie in Modellen und Simulationen ab?
2. Welche dieser Systeme sind (potenzielle) I4.0-Lösungen?
3. Welche Simulationsarten setzen Sie ein?

(3) Planung und Auslegung von I4.0-Lösungen

1. Welche Fähigkeiten werden aus Ihrer Sicht zur Planung und Auslegung von I4.0-Lösungen benötigt?

2. Welche Simulationsansätze nutzen Sie aktuell zur Unterstützung dieser Fähigkeiten?
3. Welche Modellierungsansätze nutzen Sie dafür?
4. Was fehlt Ihnen an bisherigen Modellierungs- und Simulationsansätzen, um die benötigten Fähigkeiten noch effizienter zu unterstützen?
5. Für welche der von Ihnen adressierten Fähigkeiten gibt es bislang noch keine Ihnen bekannten Modellierungs- und Simulationsfähigkeiten?

(4) Engineering von I4.0-Lösungen

1. Welche Fähigkeiten werden für das Engineering von I4.0-Lösungen benötigt?
2. Wie nutzen Sie aktuell Simulationen zur Unterstützung dieser Fähigkeiten im Engineering?
3. Wie nutzen Sie heute im Engineering Modellierung?
4. Wo bestehen für diese Simulationen und Modellierungen Optimierungspotenziale?
5. Wo fehlen Ihnen Ansätze, um effizienter im Engineering vorzugehen?

(5) Erprobung von I4.0-Lösungen

1. Welche Fähigkeiten benötigen Sie zur Erprobung entwickelter I4.0-Lösungen?
2. Wie werden diese Fähigkeiten heute durch Simulationen unterstützt?
3. Wie modellieren Sie heute die Erprobung?
4. Wo sehen Sie Optimierungspotenziale?

5. Wo benötigen Sie neue Ansätze zur Unterstützung benötigter Fähigkeiten in der Erprobung?

(6) Betrieb von I4.0-Lösungen

1. Welche Fähigkeiten werden im Betrieb von I4.0-Lösungen benötigt?
2. Wie unterstützen Sie durch Simulationen den Betrieb von I4.0-Lösungen?
3. In welcher Form und in welchem Umfang erfolgen Modellierungen des Betriebs von I4.0-Lösungen?
4. Wo sehen Sie Optimierungspotenziale in der Modellierung und Simulation für Fähigkeiten mit Bezug zum Betrieb von I4.0-Lösungen?
5. Wo fehlen Ihnen Ansätze zur Unterstützung der Fähigkeiten?

(7) Kompetenzen für I4.0-Lösungen

1. Wie vermitteln Sie Kompetenzen in Bezug auf I4.0-Lösungen?
2. Wie ermitteln Sie die vorhandenen Kompetenzen?
3. Wo können Sie sich den Einsatz von Simulation und Modellierung vorstellen, um die Kompetenzvermittlung und -erfassung zu unterstützen?

