

FORSCHUNGSBEIRAT



*Impulsbericht des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0*

# Industrie 4.0 – Forschung für die Gestaltung der Zukunft

## Impressum

### Herausgeber

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

### Projektbüro

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München

### Expertengruppe

Prof. Reiner Anderl (TU Darmstadt)  
Klaus Bauer (TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG)  
Prof. Thomas Bauernhansl (Universität Stuttgart/Fraunhofer IPA)  
Dr. Jan-Henning Fabian (ABB AG)  
Dr.-Ing. Matthias Gebauer (PTKA)  
Dietmar Goericke (VDMA)  
Johannes Kalhoff (Phoenix Contact)  
Dr. Uwe Kubach (SAP SE)  
Prof. Peter Liggesmeyer (TU Kaiserslautern/Fraunhofer IESE)  
Prof. Peter Post (Festo AG & Co. KG)  
Dr. Harald Schöning (Software AG)  
Dr. Georg von Wichert (Siemens AG)

### Koordination

Dr. Anna Frey, acatech  
Dr. Joachim Sedlmeir, acatech  
Dr. Steffen Steglich, 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

Getty Images/iStockphoto

### Stand

November 2021



Plattform Industrie 4.0



acatech – Deutsche Akademie  
der Technikwissenschaften

---

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

---

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

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

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

Hier setzen die **Impulsberichte des Forschungsbeirats** an. Sie dienen als pointierte, kurzfristige Stellungnahmen des Forschungsbeirats zu aktuellen Industrie 4.0-Fachfragen und zeigen entsprechende Handlungsoptionen für Politik, Wissenschaft und Wirtschaft auf.

Die Impulse gehen von den Mitgliedern des Forschungsbeirats aus. acatech bereitet diese wissenschaftlich fundiert und zielgruppengerecht auf. Alle bisher erschienenen Publikationen des Forschungsbeirats stehen unter [www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/](http://www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/) zur Verfügung.

# Inhalt

1.	<b>Executive Summary</b> .....	3
2.	<b>Motivation, Zielsetzung, Vorgehen</b> .....	4
3.	<b>Fünf Thesen zur Industrie 4.0-Forschung für die Gestaltung der Zukunft</b> .....	6
a)	Eine Spiegelung der Industrie 4.0-Forschungsprojekte an den Themenfeldern zeigt, dass einerseits eine hohe Forschungsdynamik festgestellt werden kann, andererseits enorme Potenziale für zukünftige Forschungsaktivitäten bestehen.....	6
b)	Forschungsaktivitäten werden durch Förderprogramme geprägt. Daneben initiieren und begleiten Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft vorwettbewerbliche Forschung. ....	6
c)	Industrie 4.0 hat zu einer hohen Aufmerksamkeit in Wissenschaft und Wirtschaft geführt und Impulse für erfolgreiche Forschung gesetzt, wobei im Kontext der Wirtschaft kleine und mittlere Unternehmen in der Industrie 4.0-Forschung sehr sichtbar sind.....	8
d)	Hebelwirkungen für Innovationspotenziale setzen große Anreize für Wirtschaftsunternehmen, sich an der Verbundforschung zu beteiligen. ....	9
e)	Die Nutzung von Industrie 4.0 bietet zunehmend einen unternehmensstrategischen Wettbewerbsvorteil mit wirtschafts- und gesellschaftspolitischen Potenzialen.....	10
4.	<b>Ausblick</b> .....	11
	<b>Literatur</b> .....	13
	<b>Mitglieder des Forschungsbeirats</b> .....	15

# 1. Executive Summary

Der Begriff „Industrie 4.0“ steht für Digitalisierung und intelligente Vernetzung in der industriellen Wertschöpfung. Darauf aufbauend lassen sich innovative, individualisierte Produkte und nachgelagerte Dienstleistungen realisieren, indem datengetriebene und plattformbasierte Geschäftsmodelle mit neuen Formen der Erlösgenerierung implementiert werden. Dies erfordert jedoch einen umfassenden Wandel in den Wertschöpfungsarchitekturen der Unternehmen sowie neue Ansätze der Produkt- und Serviceentwicklung. Zudem sind damit weitreichende Änderungsprozesse in Arbeit und Gesellschaft verbunden.

Die flächendeckende Implementierung von Industrie 4.0 konnte noch nicht hinreichend umgesetzt werden. Somit bestehen weiterhin enorme Potenziale, die es zukünftig zu heben gilt. Die Forschungsaktivitäten in diesen Bereichen sind daher von strategischer Bedeutung. Nur so lassen sich im internationalen Wettbewerb die Vorreiterrolle der deutschen Industrie auf dem vernetzten Weltmarkt halten oder gar ausbauen. Technologische Exzellenz und gesellschaftspolitische Ziele können damit erreicht und gestärkt werden.

Die Breite der Forschungslandschaft und die Vielzahl an Initiativen erschweren jedoch den Überblick über den Stand der Industrie 4.0-Forschung und der damit verbundenen Chancen. Der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 analysierte deshalb geförderte Industrie 4.0-Forschungsaktivitäten tiefgehend, um daraus Thesen zum Status quo und zukünftigen Entwicklungen abzuleiten. Mit dem vorliegende Bericht möchte der Beirat eine Grundlage bereitstellen, damit Stakeholder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik Forschungsaktivitäten zu Industrie 4.0 zielführend weiterentwickeln können.

Analysiert wurde eine umfassende Datenbasis geförderter Forschungsprojekte mit Bezug zu Industrie 4.0. Dabei lag der Fokus

auf Aktivitäten der Fördergeber Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und Industrielle Gemeinschaftsforschung für Unternehmen (IGF), die einen großen Teil der Förderung im Bereich Industrie 4.0 betreiben. Die Auswertung führte eine Expertengruppe aus Mitgliedern des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 durch.<sup>1</sup> Darauf aufbauend formulierte der Forschungsbeirat fünf zentrale Thesen, die die Kernbotschaften dieses Impulsberichts dar stellen:

- a) Eine Spiegelung der Industrie 4.0-Forschungsprojekte an den Themenfeldern zeigt, dass einerseits eine hohe Forschungsdynamik festgestellt werden kann, andererseits enorme Potenziale für zukünftige Forschungsaktivitäten bestehen.
- b) Forschungsaktivitäten werden durch Förderprogramme geprägt. Daneben initiieren und begleiten Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft vorwettbewerbliche Forschung.
- c) Industrie 4.0 hat zu einer hohen Aufmerksamkeit in Wissenschaft und Wirtschaft geführt und Impulse für erfolgreiche Forschung gesetzt, wobei im Kontext der Wirtschaft kleine und mittlere Unternehmen in der Industrie 4.0-Forschung sehr sichtbar sind.
- d) Hebelwirkungen für Innovationspotenziale setzen große Anreize für Wirtschaftsunternehmen, sich an der Verbundforschung zu beteiligen.
- e) Die Nutzung von Industrie 4.0 bietet zunehmend einen unternehmensstrategischen Wettbewerbsvorteil mit wirtschafts- und gesellschaftspolitischen Potenzialen.

