



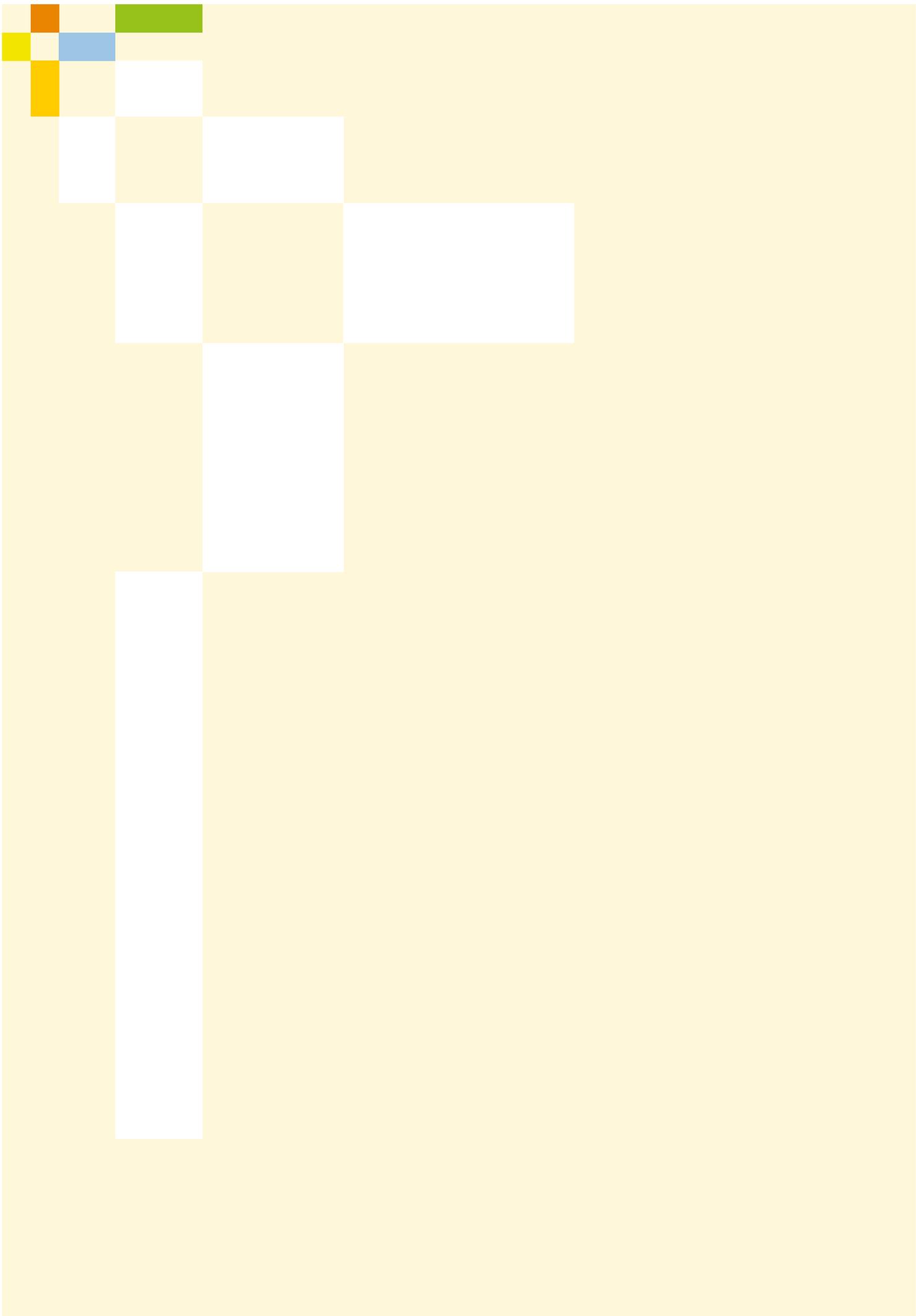
acatech IMPULS

# Innovationspotenziale KI-basierter Robotik

S. Asenkerschbaumer, H. Kagermann,  
T. Klüwer, K. O. Arras, R. Hartke, A. Kunack,  
F. Süssenguth

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech IMPULS

# Innovationspotenziale KI-basierter Robotik

S. Asenkerschbaumer, H. Kagermann,  
T. Klüwer, K. O. Arras, R. Hartke, A. Kunack,  
F. Süssenguth



## Die Reihe acatech IMPULS

In dieser Reihe erscheinen Debattenbeiträge und Denkanstöße zu technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Sie erörtern Handlungsoptionen, richten sich an Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie die interessierte Öffentlichkeit. IMPULSE liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter [www.acatech.de/publikationen](http://www.acatech.de/publikationen) zur Verfügung.

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>Interviewpartnerinnen und Interviewpartner</b>	<b>8</b>
<b>Mitwirkende</b>	<b>11</b>
<b>1 Industrie 4.0 als Triebfeder für Wertschöpfung, Resilienz und Nachhaltigkeit</b>	<b>12</b>
1.1 Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und Transformation zu einer resilienten sozial-ökologischen Marktwirtschaft	12
1.2 Vertrauenswürdiger Datenaustausch im Ökosystem	15
1.3 Förderung der breiten Anwendung datenbasierter Fabriktechnologien	16
1.4 Regulatorische Hürden im Robotiksektor	17
<b>2 Ausblicke: Herausforderung Dual Use und die Potenziale der Small-scale Robotics</b>	<b>19</b>
2.1 Zivile und militärische Anwendungen robotischer Systeme	19
2.2 Zukünftige Anwendungsfelder der Robotik	20
<b>3 Analyse: Zentrale Stärken und Schwächen KI-basierter Robotik in Deutschland</b>	<b>23</b>
3.1 Marktsegmente, Wettbewerb und Marktumfeld	23
3.2 Technologie: Von Automaten zu selbstlernenden, intelligenten Systemen	27