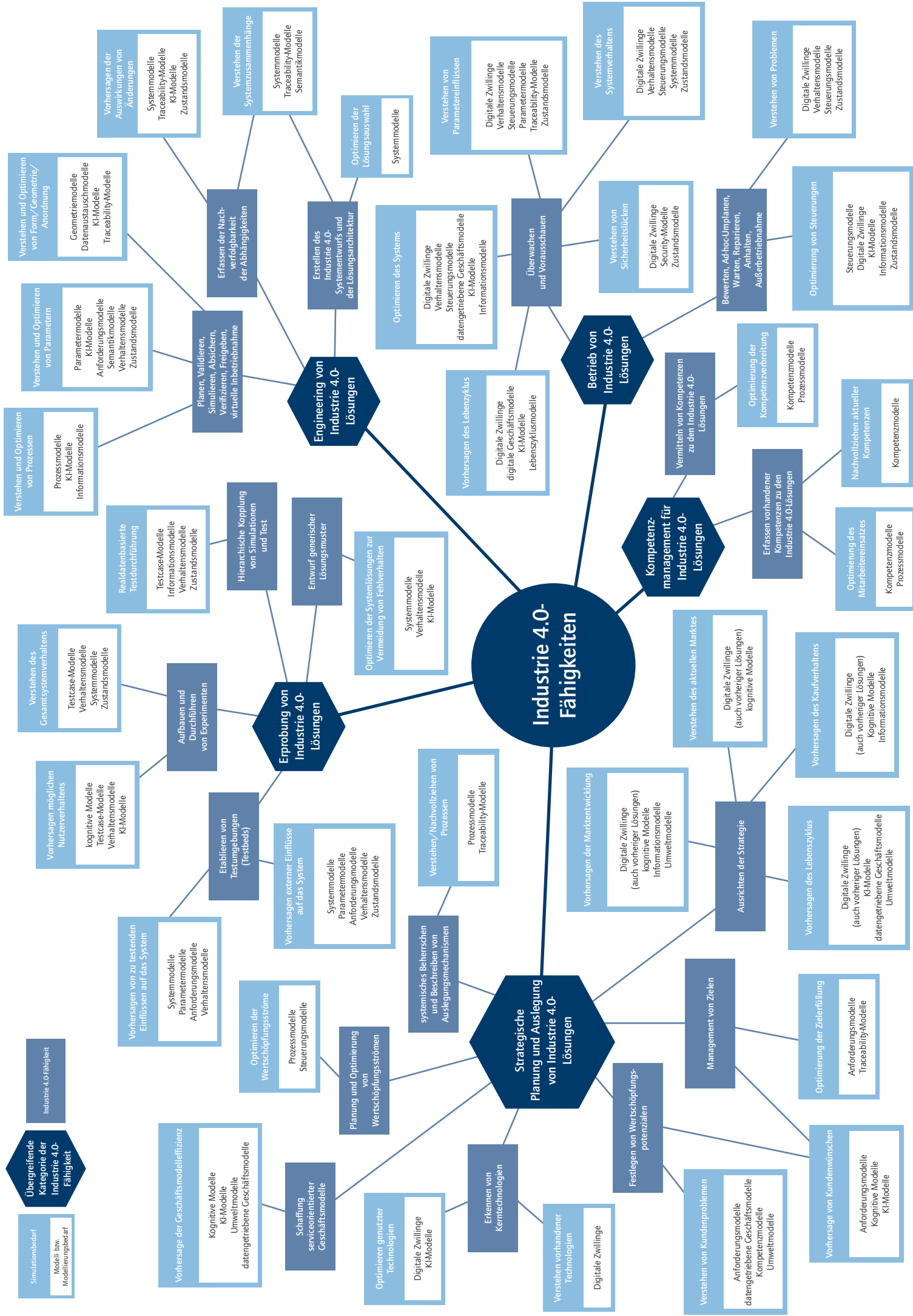
(8) Weitere Fähigkeiten für I4.0-Lösungen

1. Sehen Sie außerhalb der angesprochenen Bereiche Fähigkeiten, die für I4.0-Lösungen benötigt werden?
2. Welche Modellierungs- und Simulationsfähigkeiten sind darüber hinaus erforderlich?

Anhang C: Clusterung der Industrie 4.0-Fähigkeiten laut Literaturanalyse



Anhang D: Gesamtheit der Industrie 4.0-Fähigkeiten mit aktuellem Stand der Nutzung und Untersuchung



Literatur

Abramovici 2018

Abramovici, M. (Hrsg.): *Engineering smarter Produkte und Services. (acatech STUDIE)*, 2018. URL: www.acatech.de/publikation/engineering-smarter-produkte-und-services/ [Stand: 27.10.2021].

acatech 2016

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Kompetenzentwicklungsstudie Industrie 4.0 – Erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen*, 2016. URL: www.acatech.de/publikation/kompetenzentwicklungsstudie-industrie-4-0-erste-ergebnisse-und-schlussfolgerungen/ [Stand: 27.10.2021].

acatech 2021a

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Plattform Lernende Systeme – Die Plattform für Künstliche Intelligenz*, 2021. URL: www.plattform-lernende-systeme.de [Stand: 24.06.2021].

acatech 2021b

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Plattform Lernende Systeme – KI bildet die Speerspitze der nächsten Stufe von Industrie 4.0*, 2021. URL: www.plattform-lernende-systeme.de/reden-und-beitraege-newsreader/industrielle-ki-bildet-die-speerspitze-der-naechsten-stufe-von-industrie-4-0.html [Stand: 24.06.2021].

Arbeitskreis Deutscher Qualifikationsrahmen 2011

Arbeitskreis Deutscher Qualifikationsrahmen (Hrsg.): *Deutscher Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen*, 2011.

Auricht et al. 2013

Auricht, M./Lindow, K./Stark, R.: „Erlebbarer Entwicklung und Absicherung technischer Systeme“. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*, 2013, S. 10.

BITKOM 2020

BITKOM – Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (Hrsg.): *Vorschlag zur systematischen Klassifikation von Interaktionen in Industrie 4.0 Systemen*, 2020. URL: www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Whitepaper-Vorschlag-zur-systematischen-Klassifikation-von-Interaktionen-in-Industrie-4-0-Systemen [Stand: 27.10.2021].

