

STRATEGIEPAPIER



Strategiepapier des Forschungsbeirats
Industrie 4.0

Empfohlene Zitierweise:

Forschungsbeirat Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): Strategiepapier des Forschungsbeirats Industrie 4.0, 2026. DOI: https://doi.org/10.48669/fb40_2026-1

Impressum

Herausgeber

Forschungsbeirat Industrie 4.0
c/o acatech, Karolinenplatz, 80333 München

Sprecherteam

Klaus Bauer, TRUMPF Werkzeugmaschinen SE + Co. KG
Prof. Peter Liggesmeyer, Fraunhofer IESE/TU Kaiserslautern
Dr. Björn Sautter, Festo SE & Co. KG
Prof. Rainer Stark, TU Berlin

Text und Koordination

Dr. Mareike Berger, acatech
Simon Litsche, acatech
Dr. Joachim Sedlmeir, acatech
Dr. Steffen Steglich, acatech

Beteiligte Expertinnen und Experten

Prof. Reiner Anderl, TU Darmstadt
Prof. Julia Arlinghaus, Universität St. Gallen
Prof. Thomas Bauernhansl, Fraunhofer IPA/Uni Stuttgart
Prof. Angelika Bullinger-Hoffmann, TU Chemnitz
Dr. Jan-Henning Fabian, ABB Forschungszentrum
Prof. Hartmut Hirsch-Kreinsen, TU Dortmund
Prof. Katharina Hölzle, Fraunhofer IAO/Universität Stuttgart
Prof. Henning Kagermann, acatech Kuratorium
Prof. Martin Krzywdzinski, Weizenbaum-Institut/WZB Berlin
Prof. Gisela Lanza, wbk Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Martin Ruskowski, RPTU Kaiserslautern/DFKI/SmartFactory-KL
Dr. Harald Schöning, Software AG
Prof. Wolfgang Wahlster, DFKI
Prof. Matthias Weigold, TU Darmstadt

Redaktion und Lektorat

Lektorat Michael Danhardt

Gestaltung und Produktion

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

Bildnachweis

Titelbild: generiert mit midjourney

Stand

April 2026

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

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

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**, die in dieser Publikation – in der aktualisierten Version – vorgestellt werden:

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

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

Inhalt

Management Summary	3
1 Einleitung	5
1.1 Herausforderungen am Industriestandort Deutschland	5
1.2 Industrie 4.0 als zentraler Teil der Lösung	5
1.3 Status quo von Industrie 4.0	6
1.4 Struktur des Strategiepapiers	7
2 Das Industrie 4.0-Zielbild 2035 des Forschungsbeirats	9
3 Roadmaps des Forschungsbeirats Industrie 4.0	15
3.1 Übergeordnete Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0	15
3.2 Themenspezifische Roadmaps	15
3.2.1 Roadmap Geschäftsmodelle	16
3.2.2 Roadmap Engineering	19
3.2.3 Roadmap Zukunft der Arbeit	21
3.2.4 Roadmap Nachhaltigkeit	24
4 Mission und Wirkung des Forschungsbeirats Industrie 4.0	26
4.1 Der Forschungsbeirat Industrie 4.0: Führende Kompetenz aus Wissenschaft und Wirtschaft	27
4.2 Vision und strategische Ausrichtung	27
4.3 Operative Ausrichtung des Forschungsbeirats Industrie 4.0	28
4.4 Kommunikation und Transfer	30
5 Zusammenfassung und Ausblick	31
6 Literatur	33

Management Summary

Das Zukunftsprojekt **Industrie 4.0** hat auch rund 15 Jahre nach seiner Initiierung nichts an Aktualität und Dringlichkeit eingebüßt. Die industrielle Wertschöpfung bildet weiterhin die Grundlage der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit Deutschlands und Europas. Jedoch verschärft sich der internationale **Wettbewerb**: Kostengünstigere Produktionsbedingungen, reduzierte regulatorische Hürden sowie ein hohes Maß an Innovationsdynamik anderer Länder verstärken den Druck auf den Industriestandort Deutschland. Hinzu kommen geopolitische Herausforderungen wie steigende Handelsbarrieren und Zölle oder Kriege wie der Konflikt in der Ukraine, die die Stabilität von Innovations-, Produktions-, Liefer- und Wertschöpfungsketten erheblich beeinträchtigt haben und auch weiterhin belasten. In diesem Umfeld gewinnen **Resilienz** und **Souveränität** zunehmend an Bedeutung. Parallel dazu steigt die Dringlichkeit, Maßnahmen zur aktiven Bewältigung des Klimawandels umzusetzen und damit **Nachhaltigkeit** systematisch in die industrielle Transformation zu integrieren. Vor diesem Hintergrund entwirft das Strategiepapier ein **Zielbild für Industrie 4.0 im Jahr 2035**:

Deutschland verfügt demnach weiterhin über einen starken, hochinnovativen industriellen Kern, der mit Industrie 4.0 die fortlaufende Erneuerung der Volkswirtschaft und die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz, Souveränität und des Wohlstands ermöglicht. Im Jahr 2035 werden Unternehmen in dynamischen und digitalen Ökosystemen kooperieren, die den souveränen und interoperablen Austausch von Daten über Unternehmensgrenzen hinaus erlauben. Auf Basis dieser Daten und ihrer KI-gestützten Analyse bieten sie Smart Services mit individuellem und überlegenem Kundennutzen an. Das Engineering flexibler und adaptiver Systeme bildet die Grundlage für Produktionsanlagen, die eigenständig Prozesse bewerten sowie Prognosen erstellen und optimieren können. In modularen, dezentral organisierten Produktionsstätten lassen sich so innerhalb kürzester Zeit individuelle, qualitativ hochwertige Produkte realisieren.

Der Einsatz von Industrie 4.0-Konzepten eröffnet in zahlreichen Industriezweigen entscheidende Wettbewerbsvorteile – nicht nur im Maschinen- und Anlagenbau, in der Automatisierungstechnik, in der Material- und Verfahrenstechnik sowie in der Automobilindustrie, sondern unter anderem auch in der Gesundheits- und Pharmabranche, der Sicherheits- und Verteidigungsindustrie sowie der Luft- und Raumfahrt. Grundlage hierfür bildet der Einsatz zentraler Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz (KI), Quantentechnologie, Mikroelektronik und Biotechnologie (vergleiche Forschungsfelder und Schlüsseltechnologien der Hightech Agenda der Bundesregierung¹). Deutschland nutzt dabei seine industrielle Stärke, um eine Vorreiterrolle in Nachhaltigkeit einzunehmen und als

führender Anbieter und Fabrikaurüster der Kreislaufwirtschaft zu agieren. Dabei steht der Mensch im Mittelpunkt: Arbeits- und Organisationssysteme schaffen individuell optimierte Arbeitsplätze, unterstützt durch personalisierte Sicherheitssensorik, effiziente Mensch-Maschine-Interaktionen und integrierte Weiterqualifizierung. So werden Motivation, Wertschätzung und Innovationskraft gefördert.

Dieses Zielbild zeigt bislang ungenutzte Potenziale digital vernetzter industrieller Systeme auf und verdeutlicht, wie Industrie 4.0 dazu beitragen kann, gleichzeitig Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz, Souveränität und Nachhaltigkeit zu stärken.

Zwar wurden bereits erhebliche Fortschritte bei der Implementierung der digitalen industriellen Wertschöpfung erzielt, doch die Erreichung des beschriebenen Zielbilds und dessen flächendeckende Umsetzung erfordern weitere gezielte Anstrengungen – insbesondere in den Bereichen der Forschung, Entwicklung und des Transfers. Industrie 4.0 als zentrales industrielles Leitbild ist somit mehr als ein reines Umsetzungsthema: Einerseits entstehen, unter anderem durch neue technologische Entwicklungen, zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsbedarfe, andererseits ergeben sich auch in der konkreten Umsetzung Fragestellungen, die wissenschaftlich begleitet werden müssen.

Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 nimmt hier eine entscheidende Stellung ein: Als **strategisches, unabhängiges und interdisziplinäres Forum** fungiert er an der Schnittstelle von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Besetzt mit renommierten Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Fachbereichen und Disziplinen identifiziert er als **Sensor frühzeitig Entwicklungstrends**, konkretisiert **Forschungsbedarfe** und gibt **Impulse für zukünftige Innovationsfelder**. Durch die Bündelung wissenschaftlicher Exzellenz und industrieller Innovationskraft macht er disruptive Potenziale sichtbar und bringt unterschiedliche Perspektiven zusammen. Dabei kooperiert er eng mit weiteren Initiativen wie der Plattform Industrie 4.0 sowie der Plattform Lernende Systeme und agiert somit als eine wichtige Vernetzungsinstanz im Innovationsystem.

Der Forschungsbeirat adressiert dabei ein breites Spektrum an Zielgruppen: von Forschungseinrichtungen und Unternehmen über politische Entscheidungsträger und Ministerien bis hin zu Verbänden und weiteren Stakeholdern im Industrie 4.0-Ökosystem. Politischen Entscheidungsträgern und Ministerien liefert der Beirat evidenzbasierte Handlungsoptionen für politische Maßnahmen, industriepolitische Förderprogramme und die strategische Ausrichtung von Forschungsaktivitäten.

1 Vgl. BMFTR 2025.

Mit den erarbeiteten Roadmaps in den Bereichen Geschäftsmodelle, Engineering, Zukunft der Arbeit und Nachhaltigkeit, die konkrete Themenblöcke beziehungsweise Handlungsfelder mit noch offenem Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufzeigen, bietet der Forschungsbeirat eine strategische Orientierungsgrundlage. Der Forschungsbeirat beabsichtigt, die vorliegenden Roadmaps regelmäßig mit den aktuellen Entwicklungen abzugleichen beziehungsweise zu reflektieren und gemeinsam mit weiteren, primär

an der praktischen Anwendung orientierten Initiativen – etwa der Plattform Industrie 4.0 – die Umsetzung der erforderlichen Entwicklungsschritte zu monitoren und bei Bedarf Empfehlungen für eine Anpassung zu geben. So kann die digitale Transformation der industriellen Wertschöpfung in den kommenden Jahren erfolgreich vorangetrieben und sowohl die industrielle Basis als auch der gesellschaftliche Wohlstand nachhaltig gesichert werden.

1 Einleitung

Der Industriestandort Deutschland steht derzeit vor vielfältigen Herausforderungen. Industrie 4.0 bietet dafür als zentrales industrielles Leitbild weitreichende Lösungsansätze. Der aktuelle Stand der Umsetzung zeigt neben den erreichten Fortschritten jedoch auch ein erhebliches Maß an ungenutztem Potenzial. Die in dieser Einleitung beschriebenen Herausforderungen, die anschließende Darlegung der Bedeutung von Industrie 4.0 sowie die Skizzierung des Status quo in der Implementierung dienen als Ausgangsbasis für ein Industrie 4.0-Zielbild des Forschungsbeirats für das Jahr 2035, das in Kapitel 2 beschrieben wird.

1.1 Herausforderungen am Industriestandort Deutschland

Die industrielle Wertschöpfung in Deutschland befindet sich bereits seit einiger Zeit in einer schwierigen Lage – eine Entwicklung, die sich in den vergangenen Jahren noch deutlich verschärft hat. Unerwartete geopolitische Ereignisse, die Krise in den transatlantischen Beziehungen, Verschiebungen der Verhältnisse in Bezug auf die Marktmacht und weitere global-systemische Unsicherheiten, insbesondere der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine sowie die Corona-Pandemie haben zu erheblichen Störungen globaler Innovations-, Liefer- und Wertschöpfungsketten sowie zu drastisch steigenden Energie- und Rohstoffpreisen geführt. Besonders energieintensive Branchen wie die Chemie- und Stahlindustrie geraten dadurch zunehmend unter Druck. Diese akuten Herausforderungen verschärfen jedoch lediglich tiefgreifende, bereits länger bestehende strukturelle Probleme: Der schleichende Abbau industrieller Kapazitäten in Deutschland infolge des zunehmenden internationalen Wettbewerbs lässt den technologischen Vorsprung in der industriellen Produktion schrumpfen und führt langfristig wiederum zur Verlagerung von Wertschöpfung ins Ausland. Darüber hinaus schreitet die Digitalisierung in Deutschland nur zögerlich voran, was zum Beispiel neben einem schleppenden Infrastrukturausbau zu Rückständen in der Cloud-Adoption und Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) führt. Verstärkt wird die Problemlage durch den demografischen Wandel und den zunehmenden Fachkräftemangel in innovationskritischen Bereichen, die es erschweren, vorhandene industrielle Potenziale in Deutschland voll auszuschöpfen. Hinzu kommt die Klimakrise, die nicht nur umfassende technologische und strukturelle Transformationen notwendig macht, sondern auch zu häufigeren extremen Wetterereignissen, Wasserknappheit und weiteren wirtschaftlichen Belastungen führen wird – Herausforderungen, auf die sich die Industrie bereits heute strategisch vorbereiten muss.

Angesichts der zentralen Bedeutung der industriellen Wertschöpfung für Wachstum, Wohlstand und Beschäftigung in Deutschland

und somit insgesamt für die Wettbewerbsfähigkeit und Prosperität des (Industrie-)Standorts sind diese Entwicklungen besonders besorgniserregend. Rund 20 Prozent des Bruttoinlandsprodukts entfallen direkt auf das produzierende Gewerbe – doch der Einfluss der Industrie reicht weit darüber hinaus.² Auch der Dienstleistungssektor – von Handel und Logistik bis hin zu unternehmensnahen Bereichen wie IT, Beratung oder Finanzwesen – ist eng mit der Industrie verknüpft. Die Produktion schafft Nachfrage nach Dienstleistungen. Somit hängen viele Arbeitsplätze im tertiären Sektor direkt oder indirekt von einem starken industriellen Kern ab. Die Industrie bildet daher nicht nur das Rückgrat der deutschen Wirtschaft, sondern auch eine tragende Säule für Wertschöpfung und Beschäftigung entlang weiter Teile der Dienstleistungskette.

Gleichzeitig ist industrielle Wertschöpfung die Grundlage für technologische bzw. strategische Souveränität, denn sie bewahrt Schlüsselkompetenzen und Produktionskapazitäten im eigenen Land – und reduziert damit kritische Abhängigkeiten von Drittstaaten. In einer zunehmend instabilen geopolitischen Weltlage stärkt industrielle Eigenständigkeit die Handlungsfähigkeit und Resilienz Deutschlands.

Deutschland ist in zahlreichen industriellen Schlüsselbranchen – etwa im Maschinenbau, in der Automobilindustrie sowie in der Chemie- und Medizintechnik – mit international führenden Unternehmen und hoher technologischer sowie domänenspezifischer Kompetenz stark vertreten. Der internationale Wettbewerb nimmt jedoch kontinuierlich zu. Insbesondere in Bereichen, in denen Deutschland traditionell eine Führungsrolle innehatte – etwa im Maschinenbau und der industriellen Fertigung – holen Länder wie China und die USA mit hoher Dynamik auf oder haben ehemalige Weltmarktführer bereits überholt. Gleichzeitig gewinnt der Aufbau neuer Technologiefelder wie Quantencomputing, Biotechnologie und personalisierte Medizin an strategischer Bedeutung. Diese Sektoren zeichnen sich durch komplexe, hochinnovative Produkte aus und könnten entscheidend für die zukünftige industrielle Wertschöpfung sein. Um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie nachhaltig zu sichern und weiterzuentwickeln gilt es daher, die bestehende gute Ausgangslage entschlossen zu nutzen, gezielt in zukunftsweisende Technologien zu investieren und deren bedarfsgerechte Verwendung und Integration in die bestehenden Prozesse sicherzustellen.

1.2 Industrie 4.0 als zentraler Teil der Lösung

Industrie 4.0 und die damit einhergehende datenbasierte, vernetzte und nachhaltige Wertschöpfung im Zuge der Digitalisierung des Industriesektors spielt eine zentrale Rolle, die genannten aktuellen

2 Vgl. Statista 2025a.

und künftigen Herausforderungen für die deutsche Wirtschaft zu bewältigen und zukunftsfähig zu bleiben. Industrie 4.0 steht dabei als industrielles Leitbild, das weiterhin von höchster Relevanz ist und weltweit verfolgt wird, für mehr als technische Effizienzgewinne durch die digitale Vernetzung und Automatisierung von Maschinen, Anlagen und Produkten – sie markiert einen tiefgreifenden Strukturwandel, der die Wirtschaft und Arbeitswelt langfristig verändern wird. Die Themen Nachhaltigkeit, Resilienz, Interoperabilität, technologische bzw. strategische Souveränität und vor allem auch die zentrale Rolle des Menschen rücken dabei immer stärker in den Fokus.

Im internationalen Wettbewerb mit innovativen Wettstreitern, insbesondere aus den USA und aus China, ermöglicht Digitalisierung und die damit einhergehende Integration von Sensorik und Aktorik in Produkten und Produktionssystemen sowie deren Vernetzung die Möglichkeit, über die Nutzung von Daten und darauf basierenden KI-Lösungen neue, disruptive Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln. Darauf aufbauend lassen sich neue, servicebasierte Geschäftsmodelle einführen, die nicht nur Optimierungspotenziale mit sich bringen, sondern neue Differenzierungschancen am Markt bieten.

In einer Zeit, die von geopolitischen Krisen und volatilen Lieferketten geprägt ist, schafft Industrie 4.0 konkrete Voraussetzungen für mehr Resilienz, Flexibilität und Innovationsfähigkeit. Durch eine vernetzte Produktion können Unternehmen schneller auf externe Schocks reagieren und ihre Prozesse an veränderte Bedingungen anpassen.

Gleichzeitig eröffnet Industrie 4.0 neue Ansätze zur Bewältigung des Fachkräftemangels. Digitale Assistenzsysteme, Automatisierung und eine auf KI-gestützte Planung ermöglichen eine effizientere Nutzung der vorhandenen Arbeitskräfte, verbessern Ergonomie und Sicherheit und machen industrielle Arbeitsplätze attraktiver, indem sie die Beschäftigten sowohl auf dem Shopfloor als auch in vor- und nachgelagerten Prozessen bestmöglich unterstützen. Auch betriebliche Weiterbildung bzw. Kompetenzentwicklung und Gesundheitsmanagement lassen sich gezielt in digital unterstützte Arbeitsprozesse integrieren.

Ein weiteres zentrales Potenzial liegt im Bereich der ökologischen, nachhaltigen Transformation und Realisierung der Kreislaufwirtschaft: Industrie 4.0-Lösungen leisten einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung von Energieverbrauch, Materialeinsatz und CO₂-Emissionen – ohne die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit zu gefährden. Vielmehr können auch in diesem Bereich Differenzierungspotenziale gehoben werden. Damit ist Industrie 4.0 als Leitbild ein strategisches Instrument, um ökonomische, ökologische und auch soziale Ziele miteinander zu verbinden beziehungsweise zu integrieren.

1.3 Status quo von Industrie 4.0

Seit der erstmaligen Vorstellung von Industrie 4.0 gegenüber einer breiten Öffentlichkeit während der Hannover Messe im Jahr 2011 und dem Start des darauf ausgerichteten Zukunftsprojekts³ wurden in enger Zusammenarbeit von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft bereits weitreichende Erfolge erzielt. Über die vielfältigen Forschungsaktivitäten seitens der Wissenschaft hinaus haben zahlreiche Unternehmen durch die fortschreitende Digitalisierung in den vergangenen Jahren wichtige Grundlagen für Industrie 4.0 geschaffen und unterschiedliche Aspekte implementiert. Beispielsweise erreichen einige Unternehmen deutlich kürzere Durchlaufzeiten und geringere Stillstände durch Echtzeit-Überwachung und vorausschauende Wartung ihrer Anlagen. Andere Unternehmen nutzen wiederum Digitale Zwillinge, intelligente Sensorik und KI-gestützte Steuerungen, um hochflexible und selbstoptimierende Produktionsprozesse zu realisieren.^{4, 5} Aber auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU), denen eine vollumfängliche Umsetzung von Industrie 4.0 aufgrund knapper Ressourcen häufig nicht möglich ist, können mit der Einführung einzelner Industrie 4.0-Lösungen punkten: Beispielsweise kann die Einführung eines einfachen Ampelsystems, das die Nutzung von Ökostrom in der Produktion sichtbar macht, den Anteil an grünem Strom signifikant steigern und so Alleinstellungsmerkmale am Markt schaffen.⁶

Trotz erster Fortschritte und einzelner Leuchtturmprojekte ist Industrie 4.0 in Deutschland bislang jedoch noch nicht flächendeckend umgesetzt⁷ und die Vorreiterrolle Deutschlands in der Forschung konnte noch nicht in die praktische Anwendung überführt werden. Vor allem in KMU bleiben die disruptiven Potenziale von Industrie 4.0 häufig ungenutzt,^{8, 9} da hohe Investitionskosten und Prozessveränderungen eine zentrale Hürde darstellen. Während die industrielle Fertigung in der Vergangenheit stabile Auftragslagen sicherte, wächst derzeit der Druck auf viele Unternehmen, ihr Marktangebot angesichts zunehmender internationaler Konkurrenz und systemischer Verschiebungen strategisch neu auszurichten. Die Entwicklung komplexer Produkte und Systeme erfordert auch kollaborative bzw. kooperative Ansätze sowie immer stärker neue Herangehensweisen und Technologien im Engineering. Gleichzeitig bremsen eine anhaltende wirtschaftliche Schwächephase, steigender Kostendruck und geopolitische Unsicherheiten dringend benötigte Investitionen in Digitalisierung und Innovation. Oftmals fehlt die Verwendungsfähigkeit technologischer Innovationen – das heißt die Fähigkeit, Technologien in Wertschöpfung, Organisation und Kompetenzen zu überführen und auf dieser Basis tragfähige Geschäftsmodelle zu konzipieren und zu implementieren. Besonders KMU, die einen wesentlichen Beitrag zur industriellen Wertschöpfung in Deutschland leisten, zögern angesichts unsicherer Ertragsaussichten und hoher Einstiegskosten bei notwendigen Aktivitäten im Kontext von Industrie 4.0. Doch um im globalen Wettbewerb

3 Vgl. Kagermann et al. 2013.

4 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2025.