3.3 Wertschöpfungsnetzwerk	29
3.4 Innovations- und Transferprozess	31
<b>4 Robotikstrategie</b>	<b>35</b>
4.1 Wettbewerbsfähigkeit durch Anwenderorientierung	35
4.2 Spitzenforschung, -lehre und Talentgewinnung	36
<b>5 Handlungsoptionen</b>	<b>38</b>
5.1 Fokus auf Leitanwender	38
5.2 Talentgewinnung	38
5.3 Spitzenforschung	39
5.4 Regulatorischer Rahmen and Standardisierung	39
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>Literatur</b>	<b>42</b>



# Vorwort

Künstliche Intelligenz (KI) verändert zunehmend unseren Alltag. Aktuell ziehen große Sprachmodelle wie ChatGPT die mediale Aufmerksamkeit auf sich, weil sie von jeder und jedem niedrigschwellig und spielerisch über Alltagssprache erprobt werden können, statt Programmierkenntnisse zu erfordern. Dabei überraschen sie Laien wie Fachleute oftmals durch ihr nicht vorhersehbares, weil emergentes Antwortverhalten.

Auch die Robotik wird sich durch die Kombination mit neuen KI-Generationen tiefgreifend verändern. Roboter werden zunehmend Fähigkeiten gewinnen, sich in unstrukturierten, veränderlichen Umgebungen zurechtzufinden und anspruchsvollere Aufgaben zu übernehmen.

Als zentraler Baustein für die Verwirklichung der Industrie eröffnen KI-basierte Robotik und Automatisierung damit völlig neue Möglichkeiten, um Antworten auf zentrale Herausforderungen unserer Zeit wie den demografischen Wandel, den Klimawandel und erschwingliches Bauen zu geben.

Neue Formen der Mensch-Maschine-Interaktion können dabei einen wertvollen Beitrag zu mehr Teilhabe gerade in der Arbeitswelt leisten, wie jüngst von der Plattform Lernende Systeme aufgezeigt. Nicht nur in Fabrikhallen, sondern auch im Servicebereich

werden intelligente Roboter uns wortwörtlich zur Hand gehen, beispielsweise um die Gesundheitsversorgung zu verbessern oder uns körperlich belastende Tätigkeiten abzunehmen.