1 Siehe Impressum.

## 2. Motivation, Zielsetzung, Vorgehen

Auf der Grundlage von „Industrie 4.0“ wird die industrielle Wertschöpfung in das digitale Zeitalter überführt. Digitalisierung und intelligente Vernetzung eröffnen neue Möglichkeiten zur Herstellung von Produkten und Erbringung von Dienstleistungen. Sämtliche Bereiche der Wertschöpfung von der Entwicklung über Fertigung, Auslieferung, Wartung und Kundenservice bis hin zur Entsorgung sind davon betroffen. Der digitale Wandel vollzieht sich dementsprechend nicht allein durch das Implementieren innovativer Technologien, die hierfür benötigt werden. Es bedarf außerdem neuer Denkansätze und Herangehensweisen, um diese Technologien zu entwickeln und in die Praxis umzusetzen. Es entstehen neue Perspektiven für Geschäftsmodelle mit individuellen Formen des Nutzenversprechens, innovativen Möglichkeiten der Erlösgenerierung und Ansätzen zur Schaffung dynamischer Wertschöpfungsnetzwerke innerhalb digitaler Ökosysteme. All dies geht mit weitreichenden sozialen und gesellschaftlichen Herausforderungen einher, wie der Notwendigkeit, neue Kompetenzen und Qualifikationen zu erlangen, erforderlichen Veränderungen in den (arbeits-)organisatorischen Bereichen der Unternehmen oder auch neuen rechtlichen Fragestellungen. Aus technischer Sicht stellen für Industrie 4.0 die Integration von cyber-physischen Systemen in der Produktion und Logistik sowie die Überführung des Internets der Dinge und Dienste in industrielle Prozesse die Voraussetzung dar.

Der deutsche Wirtschaftsstandort kann durchaus Erfolge in der Umsetzung von Industrie 4.0 vorweisen. Doch nach einem Jahrzehnt dieses Zukunftsprojekts lässt sich feststellen, dass Industrie 4.0 noch längst nicht vollständig in der Breite verwirklicht ist. Vor diesem Hintergrund hat der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 schon 2019 vier Themenfelder identifiziert, die die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe (FuE-Bedarfe) zur Umsetzung von Industrie 4.0 strukturiert darstellen:<sup>2</sup>

- Wertschöpfungsszenarien für Industrie 4.0
- Perspektiven technologischer Entwicklungen
- Neue Methoden und Werkzeuge für Industrie 4.0
- Arbeit und Gesellschaft

Diese Themenfelder bilden die Grundlage für die forschungsgetriebene Weiterentwicklung von Industrie 4.0, deren Ziel die praktische Umsetzung in der Breite bis hin zur Entstehung digitaler Ökosysteme ist. Der nächste Schritt geht von den tradierten, oftmals noch starren Einzellösungen im Kontext von Industrie 4.0 hin zu flexiblen, agilen und organisationsübergreifend vernetzten Wertschöpfungsnetzwerken. Darauf bauen innovative Geschäftsmodelle auf. Diese Entwicklung wird durch das „Leitbild 2030“ der Plattform

Industrie 4.0 beschrieben.<sup>3</sup> Dieses Leitbild orientiert sich an den strategischen Handlungsfeldern der *Souveränität*, *Interoperabilität* und *Nachhaltigkeit*, um digitale Ökosysteme global zu gestalten. Mit dieser Ausrichtung des Leitbilds ist ein erwarteter Wettbewerbsvorteil verbunden.

Die Vision von Industrie 4.0 im Leitbild 2030 zeigt, welche enormen Potenziale sowohl für einzelne Unternehmen als auch für den Wirtschafts- und Innovationsstandort Deutschland bestehen. Neben der praktischen Umsetzung, die institutionell maßgeblich von der Plattform Industrie 4.0 vorangetrieben wird, richtet sich damit der Blick auf die Bedeutung der Forschung. Hier bestehen trotz bisheriger Erfolge noch Herausforderungen. Durch die Breite der Forschungslandschaft und die Vielzahl an Initiativen kann leicht der Überblick über den Stand der Forschung und deren Potenziale verloren gehen. In der fehlenden Beurteilung geleisteter Forschungsförderung identifizierte der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 eine Lücke, die er mit dem vorliegenden Bericht schließen will.

Wesentliche Schritte hin zu einem insgesamt agileren und flexibleren Innovationssystem in Deutschland hat der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 bereits 2019 formuliert.<sup>4</sup> Damit die Unterstützung der Innovationsfähigkeit ihre volle Entfaltung findet, bedarf es nun außerdem einer systematischen Reflektion des Stands der Industrie 4.0-Forschung. Damit will der Forschungsbeirat einen weiteren Beitrag leisten, die Vorreiterrolle der deutschen Industrie auf dem Weltmarkt zu halten oder besser noch auszubauen.

Die Forschungslandschaft zu Industrie 4.0 ist durch große Vielfalt geprägt. Das gilt sowohl für die Verschiedenartigkeit der daran beteiligten Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft als auch für die Breite des Themenspektrums der Forschungsinhalte und Förderaktivitäten zu Industrie 4.0. Der Forschungsbeirat begrüßt das Engagement der verschiedenen Fördergeber sowie die damit verbundenen Möglichkeiten für Forschende, in unterschiedlichen Förderstrukturen eine Unterstützung zu erhalten. Die verschiedenen Fördergeber verfolgen das gemeinsame Ziel, Industrie 4.0 in Deutschland voranzutreiben, durch zahlreiche Förderinstrumente mit jeweils spezifischen Ausrichtungen und Strukturen. Mit Blick auf die bisherige Forschung lässt sich feststellen, dass es gelungen ist, Potenziale für einzelne Forschungsinitiativen zu schaffen und Engagement in der Industrie 4.0-Forschung zu motivieren. Vor diesem Hintergrund richtet sich dieser Impulsbericht in erster Linie an Entscheiderinnen und Entscheider aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Institutionen der Forschungsförderung, die sich bereits

2 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019a.

3 Vgl. BMWi 2019a.

4 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019b.

mit dem Thema Industrie 4.0 beschäftigen, aber auch an Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft, die sich dafür interessieren, in diesem Bereich aktiv zu werden.

Das übergreifende Ziel ist es, mit der Formulierung zentraler Thesen zur Industrie 4.0-Forschung eine Grundlage bereitzustellen, von der Impulse für die zielführende Weiterentwicklung der Forschungsaktivitäten ausgehen.

Zu diesem Zweck hat sich eine Expertengruppe aus Mitgliedern des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 gebildet.<sup>5</sup> Um die Grundlage für eine tiefergehende Analyse der Industrie 4.0-Forschung zu schaffen, wurde eine umfassende Datenbasis zu den geförderten Forschungsprojekten mit Bezug zu Industrie 4.0 erstellt. Der Betrachtungszeitraum erstreckt sich von August 2011

(frühester Projektbeginn) bis Juni 2024 (spätestes Projektende). Die Forschungsförderung wird von einer Vielzahl von Institutionen betrieben, die bislang jeweils nur eigene Auswertungen ihrer Aktivitäten vornehmen. Für eine übergreifende Bestandsaufnahme der Industrie 4.0-Forschung konzentriert sich der vorliegende Bericht auf die Fördergeber BMBF, BMWi, DFG und IGF, die großen Anteil an der gesamten Förderung im Bereich Industrie 4.0 haben. Zur systematischen Aufbereitung der Daten wurden die einzelnen Verbundvorhaben zunächst anhand verschiedener Kriterien den Themenfeldern der Industrie 4.0 (siehe [Abbildung 1](#)) zugeordnet und anschließend inhaltlich ausgewertet. Auf dieser Basis formulierte der Forschungsbeirat fünf zentrale Thesen. Diese Thesen fassen die Analyse zur bestehenden und Empfehlung für zukünftige Industrie 4.0-Forschung zusammen und bilden die Kernbotschaften dieses Impulses.

### 3. Fünf Thesen zur Industrie 4.0-Forschung für die Gestaltung der Zukunft

Die in den folgenden Teilabschnitten dargelegten Thesen fassen die Erkenntnisse zusammen, die die Mitglieder der Expertengruppe des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 im Zuge ihrer umfassenden Analyse der durch die Ministerien BMBF und BMWi, die IGF sowie die DFG geförderten Industrie 4.0-Forschungsprojekte gewinnen konnten. Folglich können die Thesen als induktive Schlussfolgerungen verstanden werden, die darauf abzielen, Impulse für die zielführende Weiterentwicklung der Forschungsaktivitäten zu Industrie 4.0 zu geben.