5 Vgl. Raab 2025.

6 Vgl. Link 2024.

7 Vgl. Raab 2025.

8 Vgl. Bitkom e.V. 2022.

9 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2022a.

bestehen zu können, sind kontinuierliche Innovationen und technologische Weiterentwicklungen unverzichtbar.

Angesichts der tiefgreifenden Umbrüche – von geopolitischen Spannungen über technologische Disruptionen bis hin zu strukturellen Herausforderungen wie dem Fachkräftemangel und der Dekarbonisierung – steht die deutsche Industrie an einem Wendepunkt. Industrie 4.0 ist ein zentraler Hebel, um diesen Wandel aktiv zu gestalten, Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und neue Zukunftspotenziale zu erschließen.¹⁰

1.4 Struktur des Strategiepapiers

Damit die beschriebene Transformation wirkungsvoll und koordiniert gelingt, ist ein klares **Zielbild** von essenzieller Bedeutung. Das Zielbild 2035 des Forschungsbeirats Industrie 4.0, im folgenden **Kapitel 2**, beschreibt die **Vision des Forschungsbeirats Industrie 4.0** für die Industrie von morgen (siehe Abbildung 1 für Struktur des Strategiepapiers). Das übergeordnete Ziel des Forschungsbeirats ist es, die hier beschriebenen Potenziale von Industrie 4.0 zu erschließen und über die Forschung und Entwicklung in die breite

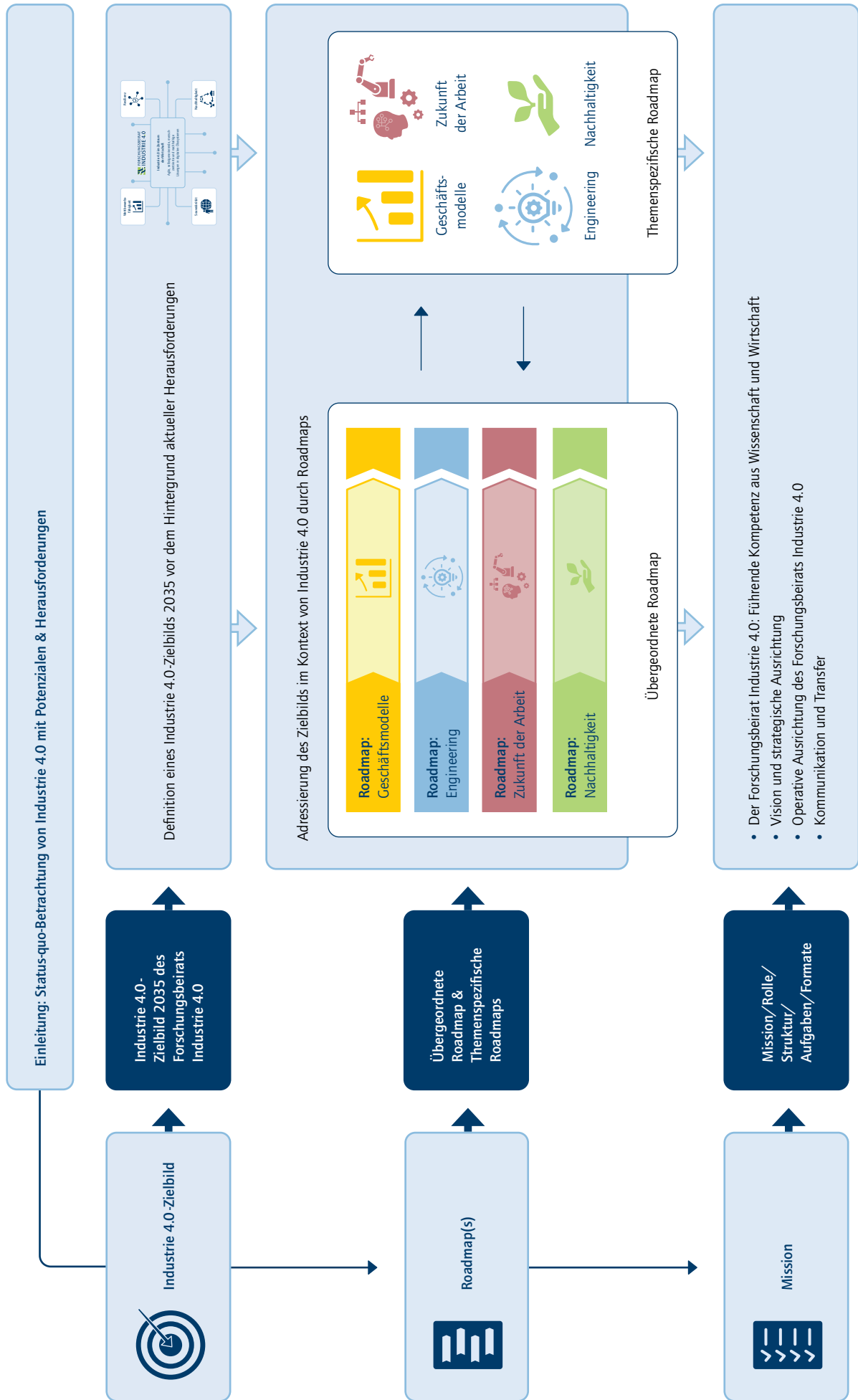
Anwendung zu bringen, denn dies ist der Schlüssel zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit, Souveränität, Resilienz und Nachhaltigkeit der deutschen Industrie.

Das sich daran anschließende **Kapitel 3** beschreibt die vom Forschungsbeirat konzipierten **Roadmaps**, die aufzeigen, welche Themenblöcke auf dem Weg zur Erreichung des Zielbilds noch erforscht und entwickelt werden müssen. Die Roadmaps wurden von einer eigens eingesetzten Strategiekommision, bestehend aus Expertinnen und Experten des Forschungsbeirats, entwickelt. Sie tragen dazu bei, die strategische Zielsetzung des Forschungsbeirats zu erreichen: Als strategisches, unabhängiges und interdisziplinäres Forum mit der umfassenden Kompetenz aus Wissenschaft und Industrie will der Forschungsbeirat als ein Sensor von Entwicklungsströmungen und Impulsgeber für künftige Forschungsthemen agieren.

In **Kapitel 4** werden die weitreichenden **Aufgaben und Ziele des Forschungsbeirats** über das Selbstverständnis und die Wirkungsweise in Form seiner **Mission** beschrieben. Dabei werden auch die Zusammenarbeit mit anderen Initiativen sowie die Beiträge für Unternehmen, Politik, Gesellschaft und Wissenschaft aufgezeigt.

10 Vgl. aus Sicht der Industrie Otto/Hölzle 2025.

Abbildung 1: Übersicht über Struktur des Strategiepapiers



Quelle: eigene Darstellung

2 Das Industrie 4.0-Zielbild 2035 des Forschungsbeirats

Das vorliegende Zielbild 2035 wurde von einer eigens eingesetzten Strategiekommission mit Mitgliedern des Forschungsbeirats erarbeitet und im weiteren Verfahren mit dem gesamten Forschungsbeirat Industrie 4.0 abgestimmt. Dazu haben Expertengruppen des Forschungsbeirats themenspezifische Roadmaps entwickelt (siehe Kapitel 3.2), deren langfristig anvisierte Ergebnisse die Grundlage für das Zielbild bilden. Das Zielbild 2035 des Forschungsbeirats stellt eine Zukunftsvorstellung dar, wie Industrie 4.0 im Zentrum der Wirtschaft perspektivisch aussehen kann. Außerdem soll es Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik (und somit insbesondere auch den Ministerien) veranschaulichen, welche Möglichkeiten bzw. Potenziale sich im Kontext von Industrie 4.0 langfristig ergeben. Der Forschungsbeirat hat zum Ziel, über die Identifikation und Adressierung der relevanten Forschungs- und Entwicklungsthemen diese **Potenziale von Industrie 4.0** als Schlüssel zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit, Souveränität, Resilienz und Nachhaltigkeit der deutschen Industrie zu erschließen. Dadurch soll auf lange Sicht auch ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, Industrie 4.0 in die breite Anwendung zu bringen (vergleiche Kapitel 4 zur Mission des Forschungsbeirats).

Wie in der Einleitung beschrieben, ist die deutsche Industrie mit vielfältigen Herausforderungen konfrontiert. Dazu zählen unter anderem die hohen Energiepreise, störungsanfällige Lieferketten, ein massiver Fachkräftemangel und ein stetig wachsender internationaler Wettbewerbsdruck. Dies bringt wiederum tiefgreifende Transformationsanforderungen mit sich. Diese Gemengelage stellt sowohl Unternehmen als auch Wissenschaft und Politik gleichermaßen auf eine harte Probe. Gleichzeitig bietet Industrie 4.0 weitreichende Potenziale, diese Hürden für die industrielle Wertschöpfung in Deutschland zu überwinden. Die sich ergebenden Potenziale gilt es nun gezielt zu identifizieren und zu heben. Hierfür ist ein klares Zielbild notwendig, das Zuversicht schafft und Orientierung gibt.

In der Zukunftsvorstellung des Forschungsbeirats als Industrie 4.0-Zielbild in den nächsten 10 Jahren zeigt sich die deutsche Industrie im Jahr 2035 in einem neuen Licht: Deutschland behauptet sich im intensiven internationalen Wettbewerb und verfügt über einen starken und hochinnovativen industriellen Kern. Dieser ist gleichzeitig das Fundament für eine fortlaufende Erneuerung der Volkswirtschaft und somit der Sicherung des Wohlstands. Industrie 4.0 und die damit einhergehende vernetzte Wertschöpfung steht dabei im Zentrum eines grundlegenden Innovations- und Transformationsprozesses des gesamtgesellschaftlichen Wirtschaftens. Als ein global führender Standort für die datengetriebene Industrie, für innovative Produktionstechnologien und Produkte beziehungsweise Systeme sowie von komplementären, datenbasierten (Dienst-

Leistungen ist „Made in Germany“ weltweit gefragt und wird weiterhin als Qualitätsversprechen wahrgenommen. Die Stärke der hiesigen Unternehmen besteht insbesondere in der Kompetenz beziehungsweise in dem vorhandenen Domänenwissen, in einem umfassenden Kundenverständnis sowie dem weitreichenden Angebot hochkomplexer, qualitativ hochwertiger und kundenindividueller Marktleistungen. Dabei kooperieren große Unternehmen ebenso wie KMU und Start-ups in souveränen (Daten-)Ökosystemen, die einen sicheren, vertrauenswürdigen und standardisierten Datenaustausch ermöglichen und so die Potenziale vernetzter Daten für die Wertschöpfung erschließen – Potenziale beziehungsweise Chancen, die unter anderem durch den Einsatz Künstlicher Intelligenz etwa in Form von automatisierter Analyse, präziser Prognosefähigkeit und intelligenter Prozessoptimierung weiter an Relevanz und Wirkung gewinnen.

Diese Zukunftsvision wirkt angesichts des heutigen Status quo durchaus ambitioniert – doch sie macht ebenso deutlich, dass gerade die aktuellen Herausforderungen auch den Ausgangspunkt für eine umfassende Erneuerung bilden können. Dieses positive Mindset gilt es zu etablieren. Die Chancen, die sich aus Industrie 4.0 ergeben, bilden dabei das Fundament für diese positive Entwicklung. Dabei lassen sich vier übergeordnete Ziele von Industrie 4.0 ableiten: die Sicherung und Stärkung der globalen **Wettbewerbsfähigkeit**, eine höhere **Resilienz**, mehr **Nachhaltigkeit** sowie eine gesteigerte **Souveränität**. Im Folgenden wird erläutert, wie Industrie 4.0 zu diesen Zielen beiträgt. Zudem werden mögliche Stellschrauben und Aspekte aufgezeigt, die für die Erreichung des angestrebten Zielbilds von besonderer Bedeutung sind.

Wettbewerbsfähigkeit

Ein zentrales Ziel von Industrie 4.0 ist die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Unternehmen und somit auch in makroökonomischer Sicht des gesamten Innovations- und Industriestandorts Deutschland. Industrie 4.0 trägt hierzu auf vielfältige Weise bei.

Eines der frühen Versprechen von Industrie 4.0 war es von Beginn an, neben der Hebung von Differenzierungspotenzialen durch Automatisierung und vernetzte Systeme die Produktionskosten zu senken und die Effizienz zu steigern. Die Produktivität ist ein entscheidender Faktor im internationalen Wettbewerb. Die in der Erstellung von Produkten und Dienstleistungen eingesetzten Ressourcen sollen mit Industrie 4.0-Lösungen in ein besseres Verhältnis zum erbrachten Output gestellt werden. Diese Versprechen haben sich bisher nur teilweise erfüllt, da die Produktivität einzelner Unternehmen, aber auch des gesamten Produktionsstandorts Deutschland

nicht im erwarteten Maß gestiegen ist und teils stagniert.¹¹ Dies hat in Unternehmen teilweise auch zu Ernüchterung und Zweifeln an den Versprechen von Industrie 4.0 geführt. Die rasanten Fortschritte in der Entwicklung und in der Implementierbarkeit von **Künstlicher Intelligenz als zentrale Industrie 4.0-Enablertechnologie** könnten dazu beitragen, diese Versprechen dennoch einzulösen: KI-Assistenten unterstützen beispielsweise bereits jetzt in zahlreichen Bereichen der modernen Fabrik, etwa dem Engineering oder der Mensch-Maschinen-Interaktion. Perspektivisch werden derartige Assistenzsysteme zunehmend autonom agieren und fundierte Entscheidungsgrundlagen erstellen können. Dabei werden **agentenbasierte KI-Systeme** mit **Embodied AI** zentral sein. In diesem Zusammenhang gewinnen **agentenorientierte Software- und Plattformarchitekturen** an Bedeutung – weg von monolithischen Ansätzen hin zu skalierbaren, agentenorientierten Architekturen, die Sensorik, Aktorik und Entscheidungslogik nahtlos integrieren.

Daten sind die Grundlage für die erfolgreiche Nutzung von KI im industriellen Umfeld. Der domänenspezifische Datenschatz der deutschen Industrie kann hierfür einen Wettbewerbsvorteil darstellen, wenn er richtig genutzt wird. Essenziell hierfür ist die initiale Definition der Daten an ihrer Entstehungsquelle sowie deren Übertragung über standardisierte Schnittstellen. Um die somit automatisiert erhobenen, domänenspezifischen Daten bereitzustellen und unternehmensübergreifend teilen zu können, braucht es Datenräume. Die kürzlich vorgelegte Hightech Agenda der Bundesregierung¹² hat KI als eine der Schlüsseltechnologien identifiziert. Bei der Umsetzung dieser Strategie gilt es insbesondere auch domänenspezifische Anwendungen im Produktionsumfeld, wie beispielsweise Physical AI, zu berücksichtigen. Die Chancen und Forschungs- und Entwicklungsbedarfe von KI im industriellen Umfeld werden in den spezifischen Roadmaps in Kapitel 3.2 detaillierter betrachtet.

Durch den verstärkten Einsatz von Industrie 4.0-Lösungen kann Deutschland seine Rolle als **Technologieführer und Leitanbieter für komplexe Produktionssysteme und im Maschinenbau** weiter festigen. Industrie 4.0 ist dabei nicht nur in den Kernbranchen wie Automotive und dem Maschinen- und Anlagenbau entscheidend, sondern kann auch **in weiteren Industriezweigen**, wie beispielsweise der innovativen Lebensmittelproduktion, der Pharmabranche, der Medizintechnik, der Rechenzentrumsbranche, dem Quantencomputing oder dem Recycling und der Rückgewinnung von Materialien entscheidende Wettbewerbsvorteile bringen. Denn insbesondere die **Technologiekonvergenz** von Digitalisierung mit Schlüsseltechnologien – wie Künstliche Intelligenz, Biotechnologie, Mikroelektronik oder Quantentechnologie, allesamt Bestandteile der Hightech Agenda der Bundesregierung¹³ – eröffnet **Potenziale für disruptive Innovationen mit weitreichenden Differenzierungspotenzialen**, die erst durch den Einsatz von Industrie 4.0-Lösungen

realisierbar werden. Beispielsweise können Bioreaktoren, die ressourcenschonendere biotechnologische Prozesse ermöglichen, mit Sensorik, Digitalen Zwillingen und KI kombiniert werden, wodurch sich eine höhere Produktionsqualität, beschleunigte Skalierungsprozesse und völlig neue Formen der Wertschöpfung erschließen lassen. Ein weiteres Beispiel ist die Einführung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft, die nur mittels hochflexibler, automatisierter Produktionsprozesse und digitaler Abbilder der Produkte und Produktionsschritte realisierbar ist (mehr dazu unter „Nachhaltigkeit“).

Um sich im globalen Wettbewerb durchzusetzen, bedarf es insbesondere auch neuer erfolgreicher **Geschäftsmodelle**, die in der spezifischen Roadmap „Geschäftsmodelle“ in Kapitel 3.2.1 beschrieben werden. Auf Basis einer umfassenden Erfassung, Bereitstellung, Speicherung und Analyse von teils heterogenen Daten und der Auswertung durch KI können Unternehmen ein Smart-Service-basiertes Leistungsangebot mit einem überlegenen und individuell zugeschnittenen Kundennutzen realisieren. Dazu ist es notwendig, Kooperationen und Kollaborationen mit Kunden und weiteren Akteuren über die Unternehmensgrenzen hinaus einzugehen, um Smart Services zu entwickeln und bereitzustellen. Dabei sind sie souverän im Austausch von Daten und in der Zusammenarbeit in dynamischen, digitalen Wertschöpfungsnetzwerken.

Industrie 4.0-Technologien und -Anwendungen bieten weitreichende Potenziale, um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu steigern. Dabei sollte der Fokus künftig noch stärker auf konkrete Business Cases als auf generischen, perspektivischen Use Cases liegen: Statt die Technologien isoliert einzuführen, um deren Nutzen zu demonstrieren, empfiehlt es sich, zunächst die angestrebten Ziele und Ergebnisse zu definieren und darauf aufbauend die Industrie 4.0-Lösungen beziehungsweise -Technologien, wie einen Baukasten, gezielt auszuwählen, zu kombinieren und bei Bedarf weiterzuentwickeln. Die Maßnahmen sollten ganzheitlich und ohne Schnittstellenverluste in Unternehmen eingeführt und umgesetzt werden. In der kommenden Entwicklungsphase von Industrie 4.0 gilt es zudem, die Industrie 4.0-Technologien systemisch und end-to-end zu verknüpfen, Synergien zu nutzen und sie in die Wertschöpfungsarchitektur zu integrieren, um dort die Transformation mit Fokus auf die größtmögliche Wirkung erfolgreich zu gestalten. Die damit verbundenen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe werden in Kapitel 3.2 in den spezifischen Roadmaps weiter ausgeführt.

Resilienz

Resilienz bezeichnet die Fähigkeit, sich auf negative Ereignisse (Schocks) vorzubereiten, diese zu antizipieren, zu bewältigen und Systeme auf Basis entsprechender Erfahrungen anzupassen und zu verbessern.¹⁴ Jüngste Ereignisse, wie die Corona-Pandemie oder

11 Vgl. Statista 2025b.

12 Vgl. BMFTR 2025.

13 Vgl. BMFTR 2025.

14 Vgl. Kagermann et al. 2021a im Hinblick auf allgemeine Aspekte zu Resilienz.

steigende Handelsbarrieren und Zölle, haben gezeigt, dass die deutsche Industrie auf Störungen in Liefer-, Wertschöpfungs- und Innovationsketten empfindlich reagiert. Industrie 4.0 bietet einen entscheidenden Hebel, um resiliente Systeme zu schaffen, die flexibel auf solche Störungen reagieren können und die sich mithilfe systematischer Fehleranalysen und automatisierter Feedbackprozesse in der strategischen Planung weiter anpassen.

Der Wandel und der Aufbruch von traditionellen, teils rigiden linearen Wertschöpfungsketten hin zu **dynamischen digitalen Wertschöpfungsnetzwerken** (siehe dazu auch die Themenblöcke zur Wertschöpfungsarchitektur in der Roadmap für Geschäftsmodelle, Kapitel 3.2.1) fördert eine engere Vernetzung von vielfältigen Partnern innerhalb und über Unternehmensgrenzen hinaus, ermöglicht einen kontinuierlichen Daten- beziehungsweise Informationsaustausch zur kooperativen beziehungsweise kollaborativen Leistungserstellung und steigert insgesamt die **Flexibilität und Agilität** der beteiligten Akteure. **Echtzeitdaten** aus Sensorik und IoT-Systemen, Digitale Zwillinge sowie KI-gestützte Analysen schaffen Transparenz, beispielsweise über Lieferströme, Produktionskapazitäten und mögliche Risiken. Auf dieser Basis lassen sich Störungen frühzeitig erkennen, Szenarien simulieren, alternative Handlungsoptionen entwickeln und Gegenmaßnahmen schneller einleiten. Dadurch wird die Handlungsfähigkeit im Krisenfall gestärkt und die Abhängigkeit von einzelnen Akteuren reduziert.