All dies ist kein Selbstläufer. China wird Deutschland bei der Roboterichte voraussichtlich noch in diesem Jahr überholen, was kein gutes Signal für die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts ist. Es bedarf daher einer konzertierten Kraftanstrengung, um die starke Forschung und die breite Anwenderbasis hierzulande als Ausgangspunkt zu nutzen und Deutschland zum Leitanwender für die nächsten Robotikgenerationen zu machen.

Der vorliegende IMPULS basiert auf den Ergebnissen einer von Prof. Dr. Asenkerschbaumer und Dr. Tina Klüwer geleiteten Taskforce des Zukunftsrats des Bundeskanzlers. Im Auftrag der Bundesregierung wurden von den Taskforcemitgliedern und der bei acatech angesiedelten Geschäftsstelle des Zukunftsrats für die Sitzung im Dezember 2022 Empfehlungen zur Stärkung des deutschen Robotikökosystems erarbeitet.

An dieser Stelle möchte sich acatech bei allen Mitwirkenden für ihr besonderes Engagement bedanken, die diesen Prozess begleitetet und der Bundesregierung damit wichtige Impulse für den weiteren politischen Entscheidungsprozess gegeben haben.

**Prof. Dr. Dr.-Ing. E. h. Henning Kagermann**  
Vorsitzender des acatech Kuratoriums



## Zusammenfassung

KI-basierte Robotik ist nicht nur für das **Gelingen langfristiger Transformationsvorhaben** wie Industrie 4.0, sondern auch für die **Bewältigung großer gesellschaftlicher Herausforderungen** wie der des demografischen Wandels von hoher Relevanz. Auch im sich stetig verschärfenden globalen Wettbewerb kommt ihr eine entscheidende strategische Rolle zu, nämlich bei der **Absicherung von Wertschöpfung** und beim **Erhalt technologischer Souveränität**:

- Automatisierung und datenbasierte Digitalisierung sind wesentlich für die langfristige **Wettbewerbsfähigkeit** Deutschlands als führender Industriestandort. Dies wird nur durch den Einsatz KI-basierter Robotik in der nötigen Breite gelingen.
- Geopolitische Spannungen und Lieferkettenabrisse haben die Wichtigkeit von **Resilienz** deutlich gemacht. Im Hochlohnland Deutschland hängt eine Stärkung der industriellen Wertschöpfung wesentlich von hohen Automatisierungsgraden ab. Aus diesem Grund sollte eine Abhängigkeit von nur wenigen Robotikanbietern in jedem Fall vermieden werden.
- Flexible Automatisierung durch KI-basierte Roboter entspricht nicht nur den Anforderungen kürzerer Produktionszyklen, sondern sie befördert auch maßgeblich die Erreichung der EU-**Nachhaltigkeitsziele**. Zudem erhöht flexible Automatisierung die Anpassungsfähigkeit der Produktion, ermöglicht die Wiederverwendbarkeit der Anlagen und leistet wichtige Beiträge für die Etablierung einer **Kreislaufwirtschaft**, zum Beispiel durch skalierbare Demontage und Recycling.
- Infolge des **Fachkräftemangels** und des demografischen Wandels stehen immer mehr Wirtschaftszweige vor der Herausforderung, Arbeitsplätze zu besetzen beziehungsweise die Produktivität zu steigern, während die Potenziale für weitere Produktivitätssteigerungen des Faktors Arbeit ohne weitere Verdichtung und damit zusätzliche Belastung für die Menschen weitgehend ausgereizt sind. Dies betrifft neben der Industrie und den Logistikanbietern in zunehmendem Maße auch Branchen wie Bau, Landwirtschaft, Energie oder Gesundheit und Pflege.

Technologisch erfährt die Robotik dank des **wissenschaftlichen Fortschritts** der letzten Jahre eine disruptive Ausweitung ihrer Einsatzmöglichkeiten: Statt nur klar definierte Aufgaben in strukturierten Umgebungen zu erfüllen, entstehen nun anpassungsfähige Systeme, die in unstrukturierten, veränderlichen Umgebungen komplexe Aufgaben erledigen – sei es eigenständig

oder in enger Kooperation mit menschlicher Arbeitskraft. Parallel dazu werden Technologien für eine einfachere Bedienung und Integration in die bestehenden Abläufe entwickelt, die in vielen Betrieben und Branchen erstmalig einen Robotikeinsatz ermöglichen.