Nach Nennung der jeweiligen These wird in den anschließend formulierten Ausführungen eine inhaltliche Begründung beziehungsweise Thesenableitung unternommen. Während sich die ersten beiden Thesen a) und b) auf die inhaltliche Vielfalt der Industrie 4.0-Forschungsprojekte und die Vielgestaltigkeit der (vorwettbewerblichen) Förderaktivitäten beziehen, verweist These c) auf die Fortschritte der Industrie 4.0-Forschung und ihre Auswirkungen in Wissenschaft und Wirtschaft. Mit den Thesen d) und e) werden schließlich die Hebelwirkungen für Innovationspotenziale verdeutlicht, die mit der Industrie 4.0-(Verbund-)Forschung einhergehen, sowie die unternehmensstrategischen Wettbewerbsvorteile von Industrie 4.0 und ihre wirtschafts- und gesellschaftspolitischen Chancen erörtert.

**a) Eine Spiegelung der Industrie 4.0-Forschungsprojekte an den Themenfeldern zeigt, dass einerseits eine hohe Forschungsdynamik festgestellt werden kann, andererseits enorme Potenziale für zukünftige Forschungsaktivitäten bestehen.**

Die Industrie 4.0-Forschung verfügt über eine große thematische Vielfalt. In einem sehr breiten inhaltlichen Spektrum wurden bisher erhebliche Fördersummen bereitgestellt und auch nachgefragt. Die „Themenfelder Industrie 4.0“ des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0<sup>6</sup> kategorisieren Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in allen Bereichen von Industrie 4.0. Anhand dieser Struktur lassen sich auch der aktuelle Stand der Forschungsaktivitäten sowie Entwicklungschancen und -risiken beschreiben. Die Themenfelder sind in der nachfolgenden Abbildung 1 zusammengefasst.

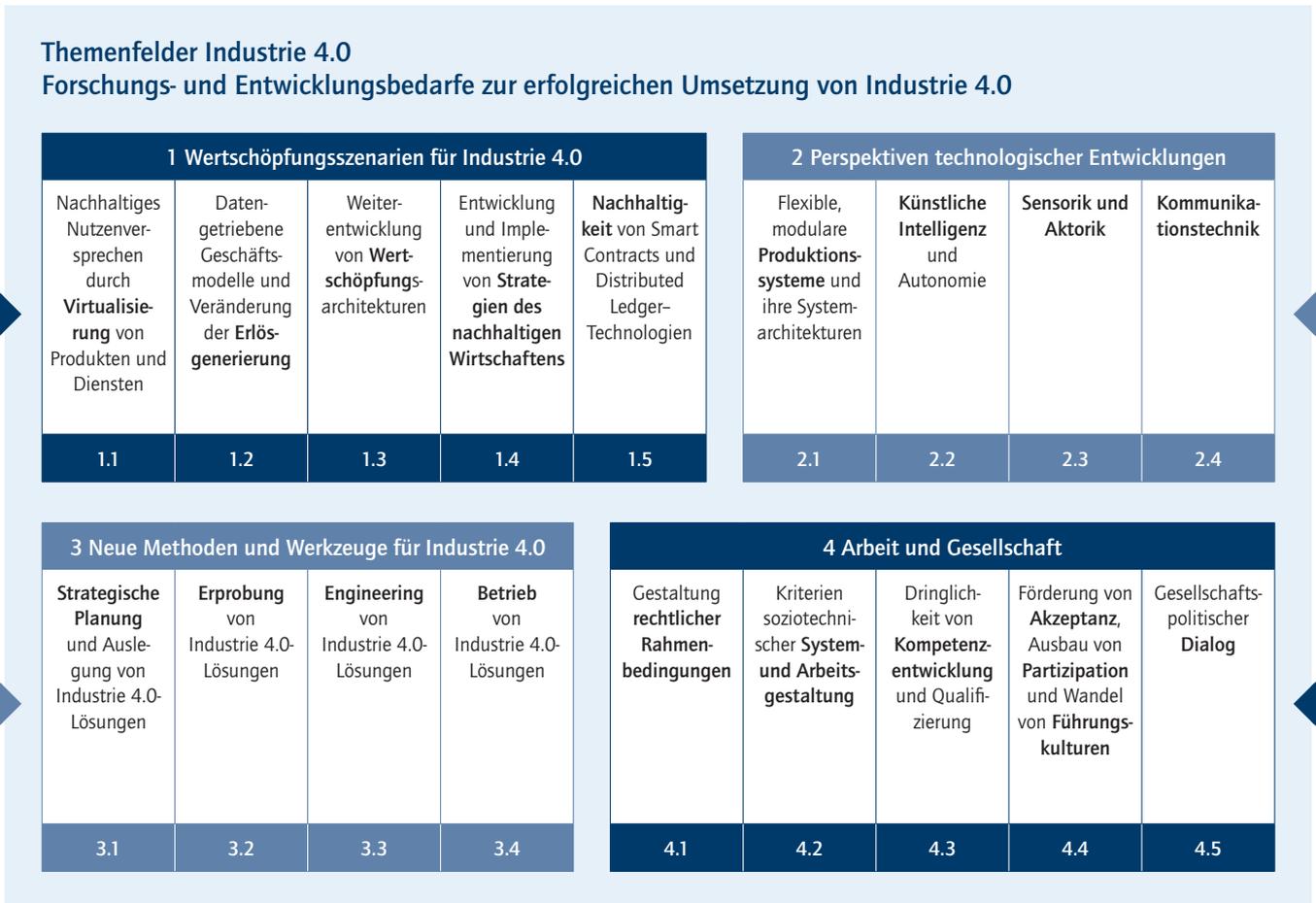
Die Analyse zur Verteilung der Forschungsvorhaben auf die Themenfelder ergab, dass das Themenspektrum von Industrie 4.0 in seiner ganzen Breite bearbeitet wird. Eine große Anzahl an Forschungsprojekten trägt dazu bei, die *Perspektiven technologischer Entwicklungen* (Themenfeld 2) zu erweitern. Dennoch lässt sich konstatieren, dass auch in die anderen Themenfelder erhebliche Summen geflossen sind. Dabei ist es folgerichtig, dass zum Beispiel Themen wie die Weiterentwicklung von Wertschöpfungsarchitekturen und Arbeitsbedingungen der Industrie 4.0 erst vollständig und umfassend erforscht werden können, wenn Basistechnologien und Pilotierungen in der Praxis Einzug gehalten und eine gewisse Reife erlangt haben, sodass deren Potenziale absehbar sind. Auch wenn die Förderungen in diesen Bereichen derzeit etwas niedriger ausfallen, ist die Dringlichkeit der Bedarfe erkannt worden und wird mit neuen Aktivitäten inzwischen bedient. Forschungsprojekte haben zudem bereits vergleichsweise neue Themen wie das Themenfeld 1.5 *Nachhaltigkeit von Smart Contracts und Distributed-Ledger-Technologien* aufgegriffen.

In den neueren wie auch den etablierteren Themenfeldern bestehen weiterhin Potenziale für zukünftige Forschung. Zudem lassen sich mit Blick auf die weitere Umsetzung von Industrie 4.0 in der Praxis, das Leitbild 2030 für Industrie 4.0 und die Vision globaler digitaler Ökosysteme zukünftig neue Forschungsbedarfe ableiten, die es zu berücksichtigen gilt.