Automatisierte Systeme in Produktion und Logistik erhöhen die Resilienz und Robustheit zusätzlich. Das **Engineering flexibler und adaptiver Systeme** bildet dabei die Grundlage, um Produktionsanlagen, die eigenständig bewerten, Prognosen erstellen und Prozesse optimieren können, zu entwickeln. Beispiele sind KI-gestützte Wartungskonzepte oder Produktionssteuerungen, die sich automatisch an veränderte Nachfrage oder Materialengpässe anpassen. Perspektivisch sollen sogenannte „Self-X-Fähigkeiten“, wie Selbstdiagnose, Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration und Selbstwartung, eine autonome Anpassung der Produktion im laufenden Betrieb ermöglichen, was die Reaktionsfähigkeit noch weiter steigert und die Handlungsfähigkeit, auch unter unsicheren Bedingungen, gewährleistet (vergleiche dazu auch das Kapitel 3.2.2 zur Roadmap „Engineering“). In **modular aufgebauten, dezentralen Produktionsstätten** – ergänzt durch additive Fertigung – können individuelle und qualitativ hochwertige Produkte innerhalb kürzester Zeit realisiert werden. Virtualisierungen und Digitale Zwillinge beschleunigen zusätzlich die Entwicklung, Simulation und Inbetriebnahme solcher Systeme. Gerade bei hochkomplexen Produkten und Produktionsanlagen reduziert dies Fehler und erhöht die Geschwindigkeit, mit der neue Lösungen in die Praxis überführt werden können.

Neben diesen Potenzialen beziehungsweise absehbaren Vorteilen ergeben sich jedoch neue Herausforderungen: Wertschöpfungsnetzwerke sind komplexer zu steuern als lineare Ketten und erfordern ein hohes Maß an Koordination und Vertrauen zwischen den beteiligten Akteuren. Gleichzeitig erhöht die Vielzahl an Schnittstellen die Angriffsflächen für Cyberkriminalität. Zudem wächst die Abhängigkeit von sicheren und aktuellen Daten. Fehlerhafte,

nicht interpretierbare oder verspätete Informationen können weitreichende Folgen für das gesamte Netzwerk haben. Darüber hinaus führt die stärkere Vernetzung dazu, dass Unternehmen einen Teil ihrer direkten Kontrolle und gegebenenfalls auch die direkte Kundenschnittstelle an Plattformen, Intermediäre und weitere Partner abgeben müssen.

Gerade deshalb ist Industrie 4.0 so bedeutsam: Sie stellt die technologischen, ökonomischen und institutionellen Voraussetzungen beziehungsweise Werkzeuge bereit, um diese neuen Strukturen nicht nur handhabbar, sondern auch widerstandsfähig zu gestalten. Standardisierte Schnittstellen ermöglichen sicheren und durchgängigen Datenaustausch und gewährleisten dabei die Datenqualität sowie Interpretierbarkeit. Souveräne Datenräume schaffen Vertrauen durch sichere und nachvollziehbare Datenflüsse. Darüber hinaus tragen die Entwicklung zuverlässiger Modelle, Digitaler Zwillinge und KI-gestützter Analysen dazu bei, zeitnah einen Überblick über die Auswirkungen unvorhergesehener Ereignisse auf Fertigung und industrielle Produktion zu erhalten. Virtualisierungen ermöglichen es zudem, komplexe Systeme im Voraus zu testen. Auf diese Weise macht Industrie 4.0 die höhere Komplexität neuartiger Produkte und der dahinterstehenden Netzwerke handhabbar und ermöglicht es, neuartige Konzepte und Ideen zu realisieren: So wird aus einer potenziellen Schwäche eine echte Stärke.

Nachhaltigkeit

In diesem Kapitel wird Nachhaltigkeit in ihrer ganzheitlichen Bedeutung verstanden. Sie umfasst demnach neben der ökologischen auch die wirtschaftliche sowie die soziale Dimension.

Das zentrale Ziel besteht hierbei darin, im Zuge der Digitalisierung den **Wohlstand und die ökologische Nachhaltigkeit miteinander zu vereinen**, gleichzeitig die Produktivität zu steigern und die Wettbewerbsfähigkeit auf internationalen Märkten zu stärken. Dazu bedarf es der Konzeption und Implementierung entsprechender Geschäftsmodelle (siehe dazu auch das Kapitel 3.2.1 zur Roadmap „Geschäftsmodelle“). Um langfristig wirtschaftlich erfolgreich zu sein, muss die industrielle Wertschöpfung mit den planetaren Grenzen in Einklang gebracht werden. Das bedeutet einerseits das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Andererseits gilt es, Ressourcen sparsam zu verwenden und Wertschöpfungsketten zu Wertschöpfungskreisläufen zu schließen, in denen Produkte und deren Teile und Materialien möglichst oft wiederverwendet, repariert und schließlich recycelt werden.

Im Zuge der Nachhaltigkeitstransformation ergeben sich enorme Potenziale: Deutschland könnte künftig eine Vorreiterrolle einnehmen und sich als Leitanbieter sowie Fabrikaurüster im Bereich der Nachhaltigkeit und der Kreislaufwirtschaft positionieren. Die starke Stellung der deutschen Industrie in den Bereichen Maschinen- und Anlagenbau, Automatisierungstechnik sowie in der Material- und Verfahrenstechnik bildet hierfür ein solides Fundament. Gleichzeitig haben Unternehmen in Deutschland den Nachhaltigkeitssektor

als neues Feld für Innovationen und neue Geschäftsmodelle erkannt und setzen sich ambitionierte Ziele, um Energie und Ressourcen einzusparen und Differenzierungspotenziale zu heben.

Industrie 4.0 leistet einen entscheidenden Beitrag, um diese Ziele zu erreichen. Sie eröffnet innovative Lösungen für ressourcenschonende und effiziente Produktions- und Logistikprozesse sowie für eine nachhaltige Nutzung und Optimierung von Produkten. Durch den Einsatz standardisierter Schnittstellen, Digitaler Zwillinge, Produktpässe und Datenräume wird ein schneller, sicherer und präziser Austausch relevanter Nachhaltigkeitsinformationen, auf Basis von Daten aus teils heterogenen Quellen, unter den Stakeholdern ermöglicht. Auf dieser Basis lassen sich unter anderem auch Prozesse mittels KI optimieren und die Anforderungen an Nachhaltigkeitsberichte automatisiert erfüllen.

Auch für das ambitionierte Ziel der Einführung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft ist Industrie 4.0 essenziell. Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) beschreibt, wie der Übergang von einer linearen zu einer zirkulären, ressourcenschonenden Wirtschaft in Deutschland erreicht werden soll und hebt dabei die wichtige Rolle der Digitalisierung hervor.¹⁵ Kreislaufwirtschaft erfordert einen hohen Vernetzungsgrad zwischen den Akteuren, durchgehend interpretierbare Daten sowie flexible, wandelbare Produktionsanlagen. In sogenannten Upgrade Factories könnten zukünftig automatisierte Rückführungsprozesse und Reparaturen umgesetzt werden. Darüber hinaus trägt die Weiterentwicklung serviceorientierter Geschäftsmodelle – wie in Kapitel 3.2.1 der Roadmap „Geschäftsmodelle“ dargestellt – zur ökologischen und gleichzeitig auch zur ökonomischen Nachhaltigkeit bei, indem Produkte zunehmend mit Dienstleistungen wie Predictive Maintenance verknüpft werden. Um diese Potenziale auszuschöpfen, sind in den kommenden Jahren gezielte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erforderlich, die in der Roadmap „Nachhaltigkeit“ in Kapitel 3.2.4 beschrieben sind.

Neben der ökologischen sowie ökonomischen Nachhaltigkeit spielt auch die soziale Nachhaltigkeit eine zentrale Rolle. Diese ist insbesondere in Anbetracht des steigenden Fachkräftemangels und der raschen, teilweise disruptiven Entwicklung neuer Technologien, wie beispielsweise der Künstlichen Intelligenz, von der signifikante Implikationen für die Arbeitsbedingungen zu erwarten sind, von großer Bedeutung. Im Mittelpunkt steht daher die menschenzentrierte Industrie 4.0 und damit die Zukunft der Arbeit (siehe dazu auch die entsprechend referenzierte Roadmap „Zukunft der Arbeit“ in Kapitel 3.2.3). Es gilt, Arbeits- und Organisationsysteme soziotechnisch so zu entwickeln, dass individuell optimierte Arbeitsplätze – etwa durch personalisierte Sicherheitssensorik, individuelle Gesundheitsvorsorge oder (arbeitsplatz-) integrierte Weiterqualifizierung – ermöglicht werden. So entstehen Arbeitsumgebungen, die

Motivation, Wertschätzung und Innovationskraft fördern und die Industrie als gesellschaftlichen wie ökonomischen Motor stärken.

Lebensbegleitendes Lernen wird durch ein breites Angebot an Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten sowie durch niederschwellige digitale Lernumgebungen unterstützt. Beschäftigte erleben den technologischen Wandel dadurch als Bereicherung und können ihn souverän mitgestalten. Künstliche Intelligenz unterstützt zusätzlich vielfältige Aspekte der Arbeit – von Führungs- und Organisationsprozessen über Assistenzsysteme bis hin zu einem hochflexiblen Veränderungsmanagement. Wichtig ist dabei eine Kultur des Vertrauens in KI-Systeme – durch klare Kommunikation über ihre Fähigkeiten und Grenzen. Zugleich sollen Ängste vor Arbeitsplatzverlust durch solche Systeme aktiv adressiert werden, etwa durch die Förderung von Rollen, die menschliche Kreativität und Entscheidungskompetenz, im Zusammenspiel mit KI-Systemen, gezielt nutzen. Dies steigert die Produktivität und eröffnet neue Formen der Zusammenarbeit. Gleichzeitig werden im Kontext von Industrie 4.0 Datenschutz, Haftungsfragen und die partizipative Einbindung der Beschäftigten berücksichtigt, sodass technologische Innovationen verantwortungsvoll umgesetzt werden.

Souveränität

Souveränität bezeichnet die Möglichkeit zur unabhängigen Selbstbestimmung von Staaten, Organisationen oder Individuen. Digitale Souveränität ist heute ein wichtiger Teilaspekt allgemeiner Souveränität, der die Unabhängigkeit in Bezug auf die Nutzung und Gestaltung digitaler Systeme selbst, der darin erzeugten und gespeicherten Daten sowie der damit abgebildeten Prozesse umfasst.¹⁶

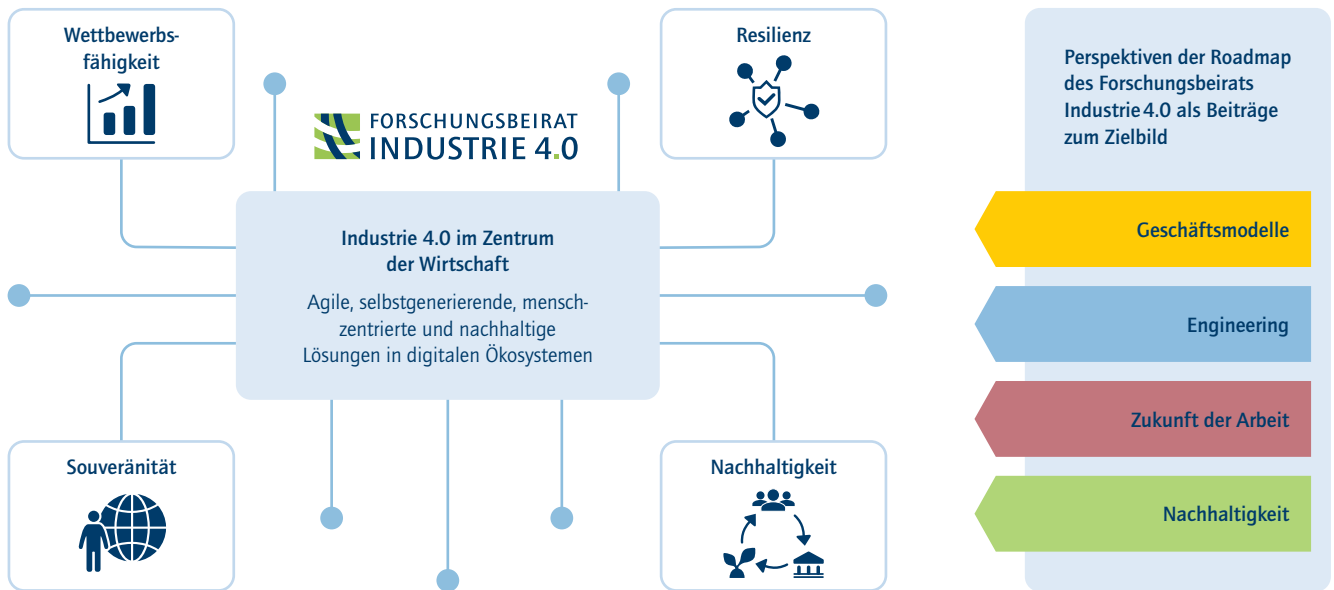
Die Bedeutung der Thematik wurde in der jüngsten Vergangenheit mehrfach deutlich: Der Krieg in der Ukraine hatte maßgebliche Folgen für die Energieversorgung Deutschlands, indem die Abhängigkeitsverhältnisse, insbesondere in der Gasversorgung, aufgezeigt wurden. Im Kontext der Digitalisierung hat Europa insbesondere im B2C-Bereich bisher keine Antwort auf die Vormachtstellung der Hyperscaler und ihrer Plattformen gefunden.

Industrie 4.0 leistet einen entscheidenden Beitrag zur Erhöhung der Souveränität Deutschlands, vor allem im B2B-Bereich. Indem Deutschland seine Vorreiterrolle in der digitalen, vernetzten Wertschöpfung im Sinne von Industrie 4.0 unter Nutzung des Domänenwissens weiter ausbaut, eröffnet sich die Möglichkeit, de facto Standards zu setzen – beispielsweise bei der Gestaltung von Datenräumen. Diese sind entscheidend, um die Potenziale von Industrie 4.0 in der von mittelständischen Unternehmen geprägten deutschen Industrie zu heben. Sie ermöglichen es Unternehmen, sich aus starren Wertschöpfungsketten zu lösen und in flexiblen und dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken Daten mit Partnern zu

¹⁵ Vgl. BMUV 2024.

¹⁶ Zur Diskussion des Souveränitätsbegriffs vgl. beispielsweise BMWi 2021. Für eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Schichten Digitaler Souveränität vgl. Kagermann et al. 2021b.

Abbildung 2: Zielbild von Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

teilen und mit ihnen zu kooperieren. Darauf aufbauend können Potenziale für Innovation und Wertschöpfung gehoben werden (siehe dazu auch die Aspekte zur Wertschöpfungsarchitektur der Roadmap „Geschäftsmodelle“ in Kapitel 3.2.1). Darüber hinaus können so europäische Wertevorstellungen auf internationaler Ebene platziert werden. Es besteht in den Industrieunternehmen ein gemeinsames Verständnis, dass ein strategischer Schulterschluss für Standards und Regeln notwendig ist und diese zusammen weiterentwickelt werden müssen. Basis dieser so entstandenen beziehungsweise entstehenden Ökosysteme mit einer Vielzahl von teilnehmenden Akteuren ist eine umfassende Vernetzung sämtlicher relevanter Datenräume und eine vollständige Interoperabilität, die durch Initiativen, wie GAIA-X, Manufacturing-X, Catena-X oder heimische Unternehmen, geprägt ist. Dadurch können auch KMU und Start-ups aktiv partizipieren und es besteht kein Risiko von Lock-in/Lock-out-Effekten, die insbesondere in proprietären Plattformen und Ökosystemen auftauchen.

Zusätzlich ist die Souveränität Deutschlands und Europas hinsichtlich Ressourcen- und Energieverbrauch ein entscheidender Stellhebel. Als zentraler Enabler für die **Kreislaufwirtschaft** trägt Industrie 4.0 maßgeblich dazu bei, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren und damit nicht nur die Kosten zu reduzieren, sondern auch die Abhängigkeit von internationalen Rohstoffmärkten zu minimieren. Durch zirkuläre Wertschöpfungsnetzwerke, eine Rohstoffwahl in Anbetracht von Produktlebenszyklen sowie eine systemübergreifende Optimierung von Energieeffizienz und Umweltbilanzierung wird die Verfügbarkeit von Energie und Ressourcen gewährleistet. Dabei wird das Rückführen gebrauchter Produkte

und Teile sowie deren Aufbereitung und Weiterverwendung mit digitalen Tools ermöglicht, indem ein digitales Abbild des physischen Produkts Auskunft über den Zustand und den voraussichtlichen Wartungsbedarf gibt.

Souveränität geht über digitale Dienste, Ressourcen und Energie hinaus und schließt auch die Entwicklung und Beherrschung von Schlüsseltechnologien in Deutschland ein. Mit der Hightech Agenda¹⁷ will die Bundesregierung eine innovationsstarke Forschungs- und Technologielandschaft schaffen, die Resilienz, Sicherheit und Eigenständigkeit stärkt. Daher gilt es Deutschlands Führungsrolle in der digitalvernetzten industriellen Wertschöpfung durch konsequente Weiterentwicklung und Erprobung von Industrie 4.0-Technologien zu sichern und auszubauen.

Um die Souveränität Deutschlands zu garantieren und somit das Zielbild von Industrie 4.0 zu erreichen, muss jedoch auch die notwendige (Basis-)Infrastruktur auf- und ausgebaut werden. Deutschland braucht dafür bis zum Jahr 2035 eine **hochmoderne und flächendeckende Digital- und Energieinfrastruktur** als Fundament. Internetverbindungen müssen schnell und zuverlässig mit extrem niedrigen Latenzzeiten sein. Die Cloud- und Edge-Infrastruktur sollte sicher, lokal und resilient sein und die Skalierung von KI- und Datenanwendungen, wie dem Digitalen Zwilling, ermöglichen. Dafür sind auch europäische KI-Modelle zur Verfügung zu stellen. Standardisierte, interoperable Schnittstellen müssen flächendeckend umgesetzt sein, um die an ihrer Entstehungsquelle semantisch standardisierten Daten einheitlich und interpretierbar teilen zu können. Eine solche digitale Infrastruktur ist die Grundlage, dass

17 Vgl. BMFTR 2025.

Unternehmen – besonders auch kleine und mittlere Organisationen – digital zusammenarbeiten und Innovationen vorantreiben können. Schließlich leisten smarte Energiesysteme einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Versorgung zu international wettbewerbsfähigen Preisen.

Für die Realisierung des allgemeinen Zielbilds Industrie 4.0 ist der Wandel hin zu agilen, selbstgenerierenden, menschenzentrierten und nachhaltigen Lösungen erforderlich. Für Unternehmen ist es essenziell, in dynamischen und digitalen Ökosystemen zu agieren und die

Vorteile der kooperativen und kollaborativen Vernetzung zu heben. Dafür ist ein strategisches Vorgehen in Forschung und Entwicklung notwendig, wie es in den Roadmaps Industrie 4.0 des Forschungsbeirats festgehalten ist. Die Abbildung 2 stellt die übergeordneten Aspekte des in diesem Kapitel dargelegten Industrie 4.0-Zielbilds den Perspektiven der Roadmaps des Forschungsbeirats Industrie 4.0 gegenüber. Diese im folgenden Kapitel 3 beschriebenen Roadmaps sollen im Kontext ihrer Themenblöcke wesentliche Beiträge zur Erreichung des Zielbilds, vor dem Hintergrund der dafür zu adressierenden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe, liefern.

3 Roadmaps des Forschungsbeirats Industrie 4.0

Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 zeichnet den Weg in seinem zeitlichen Verlauf vor, wie die notwendigen, vielfältigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten einen Beitrag zur Befähigung einer digitalen, vernetzten Wertschöpfung leisten können. Dazu haben Expertengruppen, zusammengesetzt aus den Mitgliedern des Forschungsbeirats, themenspezifische Roadmaps zu Geschäftsmodellen, Engineering, zur Zukunft der Arbeit sowie Nachhaltigkeit erarbeitet (siehe Kapitel 3.2), aus denen eine übergeordnete Roadmap als konsolidierte Fassung entwickelt wurde, die im folgenden Kapitel 3.1 dargestellt ist. Die Roadmaps zeigen die spezifischen, weitreichenden Themenblöcke beziehungsweise Handlungsfelder auf, in denen der Forschungsbeirat aktuelle und zukünftige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe sieht, um das Zielbild 2035 des Forschungsbeirats Industrie 4.0 (siehe Kapitel 2) erreichen zu können. Dem Forschungsbeirat Industrie 4.0 kommt hierfür eine essenzielle Funktion zu. Als zentraler Ansprechpartner in Deutschland zu Forschung und Entwicklung für Industrie 4.0 behält er den Überblick über Themen und Forschungsfelder, gibt Orientierung, ist Sensor für neue Entwicklungsströmungen und Impulsgeber für künftige Forschungsthemen (vgl. Kapitel 4 zur Mission des Forschungsbeirats). Dementsprechend sind die Roadmaps als lebende Dokumente zu verstehen, die regelmäßig an aktuelle Entwicklungen angepasst werden. Der Forschungsbeirat möchte, insbesondere im Schulterschluss mit weiteren Initiativen wie beispielsweise der Plattform Industrie 4.0, die sich primär auf Umsetzungsfragen konzentriert, die erfolgreiche Erreichung des Zielbilds 2035 vorantreiben. Im Zuge einer zunehmenden Industrie 4.0-Implementierung ergeben sich stetig neue Forschungsfragen, die es auch weiterhin zu identifizieren und adressieren gilt. Damit geht die Notwendigkeit einher, dass sich Plattform und Forschungsbeirat Industrie 4.0 synergetisch zusammen weiterentwickeln. Der konkrete Zweck der Roadmaps besteht darin, nicht nur dem Forschungsbeirat eine Art roten Faden für die inhaltliche Arbeit über verschiedene Formate zu bieten. Vielmehr sollen sie relevanten Stakeholdern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik und somit auch den im Kontext von Industrie 4.0 und der vernetzten Wertschöpfung involvierten (Bundes-)Ministerien eine thematische Orientierung über die zukünftig zu fokussierenden Themenkomplexe im Forschungs- und Entwicklungsbereich liefern sowie darüber hinaus die Kommunikation und Abstimmung mit und zwischen den Stakeholdern vereinfachen.