Branchenübergreifende flexible Automatisierung durch KI-basierte Robotik wird daher in Zukunft für die Sicherung und Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit wesentlich sein. Entsprechend hoch wird das **Marktpotenzial** der Robotik für das Jahr 2030 mit **260 Milliarden Euro** geschätzt,<sup>1</sup> mit zusätzlicher Hebelwirkung auf weitere Industriesektoren.

Technologische Führerschaft, die Verfügbarkeit von KI-basierter Robotik sowie die erfolgreiche Besetzung von **Kontrollpunkten in Robotikwertschöpfungsnetzwerken** werden gerade für den durch Maschinen- und Anlagenbau erfolgreichen Standort Deutschland entscheidende Voraussetzungen für **technologische Souveränität** sein.

Daher fokussiert der vorliegende IMPULS auf die **Industrie als wichtigste Anwenderdomäne** für KI-basierte Robotik, um die führende Rolle Deutschlands im Bereich Industrie 4.0 zu stärken. Jedoch sind auch die branchenübergreifenden Anwendungspotenziale der Servicerobotik, beispielsweise im Bau, im Pharma- und im Landwirtschaftssektor, aber vor allem auch im menschlichen Umfeld, etwa in Haushalt und Pflege, von hoher Zukunftsrelevanz und entsprechend zu berücksichtigen.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen werden im Rahmen der vorliegenden Analyse folgende **zentrale Aspekte KI-basierter Robotik** in Hinsicht auf Stärken und Schwächen am Standort Deutschland analysiert und diskutiert: Wettbewerb, Technologie, Innovations- und Transferprozess sowie Wertschöpfungsnetzwerk.

Dabei wird deutlich, dass die KI-basierte Robotik eine sogenannte **Deep-Tech-Innovation** ist; das heißt, sie hat wettbewerbsdifferenzierendes Disruptionspotenzial, erfordert aber hohe Investitionen und birgt in der Umsetzung ein hohes unternehmerisches Risiko bei langen Amortisationszeiten.

Dies überfordert viele Unternehmen, selbst die heimischen Großunternehmen. Soll Deutschland in der KI-basierten Robotik international führend werden, ist also eine **ambitionierte innovations- und wirtschaftspolitische Initiative** im Schulterschluss von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft essenziell.

1 | Vgl. BCG 2021.

Der im vorliegenden IMPULS in den Fokus gerückte Ansatz der Anwenderorientierung und Incentivierung ist als passgenaue Antwort auf diese spezifischen Transferhürden für die KI-basierte Robotik gerade auf den letzten Metern der Marktentfaltung entwickelt worden. Er ist damit als Komplementärstrategie zur essenziell bleibenden, kraftvollen öffentlichen Förderung der Grundlagenforschung im Robotikbereich zu verstehen.

Das hier vorgeschlagene Ziel ist, in Deutschland einen führenden **Leitanwendermarkt** für Robotik und KI im Dienst einer branchenübergreifenden Automatisierung aufzubauen. Konkret müssen dafür **Rahmenbedingungen** geschaffen werden, die eine Industrialisierung und Skalierung innovativer Robotiklösungen erleichtern, die fachübergreifende Spitzenforschung in KI-basierter Robotik stärken und einen ausreichenden Aufbau von Talentreservoirs sicherstellen. Um mittel- und langfristig erfolgreich zu sein, sind Markt und Technologie auf gesellschaftliche Akzeptanz angewiesen, die es daher ebenfalls zu fördern gilt. Unter diesen Bedingungen kann KI-basierte Robotik wichtige Beiträge für die technologische Souveränität und die wirtschaftliche Stabilität Deutschlands leisten sowie neue Wertschöpfungspotenziale erschließen.