**b) Forschungsaktivitäten werden durch Förderprogramme geprägt. Daneben initiieren und begleiten Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft vorwettbewerbliche Forschung.**

Um das breite thematische Spektrum der aktuellen wie der zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe abzudecken (siehe [These a](#)) sind ebenso vielfältige Förderaktivitäten notwendig. Die Vergabe von Fördermitteln ermöglicht die Realisierung wertvoller Innovationstätigkeiten und unterstützt die verschiedenen Herausforderungen von – auch ressourcenintensiven – Forschungsvorhaben. Die Initiativen unterscheiden sich nicht nur thematisch voneinander, auch die Fördergeber der Industrie 4.0-Vorhaben variieren zum Beispiel im Hinblick auf ihre Förderstrukturen und Fördersätze, die Koordination der Projekte und ihre grundsätzliche

Abbildung 1: Die Themenfelder des Forschungsbeirats



Ausrichtung. So können Forschungsinitiativen sowohl im Rahmen von Forschungsprogrammen der Fördergeber stattfinden als auch auf Eigeninitiative der Forschenden. Für eine bessere Übersicht der Optionen werden im Folgenden die Fördergeber BMBF, BMWi, DFG und IGF charakterisiert.<sup>7</sup>

Die Kompetenz des Bundes zur Förderung von Forschungsvorhaben liegt in den einzelnen Ministerien. Ziel der Bundesförderung ist die Steigerung und Stärkung der nationalen Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit. Für Innovationspolitik sind das BMBF und das BMWi handlungsführend und deshalb – wenn auch nicht allein – für die Förderung im Bereich der Industrie 4.0 zuständig. Die Ministerien sind auf informeller Ebene miteinander vernetzt<sup>8</sup> und legen Förderprogramme auf, die über Bekanntmachungen unterschiedliche

inhaltliche Schwerpunkte setzen. Interessierte, die sich erfolgreich mit Projektideen auf die Bekanntmachungen bewerben, werden mithilfe einer gezielten Förderung ihrer (Forschungs-)Vorhaben im Bereich der Industrie 4.0 bei der Überführung von Wissen in unternehmensbezogene Veränderungsprozesse unterstützt. Gefördert werden vorrangig Forschungsverbünde zwischen wissenschaftlichen Einrichtungen und Unternehmen.<sup>9</sup> Kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) kommt dabei eine besondere Aufmerksamkeit zu. So sind einzelne Programme speziell KMU vorbehalten.

Förderprogramme tragen über eine Reihe von Bekanntmachungen zum Erfolg von Industrie 4.0 in verschiedenen Themenfeldern bei (siehe [Abbildung 1](#)). Zum Beispiel fördert das BMBF innovative

7 Ergänzend zu den im Rahmen dieses Impulsberichts betrachteten Fördergebern kann der Fokus der Bestandsaufnahme zukünftig auf weitere Fördermaßnahmen auf Landes-, Bundes- und Europaebene ausgedehnt werden. Auf Bundesebene wäre zum Beispiel auch eine Berücksichtigung der Fördermaßnahmen des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BAMs) und des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) denkbar. Auf Landesebene könnten zudem die Fördermaßnahmen der Bundesländer zu Industrie 4.0 untersucht werden. Schließlich wäre auf internationaler Ebene eine Betrachtung der Förderstrukturen der Europäischen Union im Kontext von Industrie 4.0 möglich.

8 Vgl. Hülskamp/Koppel 2006, S. 13.

9 Vgl. Förderberatung des Bundes 2021.

Methoden der Produktentstehung mit der Bekanntmachung „Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen“ (2019).<sup>10</sup> Außerdem fördert das BMBF im Vergleich zu anderen Forschungsförderern die mit Industrie 4.0 einhergehenden Änderungen bei den Arbeitsinhalten und die Erweiterung der Qualifikationen der Arbeitskräfte überproportional stark. Das BMWi eröffnete dagegen neue Perspektiven für innovative Technologien mit Programmen wie „Autonomik für Industrie 4.0“ (2013–2017)<sup>11</sup> und „PAiCE (Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering)“ (2016–2021)<sup>12</sup>. Programme wie „Smart Service Welt“ (2016–2019) und „Smart Service Welt II“ (2018–2021) trugen zur Konzeption neuer Wertschöpfungsszenarien für Industrie 4.0 bei.

Neben diversen Förderprogrammen von Bundesministerien stellen auch DFG und IGF Fördersummen oder organisatorische Maßnahmen bereit, um die Forschung und Entwicklung im Bereich Industrie 4.0 voranzutreiben. Die DFG versteht sich als die Selbstverwaltungsorganisation der Wissenschaft in Deutschland.<sup>13</sup> Ihre Förderung kann auch unabhängig von konkreten Programmen auf Initiative aus der Wissenschaft beantragt und erhalten werden. Mitglieder sind Hochschulen, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, wissenschaftliche Verbände sowie die Akademie der Wissenschaften. Die DFG fördert schwerpunktmäßig Forschungsvorhaben, die im Sinne der Grundlagenforschung neue Themengebiete erschließen.<sup>14</sup> Beispiele für DFG-Fördermaßnahmen, die in besonderem Maße zur Grundlagenforschung im Bereich Industrie 4.0 beitragen, sind der Sonderforschungsbereich 768 „Zyklusmanagement von Innovationsprozessen – Verzahnte Entwicklung von Leistungsbündeln auf Basis technischer Produkte“ oder das Exzellenzcluster „Internet of Production (IoP)“.

Die IGF schlägt eine Brücke zwischen vorwettbewerblicher Grundlagenforschung und wirtschaftlicher Anwendung.<sup>15</sup> Sie ist unter dem Dach der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) angesiedelt, die das Förderverfahren im Auftrag des BMWi koordiniert. Die Förderung der IGF ermöglicht die praxisnahe Forschung der deutschen mittelständischen Industrie und hilft insbesondere KMU, mögliche Defizite im Bereich Forschung und Entwicklung auszugleichen. Durch die Mitarbeit in den Forschungsvereinigungen der AiF können sich Unternehmen oder Forschungsstellen mit neuen Ideen einbringen und Vorschläge für Themen unterbreiten, die im Rahmen eines FuE-Vorhabens der IGF bearbeitet werden sollen. Um im Bereich Industrie 4.0 wettbewerbsfähig zu bleiben, ist für KMU Forschung bedeutsam, die der Produktentwicklung vorausgeht. Diese ist jedoch mit finanziellen Herausforderungen verbunden. Zwar fördert die IGF finanziell vordergründig Forschungseinrichtungen und Universitäten, doch kann sich die Industrie über die Beteiligung ihrer Beschäftigten in die Forschung einbringen, ohne dafür eine

finanzielle Förderung zu erhalten. Dabei ist für die IGF der starke Fokus auf eine Förderung des Praxistransfers zwischen Forschung und Wirtschaft charakteristisch.

**c) Industrie 4.0 hat zu einer hohen Aufmerksamkeit in Wissenschaft und Wirtschaft geführt und Impulse für erfolgreiche Forschung gesetzt, wobei im Kontext der Wirtschaft kleine und mittlere Unternehmen in der Industrie 4.0-Forschung sehr sichtbar sind.**

Angesichts der inhaltlichen und strukturellen Vielfalt der Industrie 4.0-Forschungslandschaft in Deutschland sowie der verteilten Fördersummen für vorwettbewerbliche Förderung lässt sich festhalten, dass das Forschungsfeld Industrie 4.0 eine große Aufmerksamkeit bei allen Stakeholdern erfährt und ihm seitens der Politik innovationspolitische Relevanz beigemessen wird. So ist in den letzten zehn Jahren die Vision Industrie 4.0 im Bewusstsein vieler Unternehmen und wissenschaftlicher Institutionen auf nationaler und globaler Ebene angekommen und hat seither eine breite Zustimmung in Wirtschaft und in Wissenschaft erfahren. Diese Fortschritte zeigen sich nicht nur in der Anzahl und inhaltlichen Diversität der Industrie 4.0-Forschungsaktivitäten und Fördermaßnahmen (siehe [Thesen a](#) und [b](#)), sondern auch in der Verschiedenartigkeit der Institutionen, die Forschungsaktivitäten zu Industrie 4.0 durchführen, wichtige Erkenntnisse ableiten und dafür auch Förderleistungen empfangen.