3.1 Übergeordnete Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0

Die Roadmap umfasst einen Zeitraum von zehn Jahren, der wiederum in drei Zeitspannen als konsekutive Entwicklungsschritte unterteilt ist. Inhaltlich werden vier Hauptthemenstränge unterschieden: Geschäftsmodelle (gelb), Engineering (blau), Zukunft der Arbeit (rot) und Nachhaltigkeit (grün). Diese Hauptthemen sind in den vier Zeilen in ihrem zeitlich geplanten Verlauf dargestellt und

bilden somit das Raster der Roadmap. In der ersten Zeitspanne geht es um die Optimierung bestehender Systeme hinsichtlich Arbeit, Organisation, Produkte, Services und Produktion. Die zweite Zeitspanne richtet den Fokus auf eine zunehmend datenbasierte und vernetzte Leistungserbringung, die eine dynamische Anpassbarkeit zur Folge hat. Die dritte Zeitspanne bezieht sich auf die Realisierung einer weitgehend autonomen Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. In dieser Phase entstehen dynamische und digitale Ökosysteme. Soziale und ökologische Nachhaltigkeit sind dabei zentrale Elemente.

Die in diesem sich ergebenden Raster angeordneten Themenblöcke adressieren übergreifende Forschungsfragestellungen, die unter der Annahme, dass bestimmte Entwicklungen eintreten werden, sinnvoll aufeinander folgen. Die Anordnung der Themenblöcke beschreibt die zeitliche Lage und Abfolge der Forschungsthemen und nicht den Zeitpunkt der Verfügbarkeit der Ergebnisse. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass sich diese Entwicklung kontinuierlich und ohne Brüche vollziehen lässt. Außerdem besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit und es werden sich mit der zunehmenden Umsetzung von Industrie 4.0 neue Fragen für Forschung und Entwicklung ergeben, die es zu berücksichtigen gilt. Auch aus diesem Grund arbeiten der Forschungsbeirat und die für die Umsetzung verantwortlichen Initiativen wie die Plattform Industrie 4.0 eng zusammen.

Die Themenblöcke bilden einen inhaltlichen Rahmen für konkrete Forschungsschwerpunkte, die innerhalb des angegebenen Zeitraums bearbeitet werden können. Die Forschungsschwerpunkte sind in einer detaillierteren Stufe in Unterthemenblöcke für die vier Hauptthemen, jeweils in den Kapiteln zu den spezifischen Roadmaps für 3.2.1 „Geschäftsmodelle“, 3.2.2 „Engineering“, 3.2.3 „Zukunft der Arbeit“ und 3.2.4 „Nachhaltigkeit“, dargestellt.

3.2 Themenspezifische Roadmaps

Die übergeordnete Roadmap für Industrie 4.0 in Kapitel 3.1 stellt eine Synthese von themenspezifischen Roadmaps des Forschungsbeirats Industrie 4.0 dar. Diese dienen demselben Zweck, wie die konsolidierte Roadmap Industrie 4.0, gehen jedoch weiter in das Detail ihres jeweiligen Fokusgebietes. Die Forschungsschwerpunkte in den spezifischen Roadmaps sind als Verfeinerung der definierten und beschriebenen Themenblöcke noch weiter zu erarbeiten und bis hin zu konkreten Forschungsarbeiten zu detaillieren. Als unabhängiges und gemeinnütziges Gremium nimmt der Forschungsbeirat Industrie 4.0 dafür eine wesentliche Funktion wahr. Mit einem höheren Grad der Detaillierung ist es für dieses Gremium darüber hinaus möglich, gezielt die Stakeholder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik anzusprechen und damit auch Impulse für konkrete Schritte zur Umsetzung des Industrie 4.0-Zielbildes für die Zukunft der industriellen Wertschöpfung zu ermöglichen.

Abbildung 3: Die übergeordnete Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

Es ist davon auszugehen, dass dieser Verfeinerungsprozess für naheliegende Themenblöcke verlässlicher als für weit in der Zukunft angeordnete Themenblöcke durchgeführt werden kann. Auch hier beschreibt die Anordnung der Themenblöcke die zeitliche Lage der Forschungsarbeiten, also nicht den Zeitpunkt der Verfügbarkeit der Ergebnisse. Da es sich aufgrund der Forschungsrichtung des Forschungsbeirats um eine Planung für die Forschung handelt, ist insbesondere keine Information dazu enthalten, wann die Forschungsergebnisse praktisch umgesetzt sein werden.

3.2.1 Roadmap Geschäftsmodelle¹⁸

Mit der Digitalisierung und fortschreitenden Realisierung von Industrie 4.0 hin zu einer vernetzten Wertschöpfung mit menschenzentrierten, agilen und adaptierbaren Unternehmen sowie einem hohen Autonomiegrad geht ein umfassender Transformationsprozess einher, der neue Wertschöpfungspotenziale schafft und somit eine entscheidende Bedeutung für die systematische Sicherung und Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland hat. In der Vergangenheit waren es insbesondere die Hersteller von (physischen) Produkten, die Innovationen forcierten und über die weltweite Vermarktung ihrer Erzeugnisse „Made in

Germany“ einen wesentlichen Beitrag für die Stärke und das Wachstum der Wirtschaft leisteten. Der digitale Wandel im Kontext von Industrie 4.0 mit der damit verbundenen Integration von Sensorik und Aktorik in Produkte, Bauteile, Maschinen und (Produktions-) Systemen und deren intelligente Vernetzung, schafft die Möglichkeit, Daten innerhalb und auch außerhalb der Unternehmensgrenzen kontinuierlich (zum Beispiel über Nutzungsgewohnheiten) zu generieren. Auf dieser Basis können nicht nur auf die Kundschaft angepasste Produkte zum Teil in modularen, dezentralen Produktionsstätten gefertigt werden, sondern auch flexibel kundenindividuelle Dienstleistungen und Services entwickelt beziehungsweise bereitgestellt werden. Datenökosysteme nehmen hier eine zentrale Stellung ein. So hat sich eine neue Datenökonomie entwickelt, die innovative, digitale, datengetriebene sowie plattformzentrierte, serviceorientierte Geschäftsmodelle ermöglicht und bisherige Produktionsunternehmen dazu zwingt, vor dem Hintergrund eines zunehmend kompetitiven, dynamischen und komplexer werdenden Umfelds neue Marktchancen zu identifizieren und umzusetzen. Dabei entstehen für Unternehmen weitreichende Möglichkeiten, ihre Position im globalen Wettbewerb zu behaupten beziehungsweise zu verbessern und die Daten- respektive Plattformökonomie, insbesondere im B2B-Bereich, mitzugestalten. Die Voraussetzung hierfür sind durchgängig interpretierbare Daten, ermöglicht durch

¹⁸ Die vollständige Roadmap „Geschäftsmodelle“ kann unter www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/ unter dem Punkt „Roadmaps des Forschungsbeirats“ abgerufen werden.

die flächendeckende Umsetzung interoperabler Schnittstellenstandards. Im Zentrum stehen digitale industrielle Plattformen.¹⁹

Die alleinige Verknüpfung von Produkten und Services reicht dazu jedoch nicht aus. Nur die effektive Trias aus Produkt, Service und kundenorientiertem, individuellem Leistungsversprechen mit überlegenem Kundennutzen bringt Differenzierungschancen und neue Marktpotenziale im globalen Wettbewerb für Unternehmen mit sich. Für Kunden können die sich daraus ergebenden datenbasierten, individualisierten Smart Services wichtiger als das komplementäre physische Produkt oder eine generische Dienstleistung werden – beispielsweise, wenn Fertigungskapazitäten, einschließlich umfassender Instandhaltungs- und Reparaturleistungen, als Komplettlösung nachgefragt werden, anstatt einmalig eine physische Produktionsmaschine zu erwerben.

Diese Servitisierung des Leistungsangebots ist mit umfassenden Transformations- und Anpassungsprozessen für Unternehmen verbunden – vor allem im Hinblick auf das verfolgte Geschäftsmodell. Die damit einhergehende Änderung der Geschäftslogik erfordert ein schrittweises, kontinuierliches und systematisches Vorgehen. Neben der Schaffung von vernetzten, intelligenten, datengenerierenden und auf die Kunden angepassten Produkten beziehungsweise Komponenten (Smart Products) gilt es im Zuge der Implementierung von Industrie 4.0 ein kundenindividuelles Nutzenversprechen mit überlegenem Mehrwert über Smart Service herauszuarbeiten und der Kundschaft adäquat zu kommunizieren. Außerdem ist es wichtig, methodisch in der praktischen Umsetzung zu unterstützen und darauf abgestimmte, flexible und dynamische Erlös- bzw. Profitmodelle zu kreieren und einzusetzen. Zudem ist es erforderlich, die tradierten, meist starren Liefer-, Innovations- und Wertschöpfungsketten aufzusprennen und flexible, plattformzentrierte Netzwerke innerhalb digitaler Ökosysteme aufzubauen, die eine kooperative und kollaborative Leistungserstellung unter Berücksichtigung von Daten und Akteuren innerhalb und außerhalb des Unternehmens sowie über Branchengrenzen hinweg ermöglichen.

Das hohe ökonomische Potenzial und die Marktchancen, die durch hochindividualisierbare, personalisierte Smart Services auf Basis der Erhebung, Verknüpfung, Auswertung und Analyse heterogener Daten zu realisieren sind, ist den Unternehmen zumeist bekannt. Dennoch fehlt es häufig an der erfolgreichen Umsetzung – sei es aufgrund mangelnder Kompetenzen oder Ressourcen, fehlender Strukturen oder wegen einer ausbleibenden Monetarisierung, Profitabilität beziehungsweise Rentabilität. Häufig fehlt die Verwendungsfähigkeit technologischer Innovationen – das heißt die Fähigkeit, relevante Industrie 4.0-Technologien in Wertschöpfung, Organisation und Kompetenzen zu überführen und auf dieser Basis tragfähige Geschäftsmodelle zu konzipieren und zu implementieren. Dazu gilt es zu eruieren, wie aus technischen Assets markt- und menschenwirksame Leistungen generiert werden können.

Welche Herausforderungen produzierende Unternehmen in ihrem Transformationsprozess hin zu Smart-Service-Anbietern überwinden müssen, soll über die Roadmap „Geschäftsmodelle“ des Forschungsbeirats Industrie 4.0 aufgezeigt werden.

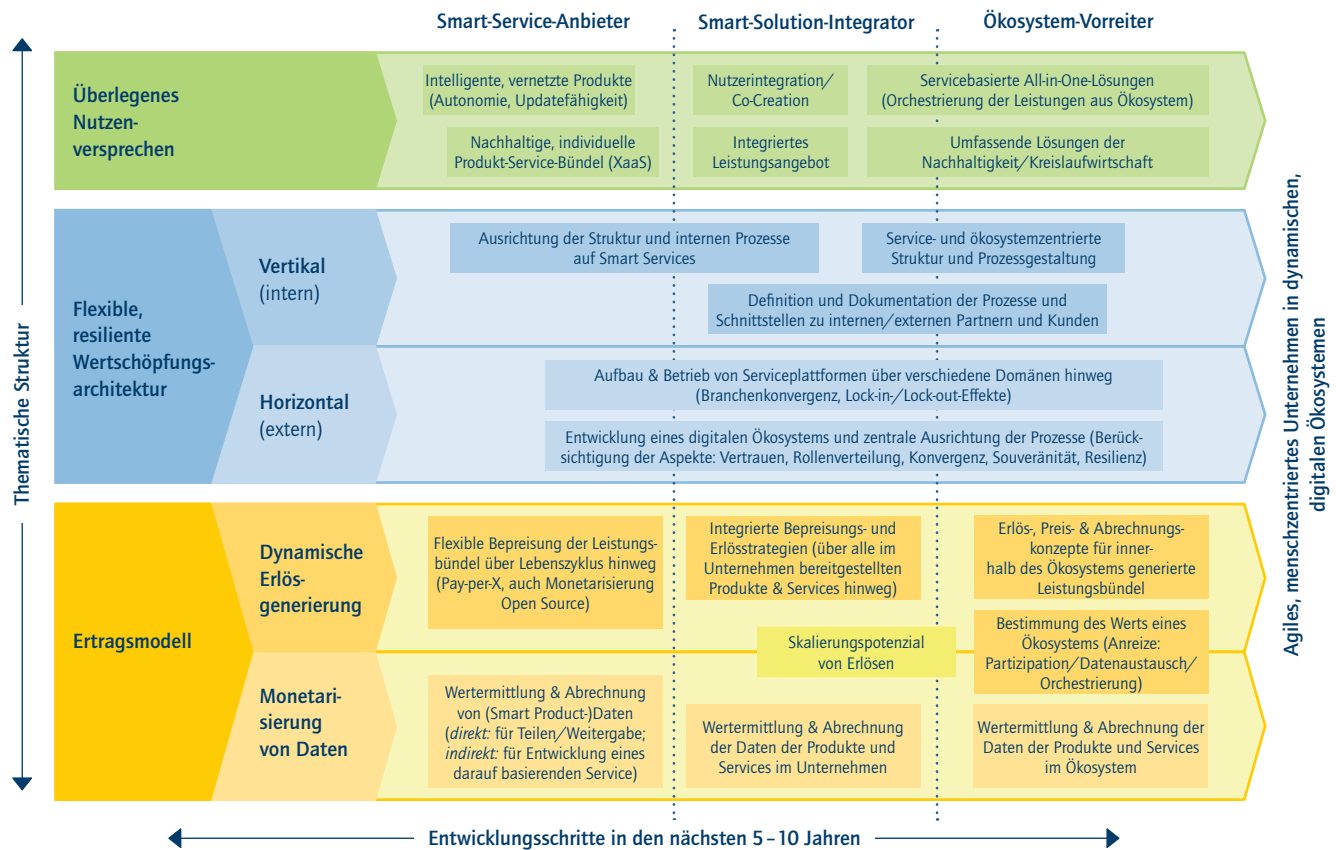
Für die thematische Struktur (vertikale Achse) der Roadmap zur Gliederung der Forschungs- und Entwicklungsbedarfe wird ein generischer und damit übersichtlicher Ansatz zur Abbildung eines Geschäftsmodells mit drei Hauptbereichen herangezogen. Insgesamt wird demnach unter einem Geschäftsmodell die Art und Weise verstanden, wie ein Unternehmen ein **a) überlegenes Nutzenversprechen**, das heißt einen Mehrwert für Kunden erzeugt, wie und in welcher Form auf dieser Basis Ertrag beziehungsweise Profit seitens des Unternehmens – auch über die Monetarisierung von Daten – über ein **b) tragfähiges Ertragsmodell** generiert werden kann und welche **c) flexiblen und resilienten Wertschöpfungsarchitekturen** und Interaktionen sowohl unternehmensintern als auch -extern dafür notwendig sind.

Im Hinblick auf die zeitliche Struktur werden im Rahmen dieser Roadmap drei Hauptzeiträume als Entwicklungsstufen herangezogen, die in Anlehnung an die acatech Maturity Index Smart Services²⁰ wie folgt definiert werden können: **a) Smart-Service-Anbieter** sind Unternehmen, die in der ersten Stufe Fortschritte in der Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen erreicht und das Angebot intelligenter, vernetzter, datengenerierender Produkte mit digitalen Funktionen (Smart Products) realisiert haben und die über den Einsatz entsprechender Sensorik und Schnittstellen größere Datenmengen erfassen. Auf dieser Basis und unter Einsatz fortschrittlicher, automatisierter Datenanalysen sind diese Unternehmen in der Lage, nach der Konzeption und erfolgreichen initialen Erprobungsphase Smart Services (zum Beispiel im Bereich Predictive Maintenance für Fertigungsmaschinen) in bestimmten Marktsegmenten einzuführen. Als **b) Smart-Solution-Integratoren** in der nächsten Entwicklungsstufe sind Unternehmen in der Lage, nach umfassenden Professionalisierungs- und Anpassungsprozessen sowie einer Erweiterung der Smart-Service-Fokussierung digitale Geschäftsmodelle zu implementieren, die das Angebot von Smart Products und Smart Services als integrierte Gesamtlösung vorsehen und so das Kerngeschäft des Unternehmens darstellen. Auf Basis einer weitreichenden Erfassung von Daten und Auswertung durch KI werden genau auf die Bedürfnisse der Kunden zugeschnittene Leistungspakete über nachvollziehbare und flexible Erlös- bzw. Bepreisungsmodelle bereitgestellt. Mit dem Begriff **c) Ökosystem-Vorreiter** werden Unternehmen der dritten Stufe subsumiert, die mit der Bereitstellung ihres Smart-Service-basierten Leistungsangebots ein komplettes (digitales) Ökosystem prägen, indem sie modular in Kooperation und Kollaboration mit weiteren Akteuren über die Unternehmensgrenzen hinaus und unter Einbeziehung der Kunden ihre Smart Services entwickeln und bereitstellen. Souveräne Datenräume und -ökosysteme (beispielsweise auf Basis von GAIA-X) bieten neue Möglichkeiten, den vertrauenswürdigen Austausch und

19 Vgl. unter anderem Pauli et al. 2021.

20 Vgl. Dumitrescu et al. 2023.

Abbildung 4: Die Geschäftsmodell-Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

die Integration von Daten und Informationen aus unterschiedlichen (unternehmens-)internen und externen Quellen voranzutreiben. Unternehmen können so Betreiber von Serviceplattformen sein, die darin geltenden Regeln und Anforderungen für die beteiligten Akteure definieren und die Schnittstelle zu den Kunden einnehmen. Alle Prozesse, Strukturen und Routinen des Unternehmens werden explizit auf Smart Services zur kundenindividuellen Leistungsbereitstellung ausgerichtet.

Die durch den Forschungsbeirat Industrie 4.0 erarbeiteten Themenblöcke im Kontext des Bereichs *überlegenes Nutzenversprechen* forcieren vor allem die Schaffung von nachhaltigen, individuellen Produkt-Service-Bündel (XaaS) auf Basis von individualisierten, intelligenten und vernetzten Produkten. Unter anderem über eine stärkere Verzahnung beziehungsweise Vernetzung zwischen Produktentwicklung und Produktion (siehe dazu auch die Roadmap „Engineering“ in Kapitel 3.2.2) gilt es dann, Smart Products und das komplementäre Angebot von Smart Services als integrierte Gesamtlösung und somit als Kerngeschäft des Unternehmens zu verstehen. Im Zuge eines Customer Value Co-Creation-Ansatzes wird die Notwendigkeit aufgezeigt, Kunden über Rückkopplungsprozesse aktiv in die Leistungserstellung einzubeziehen. Neben servicebasierten All-in-One-Lösungen, die über eine Orchestration der Leistungen innerhalb eines digitalen Ökosystems geschaffen

werden, erfolgt in diesem Themenbereich die Fokussierung auf Geschäftsmodellansätze für umfassende Lösungen der ökonomischen, sozialen und vor allem auch ökologischen Nachhaltigkeit beziehungsweise Kreislaufwirtschaft (siehe dazu auch die Roadmap „Nachhaltigkeit“ in Kapitel 3.2.4).

Im Themenbereich *flexible, resiliente Wertschöpfungsarchitektur* werden die relevanten vertikalen (innerhalb eines Unternehmens) als auch horizontalen (über die Unternehmensgrenzen hinweg) organisatorischen und strukturellen Anpassungs- und Wandelprozesse zur Bereitstellung und Implementierung von Smart Services fokussiert. So besteht die Notwendigkeit, umfangreiche Adaptionen, Veränderungen und Verknüpfungen in der unternehmensinternen Struktur beziehungsweise in dem Organisationsgefüge und somit im gesamten Unternehmensaufbau und -ablauf mit der Entwicklung entsprechender Kompetenzen anzugehen (siehe dazu auch die Roadmap „Zukunft der Arbeit“ in Kapitel 3.2.3). Zudem ist es unabdingbar, Prozesse und Schnittstellen zu internen/externen Partnern und Kunden zu definieren beziehungsweise zu dokumentieren, bis hin zur Realisierung einer service- und ökosystemzentrierten Struktur und Prozessgestaltung, zum Aufbau und Betrieb von Serviceplattformen über verschiedene Domänen hinweg sowie zur Entwicklung eines digitalen Ökosystems und der zentralen Ausrichtung der Prozesse. Gerade hierbei ist es wichtig, auch neue relevante Akteure zu

erkennen und zu identifizieren, die gegebenenfalls in den bisherigen Liefer-, Innovations- und Wertschöpfungsketten (noch) keine wichtige Rolle einnehmen – beispielsweise Datenintermediäre, KI-Akteure, Anbieter von Virtualisierungstechnologien, Cyber-Security-Anbieter, Versicherungsunternehmen, Banken et cetera.