Bonci et al. 2016

Bonci, A./Pirani, M./Longhi, S.: „A database-centric approach for the modeling, simulation and control of cyber-physical systems in the factory of the future“. In: *IFAC-PapersOnLine*, 49: 12, 2016, S. 249–254.

Bracht et al. 2018

Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S. (Hrsg.): *Digitale Fabrik*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2018.

Brecher et al. 2017

Brecher, C./Özdemir, D./Brockmann, M.: „Introduction to integrative production technology“. In: *Production Engineering*, 11: 2, 2017, S. 93–95.

BMWi 2019a

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Leitbild 2030 für Industrie 4.0 – Digitale Ökosysteme global gestalten*, 2019. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Standardartikel/leitbild.html [Stand: 27.10.2021].

BMWi 2019b

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Plattform Industrie 4.0: Sagt die eine Maschine zur anderen... Plattform Industrie 4.0 startet Verbundprojekt „Verwaltungsschale vernetzt*, 2019. URL: www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Kurzmeldungen/2019/2019-05-29-VWS-ernetzt.html [Stand: 24.06.2021].

BMWi 2019c

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Technologieszenario Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0*, 2019. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KI-industrie-40.html [Stand: 27.10.2021].

BMWi 2020a

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Charta für Lernen und Arbeiten in der Industrie 4.0 der Plattform Industrie 4.0*, 2020. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/charta_fuer_lernen_und_arbeit.html [Stand: 27.10.2021].

BMWi 2020b

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *KI in der Industrie 4.0: Orientierung, Anwendungsbeispiele, Handlungsempfehlungen*, 2020. URL: www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-orientierung-anwendungsbispiele-handlungsempfehlungen.html [Stand: 27.10.2021].

BMWi 2021a

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Plattform Industrie 4.0: Arbeitsgruppe „Arbeit, Aus- und Weiterbildung“*, 2021. URL: www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Plattform/Struktur-Organisation/Arbeitsgruppen/AG05/arbeit-aus-und-weiterbildung.html [Stand: 24.06.2021].

BMWi 2021b

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *IP-Recht und Datenhoheit – wie das Recht Schritt hält*, 2021. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/IP-Recht.html [Stand: 27.10.2021].

BMWi 2021c

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Künstliche Intelligenz und Akzeptanz – Ein Wegweiser*, 2021. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/K%C3%BCnstliche-Intelligenz-und-Akzeptanz.html [Stand: 27.10.2021].

BMWi 2021d

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Plattform Industrie 4.0: Glossar* URL: www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/Glossar/glossar.html [Stand: 27.05.2021].

Burger et al. 2017

Burger, N./Demartini, M./Tonelli, F./Bodendorf, F./Testa, C. „Investigating Flexibility as a Performance Dimension of a Manufacturing Value Modeling Methodology (MVMM): A Framework for Identifying Flexibility Types in Manufacturing Systems“, In: *Procedia CIRP*, 63, 2017, S. 33–38.

Demkovich et al. 2018

Demkovich, N./Yablochnikov, E./Abaev, G. „Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems“, In: *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, S. 291–296.

DIN SPEC 91345:2016-04

DIN SPEC 91345:2016-04: *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. 2016. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/din-spec-rami40.html [Stand: 27.10.2021].

Duden 2021

Duden (Hrsg.): *[Definition] Intelligenz*. URL: www.duden.de/recht-schreibung/Intelligenz [Stand: 14.06.2021].

Dumitrescu et al. 2021

Dumitrescu, R./Albers, A./Riedel, O./Stark, R. (Hrsg.): *Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft, Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering*, Paderborn, 2021.

Elfaham et al. 2017

Elfaham, H./Wagner, C./Anapolska, M./Epple, U. „Modeling and investigating load distribution and resource (re-)allocation for next generation automation solutions“. In: *11th Asian Control Conference (ASCC)*, Piscataway, NJ: IEEE 2017, S. 2328–2333.

Forschungsbeirat/acatech 2019

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Themenfelder Industrie 4.0*, 2019. URL: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Newsletter/2020/Ausgabe23/2020-05-publikation-themenfelder-i40.html [Stand: 27.10.2021].

Funke/Vaterrodt 2009

Funke, J./Vaterrodt, B.: *Was ist Intelligenz?*, München: Beck, 2009.

Galaske et al. 2015

Galaske, N./Strang, D./Anderl, R.: „Process deviations in cyber-physical production systems“. In: Ao, S. I./Douglas, C./Grundfest, W. S./Burgstine, J. (Hrsg.): *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2015*, San Francisco, USA: Newswood Limited 2015, S. 1035–1040.