Aus der Wissenschaft bzw. in der akademischen Industrie 4.0-Forschung sind beispielsweise öffentliche und private Universitäten ebenso aktiv wie außeruniversitäre Einrichtungen (zum Beispiel Fraunhofer-Gesellschaft, Max-Planck-Gesellschaft) und Fachhochschulen. Im Kontext der Wirtschaft und Industrieforschung setzen sich sowohl Großunternehmen als auch KMU schwerpunktmäßig mit anwendungs- und praxisnahen Fragestellungen auseinander. Daneben sind Mittelempfänger für Industrie 4.0-Forschung auch Verbände, Stiftungen, Gewerkschaften, (Innovations-)Cluster, Netzwerke, Behörden sowie Anstalten von Bund oder Ländern.

Seit August 2011 wurde eine große Anzahl an Forschungsvorhaben durchgeführt, die wichtige Impulse zum Fortschritt von Industrie 4.0 geben konnten. Es lässt sich bei den verschiedenen Akteuren ein konstant hohes Interesse an der Industrie 4.0-Forschungsförderung erkennen, das zudem auf einen gewissen Erfolg der Maßnahmen schließen lässt. Durch die Unterstützung der verschiedenen Fördergeber existiert für den Bereich Industrie 4.0 ein vielfältiges Instrumentarium an Fördermaßnahmen, das die Realisierung von

<sup>10</sup> Vgl. BMBF 2019.

<sup>11</sup> Vgl. BMWi 2021a.

<sup>12</sup> Vgl. BMWi 2021b.

<sup>13</sup> Vgl. DFG 2016.

<sup>14</sup> Vgl. DFG 2012.

<sup>15</sup> Vgl. IGF 2021.

Forschungsvorhaben ermöglicht. Während die grundlegenden Prinzipien von Industrie 4.0 bekannt sind und insbesondere Deutschland in vielerlei Hinsicht eine führende Rolle einnehmen konnten, fehlt es häufig an der erfolgreichen Implementierung sowohl im technischen als auch ökonomischen Kontext. Diese gilt es auch zukünftig zu erforschen, um die Chancen und Potenziale von Industrie 4.0 hinreichend nutzen zu können.

Die disruptiven Veränderungsprozesse im Kontext von Industrie 4.0 sind mit erheblichen Konsequenzen für die betroffenen Marktakteure verbunden, wobei insbesondere KMU mit enormen Herausforderungen konfrontiert werden.<sup>16</sup> Gerade für Deutschland ist es essenziell, dass der „Wirtschaftsmotor“ Mittelstand und KMU den digitalen Wandel und die Umsetzung von Industrie 4.0 erfolgreich meistert – schließlich umfassen Unternehmen mit weniger als 500 Mitarbeitern beziehungsweise 50 Millionen Euro Umsatz über 99 Prozent aller inländischen Unternehmen und knapp 60 Prozent der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten.<sup>17</sup> Erforschung, Entwicklung und erfolgreiche Implementierung von innovativen Lösungen für diese Unternehmensgruppe können sich von den Bedarfen der Großunternehmen unterscheiden. Für den Mittelstand und KMU bestehen oftmals spezifische technologische, ökonomische und institutionelle Hürden, die es zu überwinden gilt. Die dafür notwendigen Ressourcen und Kompetenzen gilt es nachhaltig zu erlangen beziehungsweise aufzubauen. Somit kommt der Forschungsförderung auch in Zukunft eine (erfolgs-)kritische Bedeutung zu. Auch bei Start-ups, die aufgrund ihrer Bonität häufig nicht förderbar sind, gäbe es Potenzial, besser in die Verbundforschung eingebunden zu werden.

Das öffentliche Förderangebot ist zum Teil dediziert auf KMU ausgerichtet. Vor allem familiengeführte Unternehmen mit mehr als 249 Beschäftigten (und bis zu 50 Millionen € Umsatz/Jahr), die nach der Definition der Europäischen Union (2003/361/EG) nicht mehr zu KMU zählen, jedoch aufgrund der Einheit von Eigentum und Leitung dem Mittelstand<sup>18</sup> zuzuordnen sind, fühlen sich deshalb häufig benachteiligt.<sup>19</sup> Der Grund hierfür ist, dass sie nicht in gleichem Maße von Forschungsförderungen und -strukturen profitieren können, wie es KMU möglich ist, auf die solche Förderungen explizit ausgerichtet sind. Andererseits stehen Mittelstandsunternehmen häufig nicht die Ressourcen oder internen Strukturen zur Verfügung, die es Großunternehmen im eigentlichen Sinne erleichtern, Innovationen über Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten voranzutreiben.

#### **d) Hebelwirkungen für Innovationspotenziale setzen große Anreize für Wirtschaftsunternehmen, sich an der Verbundforschung zu beteiligen.**

Die Beteiligung von Unternehmen an Forschungs- und Entwicklungsprojekten ist nicht primär oder ausschließlich durch die ausgeschriebenen Fördersummen motiviert. Vielmehr sind es die Synergiepotenziale und Hebelwirkungen, die zu Kollaborationen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft in FuE-Kooperationen beziehungsweise Verbundmaßnahmen Anreiz geben. Hier findet Wissenstransfer zwischen den Kooperationspartnern statt, Probleme werden aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet und Möglichkeiten des Kompetenzaufbaus geschaffen. Insofern leisten solche Formen der Zusammenarbeit einen Beitrag, die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen und Organisationen zu sichern.

Im Zuge der steigenden (sozio-)technischen Komplexität von Produkten (beziehungsweise Produkt-Service-Systemen) und kürzeren Produktlebenszyklen konnte bereits in den letzten Jahren eine höhere Kooperationsbereitschaft der Unternehmen im FuE-Bereich verzeichnet werden. Dieses gesteigerte Interesse lässt sich auch darauf zurückführen, dass einzelne Unternehmen häufig nicht über alle für die Entwicklung von Industrie 4.0-Lösungen erforderlichen Fähigkeiten, Technologie-, Prozess- oder Methodenkompetenzen sowie Ressourcen (auch Apparaturen) verfügen.<sup>20</sup> Zudem wird über solche Kooperationen mit geeigneten Partnern darauf abgezielt, den erfolgreichen Transfer von FuE-Ergebnissen in die praktische Anwendung zu forcieren.<sup>21</sup> Dafür ist die Integration von verschiedenen Problemdefinitionen und -interpretationen aus unterschiedlichen Perspektiven ausschlaggebend. Externe Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft können über die Kooperationstätigkeiten auch Kontakte zu Fach-Communities herstellen, die wiederum Anknüpfungspunkte für zukünftige, nachhaltige und strategisch ausgerichtete Partnerschaften auch in angrenzenden Technologie- und Themenbereichen sein können.<sup>22</sup>

Insbesondere für KMU können Verbundprojekte eine Möglichkeit darstellen, von den Erkenntnissen der (internationalen) Spitzenforschung zu profitieren, ohne die erforderlichen Ressourcen und Mittel allein aufbringen zu müssen. Über diesen Wissenstransfer gilt es dann zusammen mit den Verbundpartnern, aus Innovationen marktreife Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln und zu erproben.<sup>23</sup> Auch junge Hightechunternehmen, die mit hohem Wachstumspotenzial bestehende Märkte umfassend verändern oder neue Märkte schaffen können, sind vielversprechende Partner in interdisziplinären FuE-Kooperationsvorhaben. Für etablierte Unternehmen

16 Vgl. Kinkel et al. 2020, S. 8.

17 Vgl. BMWi 2019b.

18 Vgl. IfM 2021.

19 Vgl. Ilg 2018.

20 Vgl. IHK Region Stuttgart 2015.

21 Vgl. Henke/Kuhn 2017, S. 7.

22 Vgl. IHK Region Stuttgart 2015.

23 Vgl. NKS KMU o.J.

und wissenschaftliche Einrichtungen sind Lerneffekte bei der Anwendung einer neuen Technologie oder der Implementierung eines innovativen Geschäftsmodells denkbar, sofern die Möglichkeiten gegeben werden, die neuen Lösungen unmittelbar im Industrieumfeld einzusetzen und dort auch weiterzuentwickeln. So wäre es vorstellbar, dass beispielsweise erfahrene Forschende ihre Expertise in solche Vorhaben auch beratend einbringen, während sie im Gegenzug zusammen mit den etablierten Unternehmen von den neuen Ideen, innovativen Technologien und Methoden junger Unternehmen lernen.<sup>24</sup>