Schließlich betrachtet der Forschungsbeirat Industrie 4.0 im Themenbereich *Erlösmodell* zum einen die zu adressierenden Aspekte der dynamischen Erlösgenerierung über eine flexible Bepreisung der Leistungsbündel innerhalb des Unternehmens als auch über die Unternehmensgrenzen hinweg. Zudem wird die Bestimmung des Wertes eines Ökosystems vor allem vor dem Hintergrund einer (Investitions-)Kosten-/Nutzenanalyse zur Partizipation in solchen Ökosystemen für Unternehmen relevant. Zum anderen wird in diesem Themenbereich eine Fokussierung auf die notwendige Wertermittlung und Abrechnung der Daten von Produkten und Services innerhalb der Unternehmensgrenzen sowie darüber hinaus in einem digitalen Ökosystem unternommen. Die Hebung von Skalierungspotenzialen bei datenbasierten und plattformzentrierten Industrie 4.0-Geschäftsmodellen unter adäquater Nutzung von Domänenwissen ist entscheidend, um Smart Services wirtschaftlich erfolgreich und (ökonomisch) nachhaltig anbieten zu können.

3.2.2 Roadmap Engineering²¹

Das Engineering ist die Grundlage für die Umsetzung von Industrie 4.0, da es die technische Basis für die intelligente, vernetzte und automatisierte Produktion bildet. Damit entspricht das Engineering einem Fundament für die erfolgreiche Erreichung der im vorangegangenen Kapitel 2 aufgeworfenen Chancen und Potenziale im Rahmen von neuartigen Erlös- und Geschäftsmodellen sowie in Bezug auf das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen, wodurch sich wiederum weitreichende Auswirkungen auf die Bereiche Arbeit, Unternehmensorganisation und Gesellschaft ergeben werden. Darüber hinaus zeigt sich in der industriellen Praxis, dass technologische Leistungsfähigkeit allein nicht ausreicht. Entscheidend ist die Anwendungsfähigkeit von Technologien. Dementsprechend rückt eine übergreifende Betrachtung von Mensch, Technik und Organisation als Voraussetzung für erfolgreiche Industrie 4.0-Umsetzungen stärker in den Vordergrund.

Die Nutzung von Industrie 4.0-Lösungen setzt eine systematische Planung, Konzipierung, Entwicklung, Validierung, Simulation und Erprobung der zugrundeliegenden technischen beziehungsweise soziotechnischen Systeme voraus. Die steigende Komplexität der Systeme und die Orchestrierung der übergeordneten Systemverbände erfordern eine **ganzheitliche und strategische Betrachtung des Engineerings** – von der strategischen Planung über das Engineering von Produkten, Dienstleistungen und Produktionssystemen bis zum Recycling beziehungsweise der Wiederaufbereitung

und anschließenden Wiederverwendung. Dabei müssen auch weitere, neue Aspekte, wie die zunehmende Selbstlernfähigkeit von Systemen, die Datenanalytik sowie die damit verbundenen umfassenden Methoden des Data Engineering berücksichtigt werden.

Die Roadmap für Engineering basiert auf der Annahme, dass ein zentraler Gegenstand von Industrie 4.0 die Erreichung einer wettbewerbsfähigen, transparenten, flexiblen und gleichermaßen wertschöpfungsdeckenden Produktion und Produktbereitstellung im Feld ist. Dies stellt allerdings keinen Selbstzweck dar – vielmehr sollen dadurch weitere Ziele erreicht werden. Dazu gehören beispielsweise die Herstellung individueller Produkte, die Erhöhung der Resilienz gegenüber internen und externen Einflüssen, die Reaktion auf geänderte Kundenwünsche oder anderen Eigenschaften von Ausgangsmaterialien sowie auch die Optimierung im Sinne der Durchsatzerhöhung, Maschinenauslastung oder zur Vermeidung von Flaschenhälsen. Es geht darum, eine stets optimale Kombination der erforderlichen Eigenschaften zu erreichen, insbesondere die Produktivität zu steigern, Sicherheit zu gewährleisten und Nachhaltigkeit zu optimieren (vergleiche dazu auch die Roadmap „Nachhaltigkeit“ in Kapitel 3.2.4). Darüber hinaus ist es ein Ziel, die autonome Anpassbarkeit und Transparenz im Herstellungsprozess weiter zu erhöhen, sodass auch Produkte, für deren Fertigung die höchsten Anforderungen an die Wandelbarkeit gestellt werden, ebenfalls automatisiert werden können. So sind beispielsweise in der Pharmazie Therapeutika für schwerwiegende Erkrankungen bekannt, die automatisiert nur unter Nutzung von Industrie 4.0-Fähigkeiten erzeugt werden können.

Der Forschungsbeirat sieht ein wichtiges Fundament für die Flexibilisierung in der Realisierung einer durchgängigen horizontalen und vertikalen Kommunikation, einhergehend mit der Schaffung großer Transparenz auf Basis von durchgängig interpretierbaren Daten. Die flächendeckende Umsetzung interoperabler Schnittstellenstandards ist somit eine notwendige Bedingung hierfür. Außerdem stellt seit Beginn der Arbeiten zu Industrie 4.0 die bestmögliche Integration des Menschen einen besonders wichtigen Aspekt dar, das heißt insbesondere die optimale Aufteilung der Arbeit und bestmögliche Kollaboration zwischen Mensch und Maschine, einhergehend mit einer angemessenen Unterstützung des Menschen durch die Technik. Diese Aspekte sind sowohl auf dem Shopfloor als auch im Engineering von Bedeutung. Dabei müssen neue Arbeitskulturen und -organisationsformen beachtet werden (vergleiche dazu auch die Roadmap „Zukunft der Arbeit“ in Kapitel 3.2.3). Neben der technologischen Weiterentwicklung müssen insbesondere die Organisationssysteme selbst wandlungsfäh gestaltet werden. Viele Transformationsvorhaben scheitern weniger an fehlenden Technologien als an der mangelnden Integration der Aspekte Mensch, Technik und Organisation. Eine übergreifende Betrachtung und gemeinsame Anpassung dieser Systeme ist eine entscheidende Voraussetzung für industrielle Souveränität.

21 Die vollständige Roadmap „Engineering“ kann unter www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/ unter dem Punkt „Roadmaps des Forschungsbeirats“ abgerufen werden.

Die Flexibilisierung und die damit einhergehenden unterschiedlichen Stufen der Skalierung erfordern eine zunehmende Wandelbarkeit der Produktion. Dementsprechend unterscheidet der Forschungsbeirat in der Engineering-Roadmap drei Zeitspannen innerhalb der kommenden zehn Jahre, die durch unterschiedliche Ziele für die Wandelbarkeit gekennzeichnet sind. An die Zeitspanne, die durch Forschungsarbeiten zur Optimierung bestehender Fabrikssysteme charakterisiert ist, schließt sich eine Zeitspanne an, in der die Forschung auf die Erreichung einer dynamischen Anpassbarkeit zielt. Während hier Menschen auf Basis geeigneter Techniken den Wandel der Produktion und des Produktbetriebs gestalten und dabei die erforderlichen Eigenschaften sicherstellen, zielen die Forschungen der dritten Phase auf Wandelbarkeit durch autonome Fähigkeiten der Produktion und der Produkte im operativen Betrieb ab.

Vor diesem Hintergrund gewinnt das Konzept eines „dualen Betriebssystems“²² an Bedeutung. Es beschreibt die notwendige Verzahnung zwischen stabilen, effizienten Strukturen der Aufbauorganisation und adaptiven, lernfähigen Netzwerken im Sinne eines organisationalen Habitats. Während erstere operative Exzellenz sichern, ermöglichen letztere Innovation, schnelle Anpassung und organisationales Lernen. Dieses Zusammenspiel sollte im Engineering systematisch berücksichtigt werden, um souveräne und resiliente Industrie 4.0-Systeme zu ermöglichen.

Die Anforderungen an das Engineering steigen kontinuierlich. Produkte und Produktionssysteme werden stets komplexer, gleichzeitig sind die Fehlerquoten zu senken und die Entwicklungs- und Produktionsprozesse zu beschleunigen. Des Weiteren muss auf sich ändernde Kundenwünsche und volatile Marktbedingungen agil und flexibel reagiert werden können, sodass ein hohes Maß an Resilienz erreicht wird. Ein zentraler Forschungs- und Entwicklungsbedarf liegt in der **Gestaltung modularer und dezentraler Produktionsstätten**. Diese müssen individuell auf Kundenanforderungen ausgerichtet sein, sich aber dennoch in eine eng abgestimmte, digital vernetzte Engineering-Kette einfügen. Offene Fragen betreffen insbesondere die Kombination von hohem Automatisierungsgrad und intelligenten Technologien, um Flexibilität, Effizienz und Qualität gleichzeitig sicherzustellen.

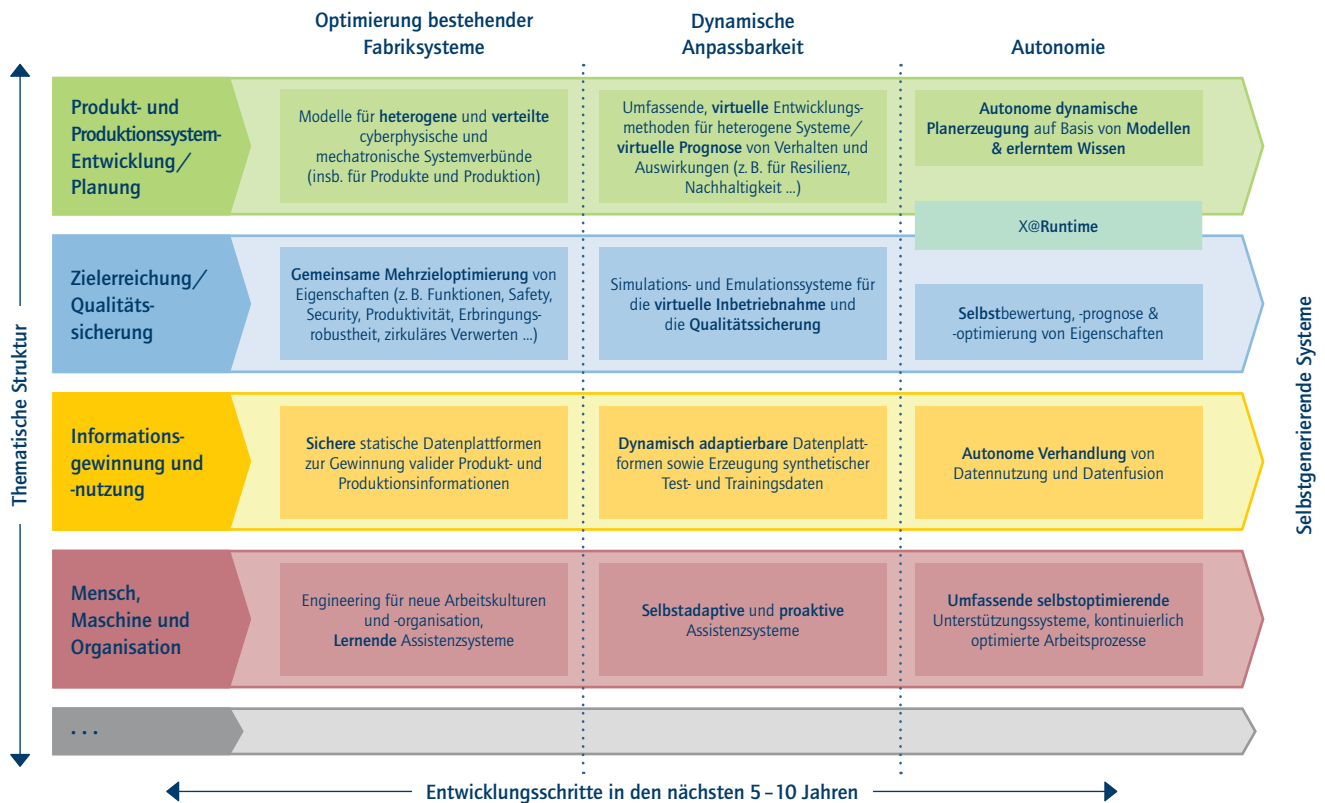
Um diese Herausforderungen konsistent zu adressieren, ist neben den vier vertieft behandelten Themensträngen (siehe die thematische Struktur auf der vertikalen Achse in der nachfolgenden Abbildung 5) ein ganzheitlicher Blick auf die vollständige Engineeringkette erforderlich. Dies umfasst die durchgängige Verzahnung aller Engineeringphasen: von der frühen Strategie- und Konzeptentwicklung über die Produkt- und Produktionssystemgestaltung bis zum Betrieb sowie der Instandhaltung und dem Recycling. Nur so lassen

sich Abhängigkeiten, Rückkopplungen und Optimierungspotenziale systematisch erkennen und nutzen.

Auch im Kontext des Virtual-First-Ansatzes sieht der Forschungsbeirat Industrie 4.0 offene Forschungs- und Entwicklungsbedarfe. Zwar lässt sich durch Rapid Prototyping die Entwicklung deutlich beschleunigen, jedoch ist bislang wenig dahingehend untersucht worden, in welchem Umfang Simulationen und virtuelle Abbilder Risiken in frühen Phasen wirklich minimieren können und welche methodischen Ansätze dafür nötig sind. Digitale Zwillinge bilden hier eine Schlüsseltechnologie: Sie ermöglichen nicht nur schnellere Entwicklungen und neue Lifecycle-Management-Ansätze, sondern eröffnen auch Geschäftsmodelle rund um die Monetarisierung von Daten und Wettbewerbsvorteilen aufgrund von neuartigem, individualisiertem Nutzenversprechen (vergleiche dazu auch die Roadmap „Geschäftsmodelle“ in Kapitel 3.2.1). Forschungs- und Entwicklungsbedarfe bestehen bei der systemübergreifenden Integration von Digitalen Zwillingen, etwa im Hinblick auf die Realisierung von kreislaufwirtschaftsfähigen Produkten. Diese schaffen neben Kostenvorteilen durch geringeren Ressourceneinsatz auch Vorteile für die Umwelt und Unabhängigkeit von Rohstofflieferanten (vergleiche dazu auch die Roadmap „Nachhaltigkeit“ in Kapitel 3.2.4). Für das Engineering rückt dabei zunehmend der Transfer von Daten zu zweckgebundenen Informationen in den Mittelpunkt. Erst wenn Daten in handlungsrelevante Erkenntnisse überführt werden, können Transparenz, wirksame Entscheidungen und kontinuierliche Verbesserungen realisiert werden. Der Informationsfluss, von der Datenerfassung über die Interpretation bis hin zur operativen Handlung, bildet eine zentrale Voraussetzung für resiliente, lernfähige und nachhaltige Produktionssysteme. Zudem gilt es das Industrial Metaverse weiterzuentwickeln, in dem übergeordnete Systemverbünde virtuell vernetzt und automatisierte Abstimmungs- und Regelungsprozesse realisiert werden. Dabei stehen die Implementierung und vorteilhafte Nutzung im Vordergrund.

Künstliche Intelligenz wird in allen Bereichen des Engineerings eine Schlüsselrolle einnehmen. Erste Anwendungen, etwa Co-Piloten für die automatische Anforderungserfassung oder Dokumentation, sind bereits verfügbar. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe bestehen jedoch bei komplexeren Aufgaben wie Text-to-Construction oder bei agentenbasierten, autonomen Planungs- und Ausführungsprozessen. Auf dem Shopfloor sieht der Forschungsbeirat weitere offene Fragen: Wie können softwarebasierte Module über autonome Agenten automatisiert gesteuert werden? Wie lassen sich Large Language Modelle sicher und nachvollziehbar in bestehende Fabrikssysteme integrieren, um die Mensch-Maschine-Interaktion flexibler und effizienter zu gestalten? Wie kann im industriellen Einsatz die Reproduzierbarkeit von Entscheidungen und die Wiederholgenauigkeit von Ergebnissen sichergestellt werden? Wo liegt die

Abbildung 5: Die Engineering-Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

Grenze zwischen wirksamer Unterstützung und potenzieller Überlastung der Mitarbeitenden (vergleiche dazu auch die Roadmap „Zukunft der Arbeit“ in Kapitel 3.2.3)?

Um diese Fähigkeiten zu erreichen, müssen geeignete Engineeringmethoden und -techniken für die Produkte und die Produktion verfügbar sein. Das betrifft insbesondere die **Produkt- und Produktionssystem-Entwicklung**, die Sicherstellung der erforderlichen **Zielerreichung**, die gestuft entwickelbaren Funktionsumfänge und die dazugehörigen neuen digitalen Formen der **Qualitätssicherung** (zunehmend auf dafür geeigneten digitalen Plattformen), die **Informationsgewinnung und -nutzung** und den Aspekt neuer **Arbeitskulturen** und **Arbeitsorganisationen**, einschließlich der optimalen Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine sowie der bestmöglichen Unterstützung des Menschen durch die Technik.

3.2.3 Roadmap Zukunft der Arbeit²³

Mit der Realisierung von Industrie 4.0 geht ein umfassender Transformationsprozess auf Seiten der Leistungserstellung und Leistungsausbringung einher. Im Zentrum von Industrie 4.0 steht seit Konzeption dieses industriellen Leitbilds der Mensch und eine

menschenzentrierte, soziotechnische Gestaltung von Unternehmen. Für die Leistungsausbringung gilt, dass ökonomische Ziele, wie eine souveräne und resiliente Wertschöpfung zur Erfüllung der Nachfrage, erreicht werden müssen. Gleichzeitig wird von den Unternehmen erwartet, eine nachhaltige Wertschöpfung umzusetzen (vergleiche dazu auch die Roadmap „Nachhaltigkeit“ in Kapitel 3.2.4). Auf der Seite der Leistungserstellung bringt die digitale Transformation einen tiefgreifenden Wandel der Arbeit und Unternehmensorganisation mit sich. Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 vermittelt in seiner Funktion wissenschaftsbasierte Grundlagen, auf deren Basis dieser Wandel unternehmensstrategisch und gesellschaftspolitisch gestaltet werden und sich an den Kriterien menschenorientierter System- und Arbeitsgestaltung orientieren kann.

Unternehmen, die erfolgreich Schritte bei der Implementierung von Industrie 4.0 gegangen sind, berichten, dass eine möglichst ganzheitliche Strategie für die Arbeits- und Organisationsgestaltung entscheidend ist. Diese muss an die Bedürfnisse und Interessen der Menschen angepasst sein. Nicht nur im Hinblick auf den Fachkräftemangel ist es von Bedeutung, die Attraktivität der Arbeit in der Industrie zu steigern. Akzeptanz und Motivation sind zentrale Stellhebel, da es die Beschäftigten und verschiedenen Führungsebenen

23 Die vollständige Roadmap „Zukunft der Arbeit“ kann unter www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/ unter dem Punkt „Roadmaps des Forschungsbeirats“ abgerufen werden.

sind, die den Wandel letztendlich umsetzen. Sowohl die Sensibilisierung und Aktivierung von Management und Führung als auch die Einbindung der Beschäftigten und sogenannte Tech Communication sind dafür notwendig, um den Wandel gemeinsam zu gestalten (vergleiche dazu auch die Roadmap „Engineering“ mit Fokus auf hochqualifizierte Arbeit in Kapitel 3.2.2). Wie dies unter den jeweiligen Voraussetzungen der kommenden Entwicklungsphase der industriellen Wertschöpfung optimal gelingt, muss weiter untersucht werden. Insbesondere in Hinblick auf die verstärkte Nutzung von KI kommt es zu neuen Aushandlungsprozessen von Leistungsnormen und der Abwägung von Produktivität und Qualität. Im hochqualifizierten Bereich des Engineerings zeigen Führungskräfte und Beschäftigte Unsicherheiten, wie viel Nutzung von KI sich als zielführend erweist – auch da diese für Führungskräfte oftmals intransparent ist. Risikomanagementstrategien müssen festlegen, bis zu welchem potenziellen Schaden der KI vertraut werden kann oder das Ergebnis zu kontrollieren ist – zum Beispiel in der Beschaffung, beim Vergleich von Angeboten. Schulungen für neue Werkzeuge wie KI sowie die Fähigkeit, Anwendungsmöglichkeiten und -bedarfe von neuen Technologien zu kommunizieren, erweisen sich als wesentliche Bausteine einer ganzheitlichen Strategie zur Arbeits- und Organisationsgestaltung.