Hensel et al. 2016

Hensel, S./Graube, M./Urbas, L./Heinzerling, T./Oppelt, M.: „Co-simulation with OPC UA“. In: *14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE 2016, S. 20–25.

Herr et al. 2018

Herr, D./Reinhardt, J./Reina, G./Krüger, R./Ferrari, R. V./Ertl, T.: „Immersive Modular Factory Layout Planning using Augmented Reality“. In: *Procedia CIRP*, 72, 2018, S. 1112–1117.

Hick et al. 2019

Hick, H./Bajzek, M./Faustmann, C.: „Definition of a system model for model-based development“. In: *SN Applied Sciences*, 1: 9, 2019.

Jones et al. 2020

Jones, D./Snider, C./Nassehi, A./Yon, J./Hicks, B.: „Characterising the Digital Twin: A systematic literature review“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 2020, S. 36–52.

Kiesel et al. 2017

Kiesel, M./Klimant, P./Beisheim, N./Rudolph, S./Putz, M.: „Using Graph-based Design Languages to Enhance the Creation of Virtual Commissioning Models“. In: *Procedia CIRP*, 60, 2017, S. 279–283.

Klocke et al. 2017

Klocke, F./Döbbeler, B./Goetz, S./Chandra, D.: „Data Synchronization for Model-Based Process Monitoring“. In: *Procedia Manufacturing*, 14, 2017, S. 136–142.

KUKA AG 2016

KUKA AG: *Matrix-Produktion: ein Beispiel für Industrie 4.0*, 2016. URL: www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2016/10/solution-systems-matrix-produktion [Stand: 21.05.2021].

Kutscher et al. 2020

Kutscher, V./Anokhin, O./Anderl, R.: „Enhancing digital twin performance through simulation of computerized numerical control firmware“. In: *Procedia Manufacturing*, 49, 2020, S. 69–74.

Lee/Seppelt 2009

Lee, J. D./Seppelt, B. D.: „Human factors in Automation Design“. In: Nof, S. Y. (Hrsg.): *Springer handbook of automation. With 149 tables*, Berlin: Springer 2009, S. 417–436.

Lüdtke 2015

Lüdtke, A.: „Wege aus der Ironie in Richtung ernsthafter Automatisierung“. In: Botthof, A./Hartmann, E. A. (Hrsg.): *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, Berlin/Heidelberg: Springer 2015, S. 125–146.

Merriam 2021

Merriam (Hrsg.): *[Definition] Intelligence*. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/intelligence> [Stand: 14.06.2021].

Meudt et al. 2017

Meudt, T./Kaiser, J./Metternich, J./Spieckermann, S.: „Value stream mapping and value stream simulation in times of digitization and industry 4.0 – An app for manufacturing optimization“. In: *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112: 12, 2017, S. 865–868.

Modelica Association 2021

Modelica Association (Hrsg.): *Functional Mock-up Interface*. URL: <https://fmi-standard.org/> [Stand: 22.06.2021].

Oberc et al. 2019

Oberc, H./Prinz, C./Glogowski, P./Lemmerz, K./Kuhlenkötter, B.: „Human Robot Interaction – Learning how to integrate collaborative robots into manual assembly lines“. In: *Procedia Manufacturing*, 31, 2019, S. 26–31.

OMG 2019

OMG – Object Management Group (Hrsg.): *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™)*, 2019.

Oertwig/Gering 2016

Oertwig, N./Gering, P.: „The Industry Cockpit Approach: A Framework for Flexible Real-Time Production Monitoring“. In: *Enterprise Interoperability VII*, Springer International Publishing 2016, S. 175–184.

OPC Foundation 2021

OPC Foundation (Hrsg.): *Unified Architecture*. URL: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> [Stand: 22.06.2021].

PEGASUS 2021

PEGASUS Project Office (Hrsg.): *PEGASUS Method: Overview*. URL: www.pegasusprojekt.de/files/tmp/Pegasus-Abschlussveranstaltung/PEGASUS-Gesamtmethode.pdf [Stand: 23.06.2021].

prostep 2021

prostep ivip Association (Hrsg.): *Simulation-Based Decision Making and Release*, 2021.

Rosen et. al 2015

Rosen, R./Wichert, G. von/Lo, G./Bettenhausen, K. D.: „About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing“. In: *IFAC-PapersOnLine*, 28: 3, 2015, S. 567–572.

Rzevski 2003

Rzevski, G.: „On conceptual design of intelligent mechatronic systems“. In: *Mechatronics*, 13: 10, 2003, S. 1029–1044.