**e) Die Nutzung von Industrie 4.0 bietet zunehmend einen unternehmensstrategischen Wettbewerbsvorteil mit wirtschafts- und gesellschaftspolitischen Potenzialen.**

Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit im regionalen, nationalen und globalen Kontext ist es für Unternehmen von essenzieller Bedeutung, Innovationen über dedizierte FuE-Maßnahmen voranzutreiben. Vor dem Hintergrund des internationalen Wettbewerbsdrucks lässt sich der Unternehmenserfolg so nachhaltig festigen beziehungsweise steigern. Schon in der Vergangenheit konnte in verschiedenen empirischen Analysen ein positiver Zusammenhang zwischen den FuE-Aktivitäten von Unternehmen und dem wirtschaftlichen Erfolg festgestellt werden.<sup>25</sup> Einen Beitrag hierfür leistet die vorwettbewerbliche Kooperation verschiedener Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft, die auf allen Seiten eine Erweiterung von Fähigkeiten und Kompetenzen ermöglicht.

FuE-Initiativen sind nicht nur für einzelne Unternehmen eine Investition in die Zukunft. Durch vorwettbewerbliche Kooperationen und die entsprechende politische Förderung entsteht eine wettbewerbsfähige, innovative und nachhaltige Wirtschaft, wie sie mit der High-tech Strategie 2025 der Bundesregierung<sup>26</sup> und dem Leitbild 2030 für Industrie 4.0<sup>27</sup> angestrebt werden. Die Forschungsförderung

ist dabei ein entscheidender Impulsgeber mit einer Hebelwirkung für industrielle Innovationspotenziale (siehe [These c](#)). Neben der monetären Unterstützung schafft sie auch Strukturen, die den Transfer und wechselseitigen Austausch verschiedener Akteure fördern und gestalten. Dabei bedarf es eines ganzheitlichen Verständnisses von Industrie 4.0 als eine wirtschafts- und gesellschaftspolitische Gestaltungsaufgabe. Schließlich sind über technische Entwicklungen hinaus auch betriebswirtschaftliche, organisatorische oder gesellschaftliche Lösungsansätze notwendig, um die digitale Transformation zu Industrie 4.0 bestmöglich umzusetzen (siehe [These a](#)).

Wie insbesondere in den Forschungsaktivitäten des Themenfelds 1 *Wertschöpfungsszenarien für Industrie 4.0* (siehe [Abbildung 1](#)) zum Ausdruck kommt, wurde die Bedeutung von Industrie 4.0 für die betriebswirtschaftlichen Strategien der Unternehmen erkannt. Unternehmen beginnen mit der Entwicklung und Umsetzung von innovativen Geschäftsmodellen im Bereich Industrie 4.0,<sup>28</sup> um die enormen wirtschaftlichen Potenziale zu heben und im internationalen Wettbewerb zu nutzen. Dabei werden sie durch forschungspolitische Maßnahmen unterstützt. Weitere Gestaltungsmöglichkeiten in der Forschungsförderung werden durch die Integration gesellschaftspolitischer Ziele, wie der Nachhaltigkeit in der Wertschöpfung, genutzt. In ähnlicher Größenordnung wie bei den Forschungsaktivitäten zu Wertschöpfungsszenarien werden auch Forschungsprojekte im Themenfeld 4 *Arbeit und Gesellschaft* in der Industrie 4.0 gefördert. Im Vergleich mit anderen Forschungsförderungern unterstützt insbesondere das BMBF Forschung zur soziotechnischen System- und Arbeitsgestaltung, Kompetenzentwicklung und Akzeptanz von Industrie 4.0 überproportional stark.

Die Forschungsaktivitäten sollten somit auch in Zukunft im technischen, ökonomischen, organisatorischen, institutionellen und auch gesellschaftlichen Kontext die wesentlichen Aspekte adressieren, um die Leitanbieterschaft deutscher Unternehmen und den Leitmarkt für Industrie 4.0 zu sichern beziehungsweise die Position und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im internationalen Vergleich auszubauen.<sup>29</sup>

24 Vgl. Achleitner et al. 2019, S. 6.

25 Vgl. beispielsweise Hülskamp/Koppel 2006, S. 6f.

26 Vgl. BMBF 2018.

27 Vgl. BMWi 2019a.

28 Vgl. Gausemeier et al. 2017.

29 Vgl. Gausemeier et al. 2016.

## 4. Ausblick

Seitdem Industrie 4.0 im Jahr 2011 als Zukunftsprojekt der Bundesregierung im Rahmen der deutschen Hightech-Strategie aus der Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft und acatech hervorgegangen ist und im Anschluss Forschungsbedarfe sowie konkrete Umsetzungsempfehlungen erarbeitet wurden, ist dieses Konzept der „vierten industriellen Revolution“ für Forschende und Handelnde aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik im nationalen und internationalen Kontext von höchster Relevanz. Dabei wurden von Beginn an nicht nur technische Aspekte im Kontext der Digitalisierung des Produktionsbereichs, die veränderte (Fertigungs-)Methoden und Prozesse nach sich ziehen, thematisiert und beforscht. Die Chancen von Industrie 4.0 bestehen vor allem darin, auf Grundlage der Vernetzung von Menschen, Produkten, Maschinen und Systemen sowie der Sammlung, Speicherung, Verarbeitung, Veredelung und Analyse von Daten über digitale Plattformen innovative Geschäftsmodelle zu realisieren. Diese zeichnen sich durch individualisierbare Formen des Nutzenversprechens, neue Möglichkeiten der Umsatz- und Profitgenerierung sowie durch flexible und resiliente Konfigurationen von Wertschöpfungsnetzwerken aus. Gleichzeitig werden Veränderungen beziehungsweise Anpassungsprozesse in den Organisationsformen sowie in der Arbeitswelt mit neuen Potenzialen der Mensch-Maschinen Interaktion berücksichtigt. Die Zielsetzung, dass im Zuge der notwendigen Transformationsprozesse hin zu agilen, lernenden und anpassungsfähigen, ressourcen- und energieeffizienten Unternehmen beziehungsweise Organisationen der Mensch im Mittelpunkt stehen soll, blieb bis heute unverändert. Die Aspekte der Nachhaltigkeit gewinnen zudem immer mehr an Bedeutung.

Nach zehn Jahren ist Industrie 4.0 im Bewusstsein vieler Unternehmen angekommen und hat seither breite Zustimmung in Wirtschaft und Wissenschaft sowie weltweite Aufmerksamkeit und Anerkennung erfahren. Die grundlegenden Prinzipien sind bekannt. Insbesondere Deutschland konnte in vielerlei Hinsicht eine führende Position im Wandlungsprozess der vierten industriellen Revolution einnehmen, wenngleich eine Vielzahl von Aspekten zur erfolgreichen Umsetzung noch erforscht werden muss.<sup>30</sup>

Fortschritte zeigen sich insbesondere in der Anzahl und inhaltlichen Breite der vielfältigen Industrie 4.0-Forschungsaktivitäten und Fördermaßnahmen (siehe [Thesen a](#) bis [c](#)). Die Chancen und Potenziale von Industrie 4.0 sind jedoch bei Weitem noch nicht ausgereizt. Zudem ist bisher nur ein geringer Teil der deutschen Unternehmen in der Lage, eine umfassende Implementierung von Industrie 4.0 zu erreichen. Bei der Umsetzung von Industrie 4.0-Technologien und darauf aufsetzenden datengetriebenen beziehungsweise

plattformbasierten Geschäftsmodellen besteht somit zum Teil noch erheblicher Handlungsbedarf. Insbesondere hohe Investitionskosten, Herausforderungen bei der Ermittlung des konkreten Nutzens sowie unzureichende Datenqualität hemmen die Durchdringung und stellen vor allem für KMU wesentliche Hürden dar.<sup>31</sup>