Zentrale Aspekte für Forschungs- und Entwicklungsbedarfe im Kontext der Arbeit liegen aus Sicht des Forschungsbeirats Industrie 4.0 unter anderem in der Kompetenzentwicklung sowie der soziotechnischen Systemgestaltung in Hinblick auf die Mensch-Maschine-Interaktion. Sowohl im Bildungssystem als auch in Unternehmen mangelt es an Transparenz über den strategischen Kompetenzbedarf „Future Skills“ in der Industrie 4.0. Beschäftigte aller Segmente und Ebenen – inklusive Führungskräfte, Betriebsräte und Rechtsabteilungen – müssen neue Fähigkeiten erwerben, um den Umgang mit neuen Technologien und Anforderungen zu meistern. Für eine ganzheitliche Unternehmensstrategie benötigen Führungspersonen zudem die Kompetenzen, die Optionen und Grenzen neuer soziotechnischer Systeme technisch und strategisch einschätzen zu können. Mit Blick auf die zunehmende dynamische Anpassung von Unternehmen bis hin zu weitgehender Autonomie gilt es darüber hinaus, die Voraussetzungen (zum Beispiel in Bildungsinstitutionen), Methoden und das lebensbegleitende Lernen zu fördern. Vor diesem Hintergrund besteht zudem Bedarf an der Entwicklung neuer Formen von praxisorientiertem und individuellem Lernen, das unter anderem auf Basis von digitalen und intelligenten Lösungen sowie lernförderlicher Arbeitsumgebungen erfolgt. Auch wenn seit Beginn der Initiative zu Industrie 4.0 der Fokus auf der optimalen Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine sowie der angemessenen Unterstützung des Menschen durch die Technik liegt,²⁴ besteht aus Sicht des Forschungsbeirats Industrie 4.0 weiterhin großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf mit Blick auf die Zukunft. Diese betreffen insbesondere die Nutzung autonomer Systeme im

Zuge der „zweiten Welle“²⁵ der Digitalisierung, die es erforderlich machen, unterschiedliche Prozess- und Unternehmensbedingungen zu berücksichtigen. Dazu bedarf es umfassender Forschung und Entwicklung von digitalen und generativen KI-Technologien und ihrer Nutzung, unter anderem in der kollaborativen Robotik und bei Assistenzsystemen in der Industrie. Diese werden immer flexibler und intelligenter in die Prozesse integriert, um schnell und von selbst auf veränderte Anforderungen in der Produktion reagieren zu können. Dabei werden die Mensch-Maschine-Schnittstellen zum Beispiel durch Sprachsteuerung und Gestenerkennung zunehmend nutzerfreundlicher. Sicherheitsaspekte der Maschinen in der Interaktion mit Menschen hinsichtlich Reaktionen in Echtzeit, Zuverlässigkeit und Regulierung von Kraft sind zu entwickeln. Zukünftig soll es sich dabei um selbstlernende Systeme handeln, die sich auf Basis von KI und Big Data kontinuierlich selbst optimieren können. Zudem besteht frühzeitiger Bedarf an der Erforschung und Identifikation von möglichen Grenzen autonomer Systeme und einer Mensch-Maschine-Kollaboration durch ökonomische, funktionale und ethische Bewertungen und Anwendungsszenarien. Dabei sind auch juristische Fragen für die rechtssichere Umsetzung zu klären.

Die dazu notwendige Flexibilisierung und damit einhergehenden unterschiedlichen Stufen der Skalierung erfordern eine zunehmende Wandelbarkeit der Unternehmen (vergleiche dazu auch die Roadmap „Engineering“ in Kapitel 3.2.2). Dementsprechend unterscheidet die Roadmap drei Zeiträume innerhalb der kommenden zehn Jahre (auf der horizontalen Achse), die durch unterschiedliche Ziele für die Wandelbarkeit gekennzeichnet sind. An die Zeitspanne, die durch Forschungsarbeiten zur „Optimierung bestehender Arbeits- und Organisationsstrukturen“ sowie Technologiesysteme charakterisiert ist, schließt sich eine Zeitspanne an, in der die Forschung auf das Erreichen einer „dynamischen Anpassbarkeit“ abzielt.²⁶ Während Menschen auf Basis geeigneter Techniken den Wandel der Produktion und des Produktbetriebs gestalten und dabei die erforderlichen Eigenschaften sicherstellen, fokussiert die Forschung in der dritten Phase die Wandelbarkeit durch „weitgehende Autonomie“ der Produktion und der Produkte im operativen Betrieb. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass vollkommene „Autonomie“ in vielen Fällen nicht erstrebenswert sein wird. Vielmehr wird von Fall zu Fall in der Produktion oder mit Blick auf den Menschen für verschiedene Beschäftigungssegmente und Branchen zu prüfen sein, ob vollständige Autonomie beziehungsweise welcher Grad an Autonomie sinnvoll und zielführend ist. Ferner ist nicht davon auszugehen, dass sich die hier skizzierte Transformation vollkommen kontinuierlich und ohne Brüche vollzieht. Widerstände unter den Akteuren oder sich ändernde rechtliche, ökonomische und politische Rahmenbedingungen werden diesen Wandel beeinflussen und sind heute noch nicht absehbar. Insgesamt besteht ein übergreifender und tiefergehender Forschungsbedarf zu den

24 Vgl. Kagermann et al. 2013.

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

26 Vgl. Schuh et al. 2020.

Abbildung 6: Die Zukunft der Arbeit-Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Entwicklungsschritte in den nächsten 5 - 10 Jahren

Thematische Struktur

Quelle: eigene Darstellung

Fragen, warum die praktische Umsetzung von Industrie 4.0 in der Arbeits- und Systemgestaltung hinter den Erkenntnissen und Potenzialen zurückbleibt und welche Barrieren hier vorliegen.

Um die Fähigkeiten und Interessen der Menschen in einer sich dynamisch veränderbaren Produktion optimal zu fördern, bedarf es weitreichender Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in verschiedenen Themengebieten. Diese geben die inhaltliche Struktur auf der vertikalen Achse der Roadmap vor. Dazu gehören die Organisation der Unternehmen (zum Beispiel Führung, Organisationsstruktur und Administration), Mensch-Technik-Interaktion (zum Beispiel Assistenzsysteme, Zusammenarbeit von Mensch und Maschine oder Veränderungsmanagement) und die individuelle Arbeitsgestaltung (zum Beispiel Kompetenzen, Gesundheit und die Veränderung der Arbeit). Dabei werden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe nicht allgemeingültig, sondern spezifisch für verschiedene Fälle und Beschäftigungssegmente umzusetzen sein – wie in den unten ausgeführten Themenblöcken nur beispielhaft dargestellt werden kann.

3.2.4 Roadmap Nachhaltigkeit²⁷

Diese Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0 zur ökologischen Nachhaltigkeit unterstreicht die Dringlichkeit, dass die Industrie der Zukunft nur dann langfristig erfolgreich sein kann, wenn sie den fortschreitenden Klimawandel, die zunehmende Ressourcenknappheit, die steigenden Abfallströme sowie die damit verbundenen politischen Vorgaben und veränderten Verbraucherpräferenzen in den Mittelpunkt ihrer Strategien stellt und ökologische Nachhaltigkeit als zentrales Prinzip verankert. Gleichzeitig ergeben sich dadurch auch enorme Potenziale: Durch intensive Forschung und Entwicklung könnte Deutschland künftig eine Vorreiterrolle einnehmen und sich als Leitanbieter sowie Fabrikaurüster für Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft positionieren.

Diese Roadmap fokussiert sich auf die ökologische Nachhaltigkeit, insbesondere auch auf Aspekte der Kreislaufwirtschaft. Die Aspekte der ökonomischen und gesellschaftlichen Nachhaltigkeit werden hier bewusst ausgeklammert und in den Roadmaps „Geschäftsmodelle“ (siehe Kapitel 3.2.1) und „Zukunft der Arbeit“ (siehe Kapitel 3.2.3) adressiert. Dennoch bestehen zahlreiche Anknüpfungspunkte zu den anderen Roadmaps, die in den jeweiligen Themenblöcken der Roadmap erläutert werden.

Während im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit generell ein immenser Forschungs- und Entwicklungsbedarf existiert, fokussiert sich diese Roadmap auf Themen, bei denen Industrie 4.0 einen wesentlichen Beitrag leisten kann. Die Roadmap ist in folgende vier Themenbereiche eingeteilt, die bei der Nachhaltigkeitstransformation eine entscheidende Rolle spielen: Ressourceneffizienz und -substitution, Energieeffizienz und -flexibilisierung,

Umweltbilanzierung sowie kreislauffähige Produkte und Geschäftsmodelle. Für diese Themen werden Forschungsfelder entlang eines zeitlichen Verlaufs identifiziert, der sich wiederum in drei Abschnitte unterteilt. Der erste zeitliche Abschnitt fokussiert sich in allen thematischen Bereichen darauf, die notwendigen Grundlagen zu schaffen. Danach liegt der Fokus darauf, Daten zu teilen und Systeme zu optimieren, um schließlich im letzten Schritt zu beforschen, wie eine umfassende Transformation hin zur Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft erreicht werden kann. Im Folgenden werden schlaglichtartig einige besonders relevante Forschungs- und Entwicklungsbedarfe aus der Roadmap beschrieben.

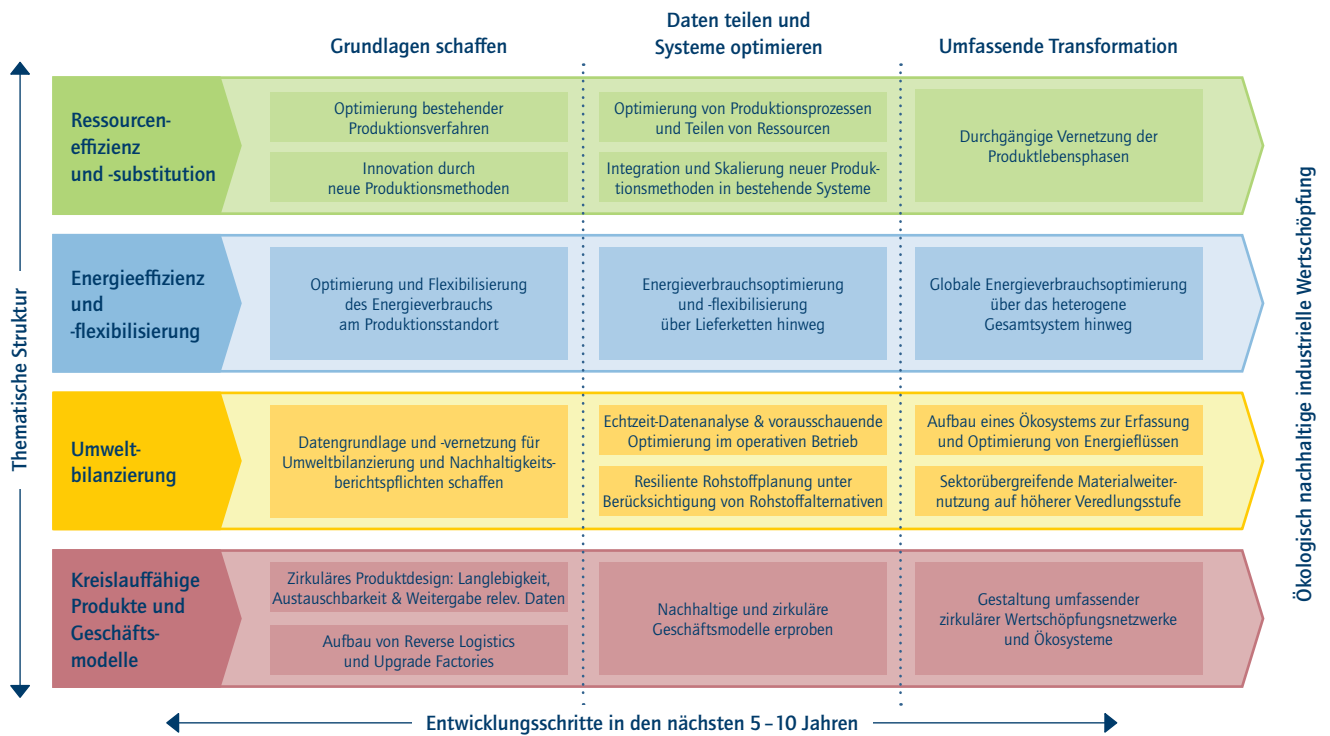
Die digitale Transformation in der Wirtschaft und die damit verbundenen Technologien leisten einen entscheidenden Beitrag, die Effizienz bestehender Produktionsverfahren zu steigern und die Entwicklung innovativer und nachhaltiger Produktionsmethoden wie additive Fertigung und Leichtbau voranzutreiben. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe bestehen insbesondere bei der KI-gestützten Optimierung des Materialeinsatzes, bei zerstörungsfreien Prüf- und Zertifizierungsmethoden für die additive Fertigung sowie bei der nutzungsbegleitenden Verschleißerkennung in Verbindung mit austauschfreundlichem Produktdesign. Neben optimierten Fertigungsmethoden bietet eine lückenlose digitale Vernetzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette große Ressourceneinsparungspotenziale und es sollte weiter beforscht werden, wie durch digitale Zwillingnetzwerke und digitale Produktpässe eine solche effektive Vernetzung erreicht werden kann. Notwendige Bedingung für diese lückenlose digitale Vernetzung ist die breite Umsetzung interoperabler Schnittstellenstandards. Darüber hinaus sollte über Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten untersucht werden, inwiefern das Teilen von Ressourcen, wie Personal, Infrastruktur, Maschinen oder Materialien, unter bestimmten Bedingungen die Resilienz und Nachhaltigkeit von Unternehmen, beispielsweise in Krisensituationen, steigern kann.

Insbesondere durch die Verknüpfung von Industrie 4.0 und der Biotechnologie entstehen neue Innovationsräume, die disruptive Ansätze hervorbringen – zum Beispiel die Substitution von energieintensiven, industriellen Prozessen durch nachhaltigere Alternativen. Solche konvergierenden Technologien gilt es in den kommenden Jahren intensiv zu monitoren und zu beforschen, da sie das Potenzial mit sich bringen, Produktionsmethoden grundlegend zu transformieren und der deutschen Industrie einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen.

Die Optimierung und Flexibilisierung des Energieverbrauchs sowohl am Produktionsstandort als auch über Lieferketten und heterogene Gesamtsysteme hinweg ist entscheidend, um den Standort Deutschland gleichzeitig wettbewerbsfähig und ökologisch nachhaltig zu gestalten. Besonders wichtig ist es zu erforschen, wie lokale Energieregulungen, die beispielsweise für smarte Produkte genutzt werden, mit den globalen Regelungen auf der Ebene der

²⁷ Die vollständige Roadmap „Nachhaltigkeit“ kann unter www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/ unter dem Punkt „Roadmaps des Forschungsbeirats“ abgerufen werden.

Abbildung 7: Die Nachhaltigkeits-Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

gesamten Fabrik oder über mehrere Produktionsstandorte hinweg sowie in einem Gesamtsystem von Industrie und Energieversorgern kombiniert werden können. Dabei gilt es auch zu berücksichtigen, dass mit dem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien auch die Volatilität der Stromverfügbarkeit steigt. Da heutige Produktionsmethoden nur bedingt eine flexible Energieaufnahme erlauben, besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowohl bei flexibleren Produktionsweisen und lokalen Energiespeichern als auch bei tragfähigen Geschäftsmodellen sowie der Anpassung politischer Rahmenbedingungen und des Energiegesamtsystems.

Im Themenbereich Umweltbilanzierung, also der systematischen Erfassung und Bewertung der Umweltwirkungen eines Produkts oder Prozesses über den gesamten Lebenszyklus sowie bei den damit verbundenen Nachhaltigkeitsberichten von Unternehmen, besteht derzeit ebenfalls noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Denn einerseits ist die wirklichkeitsgetreue Ermittlung des ökologischen Fußabdrucks von industriellen Produkten und Prozessen über den gesamten Wertschöpfungskreislauf heute noch kaum möglich. Andererseits sind die Erfassung und Weitergabe dieser Informationen sehr aufwendig und können zukünftig nur dann wirtschaftlich gestaltet werden, wenn sie einen hohen Grad der Automatisierung aufweisen. Das übergeordnete Ziel ist dabei der Aufbau eines umfassenden digitalen Ökosystems zur Vernetzung von Energieerzeugern und -verbrauchern. Die Weiterentwicklung von digitalen Zwillingen, Produktpässen und Datenräumen, die

einen schnellen, sicheren und präzisen Austausch relevanter Informationen ermöglichen, gilt es daher in diesem Kontext intensiv zu beforschen. Weiterhin gilt es die durchgängige Interpretierbarkeit der Daten bei der Vernetzung sicherzustellen.

Schließlich spielt die vernetzte Wertschöpfung eine Schlüsselrolle beim Aufbau einer umfassenden Kreislaufwirtschaft in Deutschland, in der Produkte und Komponenten möglichst lange genutzt und Stoffkreisläufe effizient geschlossen werden. Entscheidend dafür sind ein hoher Vernetzungsgrad zwischen den Akteuren sowie flexible, wandelbare Produktionsanlagen, die in sogenannten Upgrade Factories automatisierte Rückführungsprozesse und Reparaturen ermöglichen – beides Kernelemente von Industrie 4.0, die deutlich machen, dass Kreislaufwirtschaft ohne die Einführung von Industrie 4.0-Technologien bzw. -Lösungen kaum realisierbar ist. Zu erforschen sind insbesondere KI-gestützte Methoden zur Produktidentifikation, die sichere Bereitstellung umfassender Produktinformationen über digitale Produktpässe sowie der Einsatz Digitaler Zwillinge zur individuellen Optimierung der Lebenszyklen von Produkten, Maschinen und Anlagen. Daneben sollte untersucht werden, wie die Entwicklung serviceorientierter Geschäftsmodelle, bei denen Produkte zunehmend mit Dienstleistungen verknüpft werden, die ökologische Nachhaltigkeit fördern kann, da der enge Kontakt zwischen Hersteller und Kunde bereits in Konstruktion und Nutzung nachhaltige Ansätze ermöglicht (siehe dazu auch die Roadmap „Geschäftsmodelle“ in Kapitel 3.2.1).

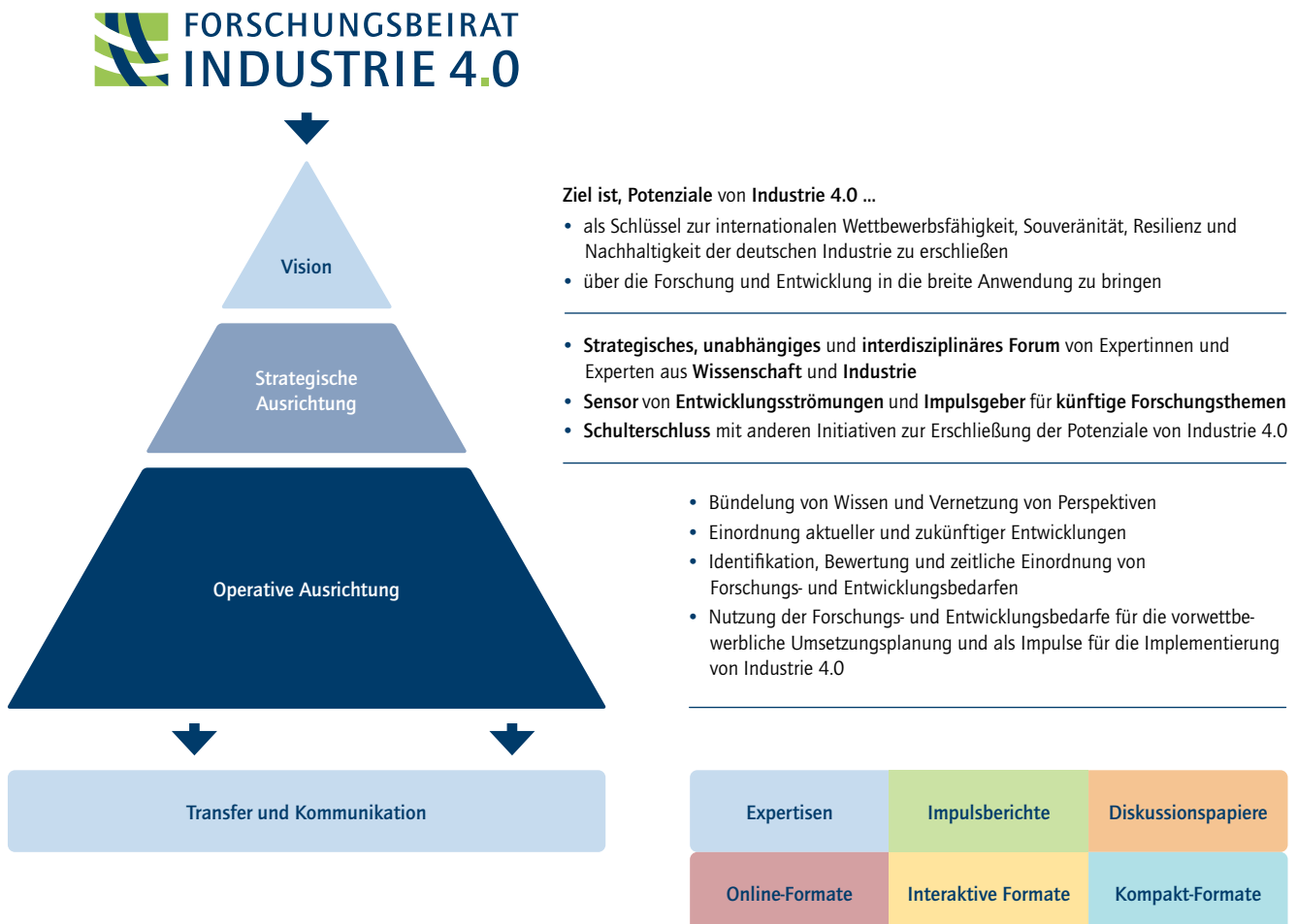
4 Mission und Wirkung des Forschungsbeirats Industrie 4.0

Der Zweck des in Kapitel 2 dargestellten Industrie 4.0-Zielbilds und insbesondere der in Kapitel 3 vorgestellten Themen-Roadmaps liegt nicht nur darin, dem Forschungsbeirat einen „roten Faden“ für die inhaltliche Arbeit über die verschiedenen Formate, wie Expertisen, Impulsberichte und weitere Publikations- und Interaktionsmaßnahmen zu bieten. Vor allem geht es auch darum, den relevanten Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik und somit auch den thematisch involvierten (Bundes-)Ministerien eine Orientierung über die zukünftig zu fokussierenden Themenkomplexe im Forschungs- und Entwicklungsbereich zu liefern und gleichzeitig die Kommunikation und Abstimmung mit und zwischen den Stakeholdern zu vereinfachen. Zudem können diese Arbeiten eine Grundlage für die komplementäre, synergetische Kollaboration zwischen dem Forschungsbeirat und weiteren thematisch relevanten Initiativen, Gremien und Plattformen wie etwa der Plattform

Industrie 4.0 darstellen. Die in diesem Kapitel adressierte Mission des Forschungsbeirats Industrie 4.0 beschreibt dessen Selbstverständnis und Wirkungsweise – das heißt es wird erläutert, wie dieses Gremium seine Ziele erreichen will und welche Strukturen, Kompetenzen und Aktivitäten dazu notwendig sind.