Samarajiwa et al. 2020

Samarajiwa, M./Lindow, K./Salamon, D./Stark, R. (Hrsg.): *Digital Twin Readiness Assessment. Eine Studie zum digitalen Zwilling in der fertigen Industrie*, Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2020.

Schluse et al. 2018

Schluse, M./Priggemeyer, M./Atorf, L./Rossmann, J.: „Experimentable Digital Twins –Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0“. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14: 4, 2018, S. 1722–1731.

Siegert et al. 2020

Siegert, J./Schlegel, T./Zarco, L./Bauernhansl, T.: „Order-Oriented Learning Factories: Why and How Learning Factories Have to Adapt“. In: *Procedia Manufacturing*, 45, 2020, S. 460–465.

Smirnov et al. 2018

Smirnov, D./Schenk, T./Wehrstedt, J. C.: „Hierarchical Simulation of Production Systems“. In: *14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Piscataway, NJ: IEEE 2018, S. 875–880.

Stark/Damerou 2019

Stark, R./Damerou, T.: „Digital Twin“. In: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Berlin/Heidelberg: Springer, 2019, S. 1–8.

Stark et al. 2018

Stark, R./Grosser, H./Mueller, P. (Hrsg.): *Virtuelle Inbetriebnahme für Industrie zukunftssicher beherrschen – Modulare Gestaltung und immersive, digitale Absicherung von mechatronischen Produktionsanlagen*, Fraunhofer IPK, 2018.

Strang et al. 2016

Strang, D./Galaske, N./Anderl, R.: „Dynamic, adaptive worker allocation for the integration of human factors in cyber-physical production systems“. In: *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future*, 2016, S. 517–529.

Tantik/Anderl 2016

Tantik, E./Anderl, R.: „Industrie 4.0: Using Cyber-physical Systems for Value-stream Based Production Evaluation“. In: *CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016)*, 2016, S. 207–212.

Tantik/Anderl 2017

Tantik, E./Anderl, R.: „Potentials of the Asset Administration Shell of Industrie 4.0 for Service-Oriented Business Models“. In: *CIRP Design*, 2017, S. 363–368.

Thiede et al. 2019

Thiede, S./Filz, M.-A./Thiede, B./Martin, N. L./Zietsch, J./Herrmann, C.: „Integrative simulation of information flows in manufacturing systems“. In: *CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2019, S. 647–652.

Tomiyama et al. 2019

Tomiyama, T./Lutters, E./Stark, R./Abramovici, M.: „Development capabilities for smart products“. In: *CIRP Annals*, 68: 2, 2019, S. 727–750.

Uhlmann et al. 2015

Uhlmann, E./Schallock, B./Otto, F.: „Werkstattfertigung – Steuerung von Serienprodukten für die Werkstattfertigung mit Industrie 4.0-Lösungen (Intelligent job shop manufacturing – Control mechanisms for job shop manufacturing of series products using the German „Industrie 4.0“ approach)“. In: *wt-online* 4-2015, S. 184–189.

VDI 2020

Verein Deutscher Ingenieure e.V.: *Das neue V-Modell der VDI/VDE 2206*, 2020. URL: www.vdi.de/richtlinien/programme-zu-vdi-richtlinien/vdi-2206 [Stand: 16.11.2021].

Vick et al. 2016

Vick, A./Guhl, J./Kruger, J.: „Model predictive control as a service – Concept and architecture for use in cloud-based robot control“. In: *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2016, S. 607–612.

An den Interviews beteiligte Expertinnen und Experten

Vertreterinnen und Vertreter mit wissenschaftlicher Expertise

Bernd Brinkmeier, Siemens AG
Pierre Grzona, Technische Universität Chemnitz
Florian Krebs, DLR
Michael Schluse, RWTH Aachen
Harald Völkl, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Sandro Wartzack, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Vertreterinnen und Vertreter der Industrie

Dirk Hartmann, Siemens AG
Johann Heinrich, ISKO Engineers
Prof. Sabine Jeschke, Deutsche Bahn
Michael Krause, ISKO Engineers
Sascha Leidig, T-Systems
Steffen Maier, T-Systems
Frank Oppenheimer, OFFIS e.V.
Christian Schäfer, Merck KGaA
Sven Spiekermann, SimPlan AG
Achim Weinbach, Siemens AG
Heiko Witte, Rolls Royce Deutschland

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 Hoppel, TU Dortmund / Fraunhofer IML
Prof. Wolfgang Wahlster, DFKI – Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

Vertreterinnen und Vertreter der Industrie

Klaus Bauer, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG
Wilfried Bauer, T-Systems International GmbH
Stefan-Maria Creutz, BIZERBA 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