Deshalb bedarf es weiterhin einer umfassenden Industrie 4.0-Forschung, die über verschiedene Fördermaßnahmen zu unterschiedlichen Themenbereichen hohe Innovationsgeschwindigkeit sicherstellt und zu einer erfolgreichen Umsetzung in die Praxis – insbesondere auch bei KMU sowie eigentümergeführten Mittelstandsbetrieben – beitragen kann. Antworten sollen unter anderem auf die Frage gefunden werden, welche konkreten Schritte nötig sind, um eine erfolgreiche Implementierung zu schaffen. Es ist somit von kritischer Bedeutung, dass die Förder- und Unterstützungsleistungen der öffentlichen Fördergeber auch in den kommenden Jahren fortgeführt und entsprechend den sich ändernden Anforderungen angepasst werden. Welche Hebelwirkungen sich aus FuE-Aktivitäten für industrielle Innovationspotenziale ergeben, wurde in [These d](#) abgeleitet.

Zur Forcierung von Innovationen im Bereich Industrie 4.0 ist zudem ein flexibles Innovationssystem erforderlich, das eine agile, interdisziplinäre und beständige Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen, Unternehmen sowie zivilgesellschaftlichen Akteuren ermöglicht.<sup>32</sup> Dabei ist es wichtig, verstärkt Innovationen zu Integrations- (z. B. Künstliche Intelligenz) und Anwendungsthemen (z. B. Erreichung der CO<sub>2</sub>-Neutralität in der Produktion) voranzutreiben.

In den USA und in asiatischen Staaten wie China, Japan und Korea werden hohe Summen in neue Technologien investiert, wodurch die globale Wettbewerbsfähigkeit des europäischen und des deutschen Innovationssystems unter Druck gerät. Die Sicherung der Exportstärke Deutschlands bei Industrie 4.0-Lösungen und der Erhalt der effizienten Fertigung physischer Güter höchster Qualität als Rückgrat unserer Volkswirtschaft schaffen die Voraussetzungen, langfristig Arbeitsplätze – nicht nur im Produktionsbereich – zu sichern und so die Basis für eine erfolgreiche Arbeitsmarktgestaltung zu schaffen. Gleichzeitig ist im Kontext der Nachhaltigkeit die stetige Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz als eines der zentralen Ziele von Industrie 4.0 weiter zu forcieren und eine klimafreundliche Kreislaufwirtschaft zu unterstützen.

Neue Technologien und die Implementierung von Industrie 4.0 bieten Unternehmen nicht nur die Chance, Produktionsprozesse und -routinen effizienter zu gestalten, sondern auch neue Möglichkeiten der Differenzierung ihres Leistungsangebots gegenüber

30 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2021.

31 Vgl. Kinkel et al. 2020, S. 8.

32 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2019b.

Mitbewerbern aus dem In- und Ausland. Dieser bi-modale Ansatz ist bei der Umsetzung von daten- und plattformbasierten Geschäftsmodellen aus ökonomischer Sicht von zentraler Bedeutung. Digitale (Daten-)Plattformen bilden dabei das Zentrum innerhalb dynamischer, zunehmend resilienterer Ökosysteme, über die vielfältige Kollaborations- beziehungsweise Kooperationsmöglichkeiten mit verschiedenen Akteuren über die eigenen Unternehmensgrenzen hinweg existieren. Wesentliche Voraussetzung dafür ist die Schaffung von Datenräumen, die die Souveränität, das heißt die Kontrolle und Selbstbestimmung über die eigenen Daten, die in diesem Kontext als Wirtschaftsgut angesehen werden können, sicherstellen, um letztlich das notwendige Vertrauen für die Bereitstellung von Daten und ihren Austausch zu generieren.

Die Corona-Pandemie hat die Abhängigkeiten Deutschlands von ausländischer Produktion über eine Vielzahl von Sektoren verdeutlicht – nicht nur in Hinblick auf die Bereitstellung von Schutzmasken oder Vakzinen. Deshalb sollten zukünftige Forschungsaktivitäten auch die langfristige und nachhaltige Sicherung der Souveränität bei Schlüsseltechnologien (zum Beispiel 5G in der Industrie, Industrial AI), aber auch bei Safety- und (IT-)Security-Themen fokussieren. Zudem sollte die proaktive Mitwirkung bei Standardisierungs-, Normierungs- und Zertifizierungsprozessen forciert werden, um bei der Sicherstellung der Interoperabilität von Soft- und Hardwarelösungen im Kontext von Industrie 4.0 eine führende Stellung einzunehmen.

Gleichzeitig gilt es, zukünftige Forschungsaktivitäten auch weiterhin auf notwendige Änderungen in den organisationsinternen Abläufen, Prozessen und Strukturen auszurichten. Zudem muss vor dem Hintergrund der fortlaufend neu entstehenden Kollaborationsmöglichkeiten zwischen Mensch und Maschinen der Wandel der Arbeits- und Beschäftigungsformen vorausschauend begleitet werden. Ebenso müssen geeignete Ansätze zur Aus- und Weiterbildung beziehungsweise Kompetenzentwicklung über dedizierte Programme und Initiativen verfolgt werden, um im Kontext des menschenzentrierten Ansatzes von Industrie 4.0 gute industrielle Arbeit zu sichern und nachhaltig zu gestalten.

Abschließend lässt sich konstatieren, dass der Stellenwert von Industrie 4.0 als global anerkannte Marke beziehungsweise Maßstab sowie aufgrund der vielfältigen wirtschafts- und gesellschaftspolitischen Potenziale (siehe [These e](#)) als Gestaltungsinstrumentarium weiter zu stärken ist. Hier gilt es auch zukünftig, die vorhandene Expertise und Kompetenz von Akteuren aus Wirtschaft, Verbänden, Wissenschaft, Politik und Gewerkschaften synergetisch zu bündeln, um die vielschichtigen Problemstellungen interdisziplinär zu diskutieren, damit die vierte industrielle Revolution von Deutschland global über einen menschenzentrierten Ansatz verankert wird. Dazu wurde mit der Plattform Industrie 4.0 bereits ein umfassendes Ökosystem geschaffen. Diese Form des interdisziplinären Austauschs gilt es weiterhin auszubauen und zu fördern.

# Literatur

## Achleitner et al. 2019

Achleitner A.-K./Braun, R./Behrens, J. H./Lange, T.: *Innovationskraft in Deutschland verbessern: Ökosystem für Wachstumsfinanzierung stärken (acatech STUDIE)*, 2019. URL: [www.acatech.de/publikation/innovationskraft-in-deutschland-verbessern/](http://www.acatech.de/publikation/innovationskraft-in-deutschland-verbessern/) [Stand: 27.08.2021].

## BMBF 2018

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Forschung und Innovation für die Menschen. Die Hightech-Strategie 2025*, 2018. URL: [www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/pdf/forschung-und-innovation-fuer-die-menschen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/pdf/forschung-und-innovation-fuer-die-menschen.pdf?__blob=publicationFile&v=2) [Stand: 27.08.2021].

## BMBF 2019

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Bekanntmachung im Rahmen des Forschungsprogramms „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ – Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Thema „Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA\_ASE)“*, 2019. URL: [www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-2359.html](http://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-2359.html) [Stand: 27.08.2021].

## BMWi 2019a

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Leitbild 2030 für Industrie 4.0. Digitale Ökosysteme global gestalten*, 2019. URL: [www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Leitbild-2030-für-Industrie-4.0.pdf](http://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Leitbild-2030-für-Industrie-4.0.pdf) [Stand: 27.08.2021].