Im Folgenden werden dazu der Forschungsbeirat Industrie 4.0, seine Vision und strategische sowie operative Ausrichtung dargestellt. Darüber hinaus wird erläutert, wie die Aktivitäten und Ergebnisse des Forschungsbeirats über eine dedizierte Disseminationsstrategie in konkreten Kommunikationsaktivitäten und dem Ergebnistransfer münden. Die nachstehende Abbildung 8 soll in einem Überblick die Struktur dieses Kapitels zur Mission des Forschungsbeirats Industrie 4.0 darstellen und gleichzeitig die Kernaspekte zur Vision, Ausrichtung und Wirkung dieses Gremiums aufzeigen.

Abbildung 8: Vision und Ausrichtung des Forschungsbeirats Industrie 4.0



4.1 Der Forschungsbeirat Industrie 4.0: Führende Kompetenz aus Wissenschaft und Wirtschaft

Der Forschungsbeirat vereint 21 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie 12 Vertreterinnen und Vertreter der Industrie und von Industrieverbänden (Stand: Januar 2026) aus den Fachbereichen Produktion und Logistik, Automation, Informatik, Künstliche Intelligenz und Machine Learning, Ökonomie sowie Recht und Soziologie. Durch die Einbindung zahlreicher Perspektiven und Disziplinen, die sich gleichberechtigt einbringen, ergibt sich ein repräsentatives Expertengremium, das sich zudem durch die wissenschaftliche Exzellenz und die Expertise in der Innovation aus weltweit führenden Unternehmen auszeichnet. Die Zusammenarbeit und der interdisziplinäre Austausch zwischen den Mitgliedern schaffen Synergien und ermöglichen Ergebnisse, die über die Summe einzelner Kompetenzen bzw. Expertisen hinausgehen. Insbesondere in der vorwettbewerblichen Kooperation von Wissenschaft und Wirtschaft liegt eine Stärke dieses Gremiums. Der Forschungsbeirat verfügt über die notwendige Unabhängigkeit, schnell und wissenschaftlich fundiert auf aktuelle Trends zu reagieren, auch kritische Themen offen anzusprechen sowie gezielte Impulse für die Weiterentwicklung von Industrie 4.0, insbesondere im Kontext der Forschung, zu setzen. Die Industrie ist in der Lage, zum Beispiel neueste Entwicklungen und wissenschaftliche Ergebnisse für die Praxis einzuordnen und auf Relevanz und Durchführbarkeit zu

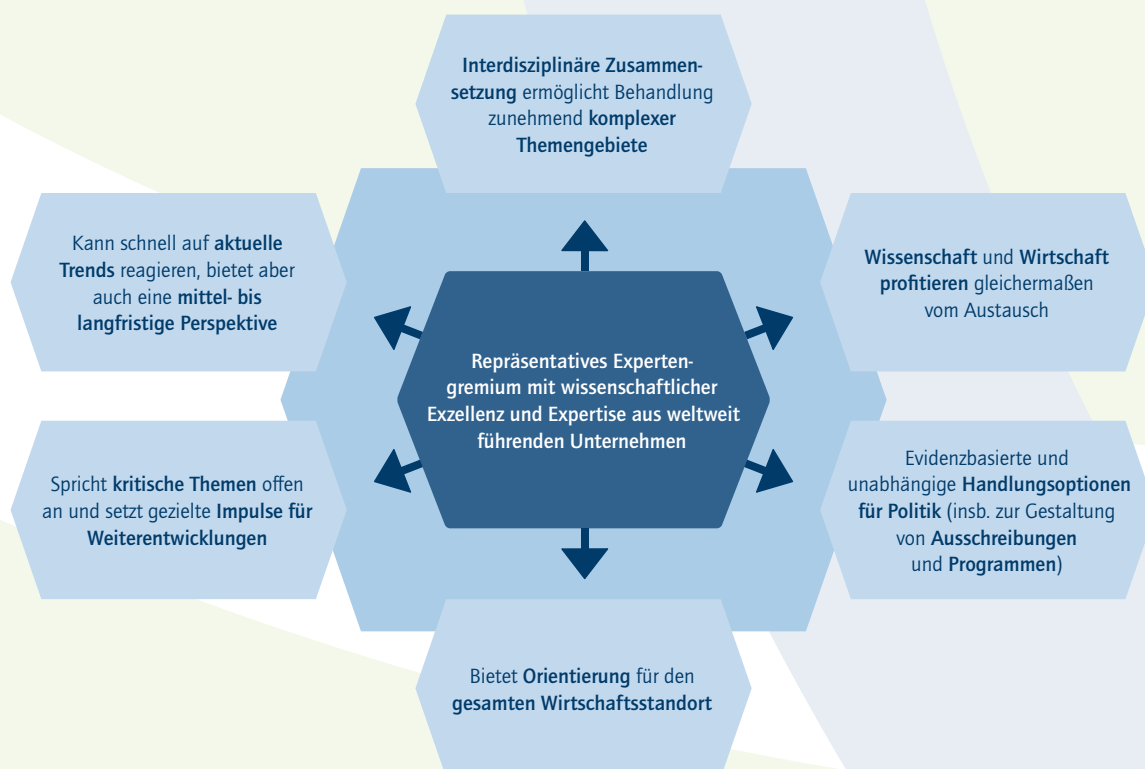
prüfen. Die Wissenschaft kann ihre Aktivitäten dementsprechend ausrichten und darüber hinaus Orientierung über zukünftige Entwicklungen für die Industrie bieten. Die Politik erhält eine evidenzbasierte und unabhängige Grundlage für Themenplatzierungen und Handlungsoptionen. Die Mehrwerte des Forschungsbeirats sind in Abbildung 9 übersichtlich dargestellt.

Ein Sprecherteam, das aus dem Kreis der Forschungsbeiratsmitglieder gewählt wird, moderiert unter anderem die Arbeit des Gremiums und repräsentiert es nach außen. Es trifft unter anderem Entscheidungen für die Ausrichtung des gesamten Gremiums und ist erste Kontaktoption für die Öffentlichkeitsarbeit. Das vierköpfige Sprecherteam besteht aus jeweils einem Sprecher beziehungsweise einer Sprecherin aus Wissenschaft und Wirtschaft sowie der jeweiligen Stellvertretung. Dadurch wird gewährleistet, dass alle Mitglieder des Forschungsbeirats Industrie 4.0 aus dem akademischen Bereich sowie auch die Vertreterinnen und Vertreter aus Industrie und Wirtschaftsverbänden adäquat repräsentiert werden.

4.2 Vision und strategische Ausrichtung

Die Mitglieder des Forschungsbeirats verfolgen eine gemeinsame Vision: Die industrielle Wertschöpfung auch zukünftig zu erhalten und zu fördern, denn sie ist nicht nur ein zentraler Treiber für ökonomisches Wachstum, sondern auch für Innovationskraft, und

Abbildung 9: Mehrwert des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

deshalb essenziell für Deutschland. Damit bildet sie einen grundlegenden Baustein für den langfristigen Erhalt des Wohlstands, zukünftige Prosperität und die Lösung gesellschaftspolitischer Herausforderungen. Industrie 4.0 soll im Zentrum der industriellen Wertschöpfung von morgen stehen. Dem Zielbild von Industrie 4.0 folgend (siehe Kapitel 2), ist diese der Schlüssel für internationale Wettbewerbsfähigkeit, Souveränität, Resilienz und Nachhaltigkeit. Forschung und Entwicklung bieten die Grundlage, um dann auch Unternehmen in der praktischen Umsetzung und Anwendung von Industrie 4.0-Lösungen zu befähigen. Auf Basis agiler, selbstgenerierender, menschenzentrierter und nachhaltiger Lösungen in digitalen Ökosystemen soll eine umfassende und vollständige Realisierung von Industrie 4.0 gelingen.

Vor dem Hintergrund dieser Vision versteht sich der Forschungsbeirat Industrie 4.0 als eine zentrale, unabhängige und interdisziplinäre Instanz für forschungsbasierte Themen zur industriellen Wertschöpfung mittels Industrie 4.0-Lösungen. Der Forschungsbeirat ist als strategisches, vorwettbewerbliches und forschungsorientiertes Forum von Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie sowohl Sensor von Entwicklungsströmungen als auch Impulsgeber für künftige Forschungsthemen: Als **Sensor** von Entwicklungspfaden beziehungsweise -strömungen hinsichtlich Industrie 4.0 beobachtet und bewertet der Forschungsbeirat die Transformation der industriellen Wertschöpfung in mittel- bis langfristiger Perspektive. Dabei identifiziert er nicht nur die technologischen Neuerungen, sondern auch deren wechselseitigen Einflüsse in Wissenschaft und wirtschaftlicher Praxis. Als **Impulsgeber** für künftige Forschungs- und Entwicklungsthemen formuliert er neue, vorwettbewerblich beantwortbare Forschungsimpulse. Diese können den (Bundes-)Ministerien als unabhängige Orientierungshilfe für zukünftige Ausschreibungen in der Forschungsförderung dienen. Darüber hinaus kann er Handlungsoptionen für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung aufzeigen.

Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 als interdisziplinäres, unabhängiges Forum mit Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie adressiert Forschungseinrichtungen, Unternehmen, die Politik mit den relevanten (Bundes-)Ministerien und weitere Industrie 4.0-Stakeholder (wie zum Beispiel Verbände) als Zielgruppen. Dabei sucht er auch aktiv den Schulterschluss mit weiteren Initiativen, Gremien und Plattformen mit komplementären strategischen oder thematischen Schwerpunktsetzungen, wie beispielsweise die Plattform Industrie 4.0²⁸, die Initiative Next Level Mittelstand²⁹ oder die Plattform Lernende Systeme³⁰. Ziel ist es, einen

konstruktiven Austausch zu fördern und die im Forschungsbeirat vorhandene Expertise zu Industrie 4.0 mit dem Wissen von Expertinnen und Experten mit anderen thematischen Schwerpunkten zusammenzuführen, um Synergien zu schaffen und damit die Potenziale von Industrie 4.0 zur umfassenden Entfaltung zu bringen. So sollen mit einer strategischen Herangehensweise neben inkrementellen Innovationen auch mutige und disruptive Entwicklungen ermöglicht werden.

4.3 Operative Ausrichtung des Forschungsbeirats Industrie 4.0

Um seine Vision und strategische Zielsetzung zu erreichen, verfolgt der Forschungsbeirat mehrere Ansätze zur Operationalisierung dieser Ziele. Einerseits muss bestehendes Fachwissen aus unterschiedlichen Kreisen zusammengeführt und durch das unabhängige Gremium aufbereitet werden. Es gilt, aktuelle Entwicklungen zu analysieren, einzuordnen und zu bewerten. Mit Blick in die Zukunft müssen außerdem Forschungs- und Entwicklungsbedarfe identifiziert werden. Davon soll auch die vorwettbewerbliche Umsetzungsplanung und die erfolgreiche Implementierung von Industrie 4.0 in der Praxis profitieren. Um die Ziele zu erreichen, bedarf es eines Austauschs beziehungsweise einer zielgruppengerechten Kommunikation mit unterschiedlichen Industrie 4.0-Akteuren.

Die **Bündelung von Wissen und Vernetzung von Perspektiven** ist essenziell, um Innovationsprozesse anzustoßen. Komplexe industrielle Lösungen erfordern eine systemische und disziplinübergreifend integrative Perspektive, auf die der Forschungsbeirat daher ein besonderes Augenmerk legt. Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 schöpft dabei aus dem neuesten Wissenstand führender Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft. Er bringt die unterschiedlichen Perspektiven zusammen, verdichtet diese und stellt sie in aufbereiteter Form für Stakeholder, wie Unternehmen und politische Entscheidungsträger, bereit. Damit leistet er einen Beitrag zur Integration fragmentierter Wissensbestände in kohärente und unabhängige Handlungsoptionen. Diese Synergien ergeben sich auch aus dem Diskurs mit Expertinnen und Experten über den Forschungsbeirat hinaus, der für das Gremium von großer Bedeutung ist. Somit ist auch die Einbeziehung internationaler Expertinnen und Experten und die internationale Zusammenarbeit für die Förderung der vernetzten Wertschöpfung im europäischen und globalen Kontext Teil der Ausrichtung des Forschungsbeirats Industrie 4.0. Die ganzheitliche Betrachtung durch die Einbindung verschiedener Disziplinen und Domänen ermöglicht zudem eine strategische Ausrichtung,

28 Der Forschungsbeirat agiert in seiner strategischen Ausrichtung komplementär zur Plattform Industrie 4.0. Während die Plattform sich darauf fokussiert, anwendungsnahe Themen in die Umsetzung zu bringen, blickt der Forschungsbeirat über die Implementierungsthemen hinaus weiter in die Zukunft und identifiziert Forschungsfragestellungen mit einem längeren Zeithorizont. Vgl. dazu Plattform Industrie 4.0 2026.

29 Die Initiative Next Level Mittelstand ist aus der Plattform Industrie 4.0 heraus entstanden und richtet ihren Fokus speziell auf Umsetzungsthemen für KMU. Vgl. dazu Next Level Mittelstand 2026.

30 Künstliche Intelligenz bildet den thematischen Schwerpunkt der Plattform Lernende Systeme. Aufgrund der hohen Interdependenz zwischen den Themenfeldern KI und Industrie 4.0 bestehen zahlreiche thematische und personelle Anknüpfungen. Vgl. dazu Plattform Lernende Systeme 2026.

die neben inkrementellen Innovationen auch die Perspektive für disruptive Entwicklungen erweitert – wie die Wertschöpfung in dynamischen und digital vernetzten Wertschöpfungsketten oder die Konvergenz von Technologien für die industrielle Wertschöpfung.

Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 hat sich außerdem die **Einordnung aktueller und zukünftiger Entwicklungen** zur Aufgabe gemacht. So geht es zum Beispiel darum, einen Blick auf aktuelle Technologien, Anwendungen und Geschäftsmodelle sowie Entwicklungen, die sich gerade erst abzeichnen, zu werfen. Im Zuge dessen werden Relevanz, Chancen und Risiken aufgezeigt, Lösungswege skizziert und zukünftige Wertschöpfungspotenziale identifiziert, die langfristig einen entscheidenden Beitrag zur industriellen Entwicklung leisten können. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Monitoring der Konvergenz von Technologien und insbesondere der Schlüsseltechnologien der Hightech-Agenda der Bundesregierung.³¹ Technologische Möglichkeiten sollen nicht isoliert, sondern in systemischen Zusammenhängen betrachtet werden. Von zentraler Bedeutung sind unter anderem die rasanten Fortschritte im Bereich Künstlicher Intelligenz. Die zunehmende Verknüpfung von Daten, KI sowie neuen Kommunikations- und Simulationstechnologien eröffnet innovative und weitreichende Möglichkeiten im Kontext von Industrie 4.0. Darüber hinaus können etwa durch die Kombination der Fortschritte in den Bereichen Quantentechnologien oder Biologisierung mit bestehenden Industrie 4.0-Ansätzen vollkommen neue, disruptive Industriebereiche, Anwendungsfelder oder Produkte entstehen und damit langfristige neue Wertschöpfungspotenziale in Deutschland gesichert werden.

Auf Basis der Bündelung von Wissen, Kompetenzen und der Einordnung aktueller und zukünftiger Entwicklungen führt der Forschungsbeirat Industrie 4.0 die **Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsbedarfen** durch – wie etwa in der aktualisierten Version der „Themenfelder Industrie 4.0“.³² Handlungsleitend sind dabei insbesondere die vier Themenfelder:

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

In diesem Rahmen erfüllt der Forschungsbeirat Industrie 4.0 auch seine Funktion als Sensor und Impulsgeber. Für eine Orientierung

im zeitlichen Ablauf dient die übergreifende bzw. konsolidierte Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0 (siehe Kapitel 3.1) sowie die Themenblöcke in den spezifischen Roadmaps, die als Verfeinerung dienen (siehe Kapitel 3.2). Ausgehend von diesen Themenblöcken sind die Forschungsschwerpunkte noch weiter zu erarbeiten und bis hin zu konkreten Forschungsarbeiten detailliert aufzubereiten. Auf dieser Basis lassen sich Handlungsoptionen für die Wissenschaft und die Forschungs-, Technologieentwicklungs- und Innovationspolitik ableiten. So dienen diese Ergebnisse auch den im Kontext der Industrie 4.0 und der damit einhergehenden vernetzten Wertschöpfung involvierten (Bundes-)Ministerien zur Orientierung und können als unabhängige Wissensgrundlage für neue Ausschreibungen genutzt werden. Dabei lassen sich aus den Roadmaps Implikationen für verschiedene Ressorts folgern.

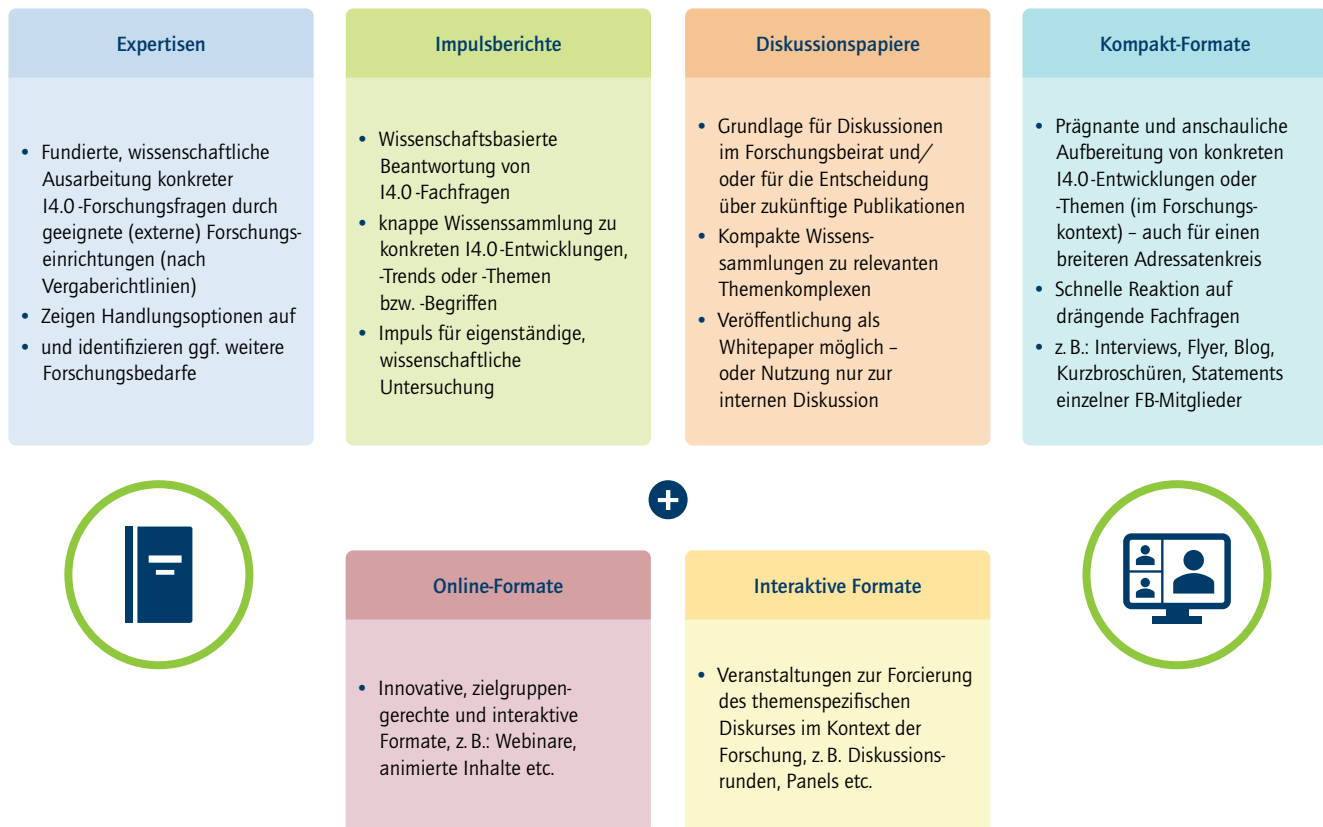
Die **Forschungs- und Entwicklungsbedarfe** können darüber hinaus **für die vorwettbewerbliche Umsetzungsplanung und als Impulse für die Implementierung von Industrie 4.0** dienen. Diese können nicht nur Potenziale zur Optimierung und Innovation von Fertigungsprozessen und Geschäftsmodellen schaffen. Vielmehr bestehen auch Chancen für die Fortentwicklung methodischer Ansätze zum Engineering und zur gezielten Implementierung von Industrie 4.0. Die umfassende Einführung von Industrie 4.0 ist derzeit eine entscheidende Herausforderung für Akteure aus der Wirtschaft und für die Plattform Industrie 4.0. Begleitet werden sollte diese durch Forschungen zur soziotechnischen Gestaltung der Systeme³³ und zur Weiterentwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen. So kann der Forschungsbeirat Industrie 4.0 nicht nur die Forschung an neuen Technologien fördern, sondern zugleich die methodische Grundlage schaffen, wie Innovation tatsächlich zu mehr Produktivität und Souveränität führt. Daraus ergibt sich das Potenzial, Deutschland bei der Entwicklung von einem „Technologieexporteur“ hin zu einem „Verwendungsarchitekten“ zu unterstützen. Aus der Umsetzung in der Breite der Wirtschaft werden wiederum neue Forschungs- und Entwicklungsbedarfe entstehen, die der Forschungsbeirat Industrie 4.0 aufgreift. Im Hinblick auf die Praxisrelevanz für Unternehmen, legt der Forschungsbeirat ein Augenmerk auf die besonderen Bedürfnisse der kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU). Diese nehmen eine gewisse Sonderstellung ein, denn Deutschland verfügt über eine große Anzahl an KMU, die als Hidden Champions und Weltmarktführer in zahlreichen Industriebranchen über sehr spezifisches Domänenwissen verfügen. Als zentrale Instanz zur Orientierung kann der Forschungsbeirat dazu beitragen, dieses Wissen um die aktuellen Erkenntnisse aus der Industrie 4.0-Forschung zu ergänzen und so KMU den Einstieg in die digitalisierte Produktion zu erleichtern.

31 Vgl. BMFTR 2025.

32 Vgl. Forschungsbeirat/acatech 2022b.

33 Ein soziotechnisches System wird definiert als „das Zusammenwirken von Beschäftigten, Technologien (Maschinen, Anlagen, Systemen) und Arbeitsorganisation, um eine Arbeitsaufgabe auszuführen“ (Kagermann et al. 2013, S. 87). Eine soziotechnische Gestaltungsperspektive meint die Abkehr von der Radikalisierung des tayloristischen Leitprinzips (kurzykliche, hoch standardisierte, monotone Arbeitsvollzüge) hin zu einer Orientierung, die technische und ökonomische Entwicklungsziele mit verlässlichen Grenzen der Arbeit und realistische Work-Life-Balance-Optionen für Beschäftigte verbindet (ebd. S. 57 f.).

Abbildung 10: Publikationsformate des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Quelle: eigene Darstellung

4.4 Kommunikation und Transfer

Ein wichtiger Mehrwert des Forschungsbeirats Industrie 4.0 liegt in der zielgruppengerechten Kommunikation und dem Ergebnistransfer, die über die Operationalisierung einer dedizierten Disseminationsstrategie realisiert werden. Dabei nutzt der Forschungsbeirat ein Spektrum verschiedener Formate und Verbreitungskanäle für einen zielgruppenspezifischen Transfer unterschiedlicher Inhalte. Die erarbeiteten Ergebnisse, Forschungsbedarfe und Handlungsoptionen sollen perspektivisch auch eine erfolgreiche Umsetzung des Zielbildes Industrie 4.0 ermöglichen. Sie richten sich an Forschungseinrichtungen, an Unternehmen jeglicher Größe (von Start-up und KMU bis hin zu Großkonzernen), an Verbände sowie an die Politik und an weitere Industrie 4.0-Interessengruppen.

Zu den klassischen, schriftlichen Publikationsformaten gehören neben (internen) Diskussionspapieren unter anderem auch sogenannte Impulsberichte für Stellungnahmen zu Fachfragen und zur Eruierung von richtungsweisendem Input für weitere wissenschaftliche Untersuchungen, wie sie in den Roadmaps zu Industrie 4.0 thematisiert werden. Die Beantwortung von zentralen inhaltlichen Fragestellungen und die Bündelung von Wissen beziehungsweise Kompetenzen, um wissenschaftlich fundierte Orientierung und Handlungsoptionen zu geben, wird von den Mitgliedern des Forschungsbeirats und der aca-tech Geschäftsstelle erarbeitet. Ergänzt werden diese durch die Reihe „Industrie 4.0 Forschung in Kürze“, die spezifische Industrie 4.0-Forschungsthemen in einem kompakten Format behandelt. Dabei wird

eine konkrete Fragestellung prägnant, wissenschaftlich basiert und gestützt durch ansprechende, das heißt plakative Grafiken anschaulich beantwortet. Ferner kann der Forschungsbeirat mit dem Publikationsformat „Expertise“ themenspezifische Inhalte durch Erkenntnisse externer wissenschaftlicher Einrichtungen erweitern, um tiefere Einblicke in spezielle Fachthemen zu ermöglichen. Neben weiteren, auch onlinebasierten Publikationsformaten, die insbesondere den Diskurs von Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft im Kontext von Industrie 4.0 forcieren (für eine zusammenfassende Übersicht über die derzeit verfolgten Publikationsformate des Forschungsbeirats Industrie 4.0 siehe Abbildung 10), richtet der Forschungsbeirat verschiedene physische und virtuelle Veranstaltungen aus. Für die Umsetzung des Zielbildes Industrie 4.0 auf strategischer Ebene dient zum Beispiel das Format „Spitzendialog“. Hier tauschen sich renommierte Entscheiderinnen und Entscheider aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik über richtungsweisende Forschungs- und Entwicklungsperspektiven im Kontext von Industrie 4.0 aus.

Die Ergebnisse aus der Arbeit des Forschungsbeirats (beispielsweise über Impulsberichte, Expertisen und weitere Formate) werden gebündelt mit Führungspersönlichkeiten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik besprochen, um so richtungsweisende Handlungsoptionen für Entscheiderinnen und Entscheider zu geben. Im Anschluss erfolgt eine Dissemination der erarbeiteten Inhalte, Erkenntnisse und Handlungsoptionen zielgruppengerecht über die Webseite des Forschungsbeirats Industrie 4.0, über die Fach- und Tagespresse, Journale sowie über verschiedene Social-Media-Kanäle.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Intention dieses Strategiepapiers ist es, neben der Skizzierung eines Industrie 4.0-Zielbilds für die nächsten fünf bis zehn Jahre die dafür relevanten beziehungsweise erforderlichen Themenbereiche und -blöcke für die vielfältigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe im Kontext von Industrie 4.0 zu benennen. Die Themenkomplexe in den insgesamt fünf Roadmaps adressieren übergreifende Forschungs- beziehungsweise Entwicklungsfragestellungen sowie deren zeitliche Einordnung beziehungsweise Abfolge, ohne jedoch den Zeitpunkt der Verfügbarkeit der Ergebnisse a priori festzulegen.

Darüber hinaus beschreibt das Strategiepapier die zentrale Rolle und die maßgebende Relevanz des Forschungsbeirats Industrie 4.0 zur Erreichung des Zielbilds beziehungsweise zur Adressierung der Themenbereiche und -blöcke über die Identifikation und Ausarbeitung der relevanten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe. Zudem wird aufgezeigt, wie konkret der Forschungsbeirat die dafür notwendigen Schritte auf vielfältige Weise unterstützt. Im Folgenden werden die wichtigsten Kernaussagen und Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel kurz zusammengefasst. Seit der erstmaligen Vorstellung von Industrie 4.0 gegenüber einer breiten Öffentlichkeit im Jahr 2011 haben Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam bedeutende Fortschritte erzielt und durch die fortschreitende Digitalisierung unterschiedliche Aspekte von Industrie 4.0 umgesetzt. Dennoch sind zahlreiche Potenziale der vernetzten industriellen Wertschöpfung noch unerschlossen – diese gilt es nun gezielt zu heben. Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 hat sich zum Ziel gesetzt, diese Potenziale zu erschließen und über die Forschung und Entwicklung in die breite Anwendung zu bringen.

Die Ziele von Industrie 4.0 gehen dabei über die reine Steigerung von Effizienz und Produktivität hinaus. Es gilt, die industrielle Wertschöpfung in Deutschland zu sichern beziehungsweise auszubauen und über die zusätzliche Hebung von Differenzierungspotenzialen den Wohlstand langfristig zu gewährleisten. Konkret lässt sich das Zielbild von Industrie 4.0 in vier übergeordnete Zielrichtungen fassen: die Sicherung und Stärkung der globalen Wettbewerbsfähigkeit, die Erreichung eines höheren Grades an Resilienz, die Realisierung der Nachhaltigkeitsziele sowie die Sicherstellung einer gesteigerten technologischen und insgesamt strategischen Souveränität.

Die digital vernetzte industrielle Wertschöpfung im Kontext von Industrie 4.0 trägt in entscheidendem Maß zur Erreichung dieses Zielbilds bei. Agile Unternehmen können durch den flächendeckenden Einsatz etablierter interoperabler Schnittstellenstandards durchgehend Daten teilen und interpretieren. Mit Hilfe von Industrie 4.0-Technologien beziehungsweise -Lösungen können sie sich somit schnell an veränderte Bedingungen anpassen und in dynamischen, digitalen Ökosystemen mit anderen Akteuren kooperieren beziehungsweise kollaborieren. Dabei ist es jedoch erforderlich, die technologische und digitale Souveränität des Landes gezielt in den Fokus zu stellen: Vertikale und horizontale Vernetzung beziehungsweise Integration muss auf offenen, transparenten und

beherrschbaren Architekturen erfolgen, die im eigenen Gestaltungsbereich liegen. Vor dem Hintergrund eines zunehmend kompetitiven, sich verändernden und komplexer werdenden Umfelds bieten innovative, datengetriebene sowie serviceorientierte Geschäftsmodelle jedoch auch neue Marktchancen und erlauben es zudem, gleichzeitig die ökologische Nachhaltigkeit zu steigern. Zirkuläre Geschäftsmodelle, die zur Einsparung von Ressourcen beitragen und ein wichtiger Bestandteil der Kreislaufwirtschaft sind, lassen sich zudem nur mit einem hohen Grad an digitaler Vernetzung zwischen den Akteuren entlang von Wertschöpfungsketten beziehungsweise -netzwerken realisieren. Solche innovativen Geschäftsmodelle werden durch das Engineering flexibler, selbstgenerierender und wandelbarer Systeme ermöglicht: Produktionsanlagen können zukünftig eigenständig bewerten, Prognosen erstellen und Prozesse optimieren. In modular aufgebauten, dezentral organisierten Produktionsstätten können individuelle und qualitativ hochwertige Produkte innerhalb kurzer Zeit realisiert werden. Dabei ist der Mensch stets im Blick: Arbeits- und Organisationssysteme werden soziotechnisch so gestaltet, dass individuell angepasste Arbeitsplätze entstehen – beispielsweise durch eine optimierte Mensch-Maschine-Interaktion oder in den Arbeitsplatz integrierte Weiterbildungsangebote. Auf diese Weise entstehen Arbeitsumgebungen, die Motivation, Wertschätzung und Innovationsfähigkeit fördern und zugleich die Industrie sowohl als gesellschaftlichen als auch als wirtschaftlichen Motor stärken.

In den kommenden Jahren ergeben sich zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsbedarfe, die es zur erfolgreichen Umsetzung dieses Zielbilds im Kontext von Industrie 4.0 zu adressieren gilt. In den spezifischen Roadmaps des Forschungsbeirats Industrie 4.0 zu den Themen „Geschäftsmodelle“, „Engineering“, „Zukunft der Arbeit“ und „Nachhaltigkeit“ werden die jeweiligen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe dargestellt und beschrieben, wie sie auf das Zielbild von Industrie 4.0 einzahlen. Dabei werden insbesondere aktuelle Entwicklungen, wie beispielsweise die rasanten Fortschritte, die derzeit im Bereich der Künstlichen Intelligenz erzielt werden, aufgegriffen und deren Bedeutung für die industrielle Wertschöpfung vor allem auch im Produktions- beziehungsweise Industriestandort Deutschland beschrieben. Das Strategiepapier greift dabei zentrale Punkte der kürzlich veröffentlichten Hightech Agenda der Bundesregierung auf und beschreibt, wie die Arbeiten des Forschungsbeirats Industrie 4.0 und die erarbeiteten Forschungsbeziehungsweise Themen-Roadmaps darauf einzahlen.

Im Schluß mit weiteren, komplementären Vorhaben beziehungsweise Initiativen, wie beispielsweise der Plattform Industrie 4.0, spielt der Forschungsbeirat eine entscheidende Rolle, um das beschriebene Zielbild von Industrie 4.0 auch tatsächlich zu erreichen. Als strategisches, unabhängiges und interdisziplinäres Forum von Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie ist der Forschungsbeirat Industrie 4.0 ein Sensor von Entwicklungsströmungen und Impulsgeber für künftige Forschungsthemen.

Dabei ist der Forschungsbeirat mehr als die Summe seiner Teile: Durch die Einbindung zahlreicher Perspektiven, die sich gleichberechtigt und vorwettbewerblich einbringen, ergibt sich ein repräsentatives Expertengremium, das sich zudem durch die wissenschaftliche Exzellenz und die Expertise in der Innovation aus weltweit führenden Unternehmen auszeichnet. Die Zusammenarbeit und der interdisziplinäre Austausch zwischen den Mitgliedern schaffen Synergien und Ergebnisse, die über die Summe einzelner Kompetenzen beziehungsweise Expertisen hinausgehen.

Dabei profitieren Wissenschaft und Wirtschaft gleichermaßen von dem Austausch innerhalb des Forschungsbeirats Industrie 4.0: Die Industrie prüft neue wissenschaftliche Entwicklungen auf Relevanz und Umsetzbarkeit, während die Wissenschaft ihre Aktivitäten daran ausrichtet und zugleich Orientierung für zukünftige Entwicklungen gibt.

Die erarbeiteten Ergebnisse werden zielgruppengerecht über diverse Formate in der Öffentlichkeit verbreitet, wodurch insbesondere auch KMU profitieren, die zum Teil aufgrund knapper Ressourcen häufig bei der Umsetzung von Industrie 4.0 noch weiter zurückliegen als große Unternehmen. Schließlich erarbeitet der Forschungsbeirat für die Politik eine evidenzbasierte und unabhängige Grundlage für Handlungsoptionen für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 und bietet eine Orientierungshilfe für zukünftige Ausschreibungen in der Forschungsförderung.

In einem nächsten Schritt ist geplant, die in den Roadmaps beschriebenen Handlungsfelder mit weiteren und noch konkreteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfen zu unterfüttern, so wie dies bereits in der aktualisierten Neuauflage der Themenfelder³⁴ durchgeführt wurde. Der Forschungsbeirat plant darüber hinaus, die vorliegenden Roadmaps regelmäßig mit den aktuellen Entwicklungen zu spiegeln und zusammen mit weiteren Initiativen, die einen stärkeren Fokus auf die Anwendung haben (beispielsweise die Plattform Industrie 4.0), die Umsetzung der nötigen Entwicklungsschritte zu monitorieren und gegebenenfalls Empfehlungen für eine Neuausrichtung zu geben.

Industrie 4.0 ist keinesfalls ein abgeschlossenes Projekt, sondern als industrielles Leitbild, das mehr denn je von höchster Relevanz ist und weltweit verfolgt wird, ein kontinuierlicher Transformationsprozess. Das Strategiepapier verdeutlicht: Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz, Nachhaltigkeit und Souveränität sind die Leitlinien für die nächste Phase von Industrie 4.0. Mit diesem Strategiepapier liegt ein klarer Orientierungsrahmen für die kommenden Jahre vor. Er zeigt die zentralen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe auf, benennt die strategischen Prioritäten und unterstreicht die Rolle des Forschungsbeirats Industrie 4.0 auf dem Weg zum beschriebenen Zielbild. Damit ist eine belastbare Grundlage geschaffen, um den digitalen Wandel der Industrie in Deutschland systematisch und zukunftsorientiert voranzubringen.

6 Literatur

Bitkom e.V. 2022

Bitkom e.V. (Hrsg.): *Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken* (Bitkom Studienbericht September 2022). URL: <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-01/221125StudieIndustrie40-1.pdf> [Stand: 21.09.2025].

BMFTR 2025

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) (Hrsg.): *Hightech Agenda Deutschland*. 2025. URL: https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/L/31881_Hightech_Agenda_Deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=13 [Stand: 21.09.2025].

BMUV 2024

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)*. 2024. URL: https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf.pdf [Stand: 22.09.2025].

BMWi 2021

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): *Schwerpunktstudie. Digitale Souveränität. Bestandsaufnahme und Handlungsfelder*. 2021. URL: www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/schwerpunktstudie-digitale-souveranitaet.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [Stand: 21.09.2025].

Ciuppek 2021

Ciuppek, M.: „Industrielle KI erlaubt die zweite Welle der Digitalisierung“. In: *VDI-Nachrichten* (01.04.2021). URL: www.vdi-nachrichten.com/technik/informationstechnik/industrielle-ki-erlaubt-die-zweite-welle-der-digitalisierung/ [Stand: 21.09.2025].

Dumitrescu et al. 2023

Dumitrescu, R./Riemensperger, F./Schuh, G. (Hrsg.): *acatech Maturity Index Smart Services: Die Transformation von Unternehmen zum Smart Service Anbieter gestalten (acatech STUDIE)*, München 2023. DOI: https://doi.org/10.48669/aca_2023-9 [Stand: 21.09.2025].

Forschungsbeirat/acatech 2022a

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Blinde Flecken in der Umsetzung von Industrie 4.0 – identifizieren und verstehen*. 2022. URL: [10.48669/fb40_2022-1](https://doi.org/10.48669/fb40_2022-1) [Stand: 20.01.2026].

Forschungsbeirat/acatech 2022b

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Themenfelder Industrie 4.0 – Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0, 2. überarbeitete Fassung*. 2022. URL: [10.48669/fb40_2022-04](https://doi.org/10.48669/fb40_2022-04) [Stand: 18.09.2025].

Forschungsbeirat/acatech 2025

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Erfolgreiche digitale und datengetriebene Geschäftsmodelle für Industrie 4.0 mit Fokus auf dem Maschinen- & Anlagenbau*. 2025. URL: https://doi.org/10.48669/fb40_2025-1 [Stand: 20.01.2026].

Kagermann et al. 2013

Kagermann, H./Wahlster, W./Helbig, J. (Hrsg.): *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, Frankfurt/Main, 2013. URL: <https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/> [Stand: 25.02.2022].

Kagermann et al. 2021a

Kagermann, H./Süssenguth, F./Körner, J./Liepold, A./Behrens, J. H.: *Resilienz als wirtschafts- und innovationspolitisches Gestaltungsziel* (acatech IMPULS). München 2021. URL: <https://www.acatech.de/publikation/resilienz-als-wirtschafts-und-innovationspolitisches-gestaltungsziel/download-pdf?lang=de> [Stand: 21.09.2025].

Kagermann et al. 2021b

Kagermann, H. / Streibich, K.-H./Suder, K.: *Digitale Souveränität – Status quo und Handlungsfelder* (acatech IMPULS), München 2021. URL: <https://www.acatech.de/publikation/digitale-souveranitaet-status-quo-und-handlungsfelder/download-pdf?lang=de> [Stand: 21.09.2025].

Kotter 2015

Kotter, J. P.: *Accelerate. Strategischen Herausforderungen schnell, agil und kreativ begegnen*, München: Franz Vahlen Verlag, 2015.

Link 2024

Link, C. W.: „Rettet die Fabrik der Zukunft den Hochlohnstandort Deutschland?“ In: *Rundblick – Politikjournal für Niedersachsen* (Ausgabe #049 vom 14.03.2024). URL: <https://rundblick-niedersachsen.de/rettet-die-fabrik-der-zukunft-den-hochlohnstandort-deutschland> [Stand: 21.09.2025].

Next Level Mittelstand 2026

Next Level Mittelstand: *Gemeinsam in die digitale Zukunft – Next Level Mittelstand [NLM]*. 2026. URL: <https://nextlevelmittelstand.com/> [Stand: 03.02.2026].

Otto/Hölzle 2025

Otto, B./Hölzle, K. (Hrsg.): *Zukunft industrieller Wertschöpfungssysteme. Sicht deutscher Industrieunternehmen*. Dortmund 2025. URL: <https://www.isst.fraunhofer.de/de/publikationen/pressemitteilungen/2025/zukunft-industrieller-wertschoepfungssysteme.html> [Stand: 21.09.2025].

Pauli et al. 2021

Pauli, T./Fieft, E./Matzner, M.: „Digital Industrial Platforms“. In: *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 63, No. 2. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00681-w> [Stand: 22.01.2026].

Plattform Industrie 4.0 2026

Plattform Industrie 4.0: *Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0. Ziel, Struktur und Geschichte der Plattform*. 2026. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Plattform/Hintergrund/hintergrund.html> [Stand: 03.02.2026].

Plattform Lernende Systeme 2026

Plattform Lernende Systeme: *Über die Plattform*. 2026. URL: <https://www.plattform-lernende-systeme.de/ueber-die-plattform.html> [Stand: 03.02.2026].

Raab 2025

Raab, C.: *Bitkom Research – KI, IoT und die Fabrik im Metaverse: Wie digital ist die deutsche Industrie?* 2025. URL: <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2025-03/250327-bitkom-charts-industrie-4.0.pdf> [Stand: 21.09.2025].

Schuh et al. 2020

Schuh, G./Anderl, R./Dumitrescu, R./Krüger, A./ten Hompel, M. (Hrsg.): *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten*, München 2020. URL: <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/> [Stand: 21.09.2025].

Statista 2025a

Statista: *Verteilung der Bruttowertschöpfung in Deutschland nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2024*. 2025. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36846/umfrage/anteil-der-wirtschaftsbereiche-am-bruttoinlandsprodukt/> [Stand: 21.09.2025].

Statista 2025b

Statista: *Index der Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigen in Deutschland von 1991 bis 2024 (Indexjahr 2020 = 100)*. 2025. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/974210/umfrage/produktivitaet-je-erwerbstaetigen-in-deutschland/> [Stand: 20.01.2026].