## BMWi 2019b

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Wirtschaftsmotor Mittelstand – Zahlen und Fakten zu den deutschen KMU*, 2019. URL: [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/wirtschaftsmotor-mittelstand-zahlen-und-fakten-zu-den-deutschen-kmu.pdf](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/wirtschaftsmotor-mittelstand-zahlen-und-fakten-zu-den-deutschen-kmu.pdf). [Stand: 27.08.2021].

## BMWi 2021a

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Autonomik für Industrie 4.0*, 2021. URL: [www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AbgeschlosseneProgrammeProjekte/Autonomik-fuer-Industrie40/autonomik-industrie-40.html](http://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AbgeschlosseneProgrammeProjekte/Autonomik-fuer-Industrie40/autonomik-industrie-40.html) [Stand: 27.08.2021].

## BMWi 2021b

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Programm PAiCE*, 2021. URL: [www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AktuelleTechnologieprogramme/PAiCE/Programm/programm.html](http://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AktuelleTechnologieprogramme/PAiCE/Programm/programm.html) [Stand: 27.08.2021].

## DFG 2012

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): *Die Förderstrategie der DFG*, 2012. URL: [www.dfg.de/dfg\\_profil/geschichte/foerderung-gestern\\_und\\_heute/aktuelle\\_strategie/index.html](http://www.dfg.de/dfg_profil/geschichte/foerderung-gestern_und_heute/aktuelle_strategie/index.html) [Stand: 27.058.2021].

## DFG 2016

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): *Aufgaben der DFG*, 2016. URL: [www.dfg.de/dfg\\_profil/aufgaben/index.html](http://www.dfg.de/dfg_profil/aufgaben/index.html) [Stand: 27.08.2021].

## Förderberatung des Bundes 2021

Förderberatung des Bundes: *FAQ*, 2021. URL: [www.foerderinfo.bund.de/de/faq-1708.html](http://www.foerderinfo.bund.de/de/faq-1708.html) [Stand: 27.08.2021].

## Forschungsbeirat/acatech 2019a

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Themenfelder Industrie 4.0. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0*, 2019. URL: [www.acatech.de/publikation/themenfelder-industrie-4-0/](http://www.acatech.de/publikation/themenfelder-industrie-4-0/) [Stand: 27.08.2021].

## Forschungsbeirat/acatech 2019b

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Schneller zum Markterfolg. Memorandum des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 für ein agileres und flexibleres Innovationssystem in Deutschland*, 2019. URL: [www.acatech.de/publikation/memorandum-des-forschungsbeirats](http://www.acatech.de/publikation/memorandum-des-forschungsbeirats) [Stand: 27.08.2021].

## Forschungsbeirat/acatech 2021

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Kommuniqué. Spitzendialog des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 am 16. Juni 2021*. URL: [www.acatech.de/publikation/kommuniqu-zum-spitzendialog-des-forschungsbeirats](http://www.acatech.de/publikation/kommuniqu-zum-spitzendialog-des-forschungsbeirats) [Stand: 27.08.2021].

## Gausemeier et al. 2016

Gausemeier, J./Klocke, F./Dümler, C./Eckelt, D./Kabasci, P./Kohlhuber, M./Schön, N./Schröder, S./Wellensiek, M.: *Industrie 4.0. Internationaler Benchmark, Zukunftsoptionen und Handlungsempfehlungen für die Produktionsforschung*, 2016. URL: [www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-internationaler-benchmark-zukunftsoptionen-und-handlungsempfehlungen-fuer-die-produktionsforschung/](http://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-internationaler-benchmark-zukunftsoptionen-und-handlungsempfehlungen-fuer-die-produktionsforschung/) [Stand: 27.08.2021].

## Gausemeier et al. 2017

Gausemeier, J./Wieseke, J./Echterhoff, B./Isenberg, L./Koldewey, C./Mittag, T./Schneider, M.: *Mit Industrie 4.0 zum Unternehmenserfolg. Integrative Planung von Geschäftsmodellen und Wertschöpfungssystemen*, Heinz Nixdorf Institut, Paderborn, 2017.

**Henke/Kuhn 2017**

Henke, M./Kuhn, A. (Hrsg.): *Kollaboration als Schlüssel zum erfolgreichen Transfer von Innovationen: Analyse von Treibern und Hemmnissen in der Automobillogistik (acatech STUDIE)*, 2017. URL: [www.acatech.de/publikation/kollaboration-als-schluesel-zum-erfolgreichen-transfer-von-innovationen-analyse-von-treibern-und-hemmnissen-in-der-automobillogistik](http://www.acatech.de/publikation/kollaboration-als-schluesel-zum-erfolgreichen-transfer-von-innovationen-analyse-von-treibern-und-hemmnissen-in-der-automobillogistik) [Stand: 27.08.2021].

**Hülkamp/Koppel 2006**

Hülkamp, N./Koppel, O.: *Förderung unternehmerischer Innovation in Deutschland. Eckpunkte einer Neuausrichtung, RHI-Position, Nr. 2*, 2006. URL: [www.romanherzoginstitut.de/publikationen/detail/foerderung-unternehmerischer-innovation-in-deutschland.html](http://www.romanherzoginstitut.de/publikationen/detail/foerderung-unternehmerischer-innovation-in-deutschland.html) [Stand: 27.08.2021].

**IfM 2021**

Institut für Mittelstandsforschung Bonn: *Definitionen*, 2021. URL: [www.ifm-bonn.org/definition](http://www.ifm-bonn.org/definition) [Stand: 27.08.2021].

**IGF 2021**

IGF – Industrielle Gemeinschaftsforschung: *IGF im Profil*, 2021. URL: [www.aif.de/foerderangebote/igf-industrielle-gemeinschaftsforschung/igf-im-profil.html](http://www.aif.de/foerderangebote/igf-industrielle-gemeinschaftsforschung/igf-im-profil.html) [Stand: 27.08.2021].

**IHK Stuttgart 2015**

Industrie- und Handelskammer Stuttgart: *Forschung und Entwicklung: Warum es sich lohnt Forschungsk Kooperationen einzugehen*, 2015. URL: [www.stuttgart.ihk24.de/fuer-unternehmen/innovation/innovation-technologie/technologietransfer/gruende-forschungs-koooperation-664306](http://www.stuttgart.ihk24.de/fuer-unternehmen/innovation/innovation-technologie/technologietransfer/gruende-forschungs-koooperation-664306) [Stand: 27.08.2021].

**Ilg 2018**

Ilg, J.: *Der Mittelstand – Wer verbirgt sich hinter diesem Begriff?*, 2018. URL: [www.techtag.de/business/der-mittelstand-wer-verbirgt-sich-hinter-diesem-begriff/](http://www.techtag.de/business/der-mittelstand-wer-verbirgt-sich-hinter-diesem-begriff/) [Stand: 27.08.2021].

**Kinkel et al. 2020**

Kinkel, S./Beiner, S./Schäfer, A./Heimberger, H. Jäger, A.: *Wertschöpfungspotenziale 4.0. Bewertung der ungenutzten Wertschöpfungspotenziale der baden-württembergischen und deutschen Industrie in Zeiten der Digitalisierung der Wertschöpfung*, 2020. URL: [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-6216401.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-6216401.pdf) [Stand: 27.08.2021].

**NKS KMU o.J.**

Die Nationale Kontaktstelle KMU – Nationale Kontaktstelle zum EU-Programm Horizon 2020: *Verbundforschung – Chancen für KMU in Verbundprojekten*. URL: [www.nks-eic-accelerator.de/foerderung-verbundforschung.php](http://www.nks-eic-accelerator.de/foerderung-verbundforschung.php) [Stand: 04.03.2021].

# Mitglieder des Forschungsbeirats

## Vertreterinnen und Vertreter der Wissenschaft

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

## Vertreterinnen und Vertreter der Industrie

**Klaus Bauer**, TRUMPF Werkzeugmaschinen 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