Folgende Maßnahmen werden von den befragten Expertinnen und Experten empfohlen:

- **Anwenderincentivierung:** Zunächst müssen anwenderorientierte Robotopole aufgebaut werden, prioritär in den Branchen Fertigung und Intralogistik sowie weiteren ausgewählten Bereichen der Servicerobotik. Einen gezielten ökonomischen Anreiz hierfür kann eine Projektförderung mit Metriken für eine erfolgreiche Marktumsetzung setzen. Hinreichende Anreize für Anwender und Konsortiumsmitglieder sollen dazu führen, dass aus den relevanten Robotopen ein starkes deutsches Robotikökosystem oder

auch ein wettbewerbsfähiger Robotik-Erstausrüster/Original Equipment Manufacturer (Robotik-OEM) entsteht. Darüber hinaus kann die Marktdurchdringung in der Breite des deutschen Mittelstands durch kleine und unbürokratisch zu genehmigende Innovationsprojekte sowie durch Sonderabschreibungen für die Anschaffung KI-basierter Robotiksysteme beschleunigt werden.

- **Talentförderung:** Die hohe und weiterwachsende Nachfrage nach qualifizierten Robotik- und KI-Talenten – von Spitzenforscherinnen und -forschern bis hin zu Applikateurinnen und Applikateuren im Feld – erfordert umfangreiche Qualifizierungsmaßnahmen in der universitären Lehre (Qualitätspakt Robotiklehre, Aufbau von Robotik-Masterprogrammen an ausgewählten Universitäten) und der Berufsausbildung. Zusätzlich sind gezielte Maßnahmen zu ergreifen, um (auch ausländische) Talente im Land zu halten.
- **Forschungs- und Transferförderung:** Aufgrund der Stärken Deutschlands im Maschinenbau und in der Mechatronik gibt es noch Chancen, bei der KI-basierten Robotik eine Alleinstellung zu erreichen. Die interdisziplinäre Forschung zur KI-basierten Robotik, vorzugsweise in Exzellenzzentren, ist daher zu stärken. Neben der Grundlagenforschung ist gleichermaßen der erfolgreiche Transfer von Forschungsergebnissen in die (wirtschaftliche) Verwertung durch den Transferkanal Start-ups zu stärken, damit Innovationen zügig breitere Anwendung finden.
- **Regulatorik und Standardisierung:** Standards bezüglich Sicherheitsaspekten und Datenschutz müssen gemeinsam mit dem Robotiksystem entwickelt werden. Freigabeanforderungen, die eine einfache Anpassung an neue Umgebungen und Anwendungen ermöglichen, sind ein entscheidender Wettbewerbsvorteil und zugleich Basis für eine Skalierung im Markt.



# Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

## Danksagung

In Ergänzung zur Auswertung von Fachliteratur und anderen Studien wurden explorative Experteninterviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft sowie weitere Hintergrundgespräche geführt.

Die Gespräche wurden im Zeitraum von August bis November 2022 geführt und dauerten im Schnitt eine Stunde. Ziel war es, Impulse zu identifizieren, wie die Wertschöpfung und technologische Souveränität im Bereich Robotik in Deutschland gestärkt werden können. Um den explorativen Charakter der Befragungen

Prof. Dr.-Ing. Alin Olimpiu Albu-Schäffer

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Prof. Michael Beetz, Ph. D.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

Dr. Susanne Bieller

Marina Bill

Prof. Michael J. Black, Ph. D.

Frederik Brantner

Prof. Dr. Wolfram Burgard

Dr. Zhaopeng Chen

Mike Cosse

Prof. Dr. Peer Fischer

zu unterstützen und auch die „leisen Töne“ einzufangen, wurde auf eine offene Gesprächsführung gesetzt. Im vorliegenden IMPULS wird ein Überblick über die zentralen in den Interviews geäußerten Einschätzungen gegeben, womit aber nicht ausgeschlossen werden soll, dass einzelne Interviewpartnerinnen und -partner zu bestimmten Fragen andere Standpunkte vertreten. Zur Illustration einiger ausgewählter Kerngedanken der Befragten werden im Text hin und wieder den Interviews entnommene, anonymisierte Zitate aufgeführt.

Die genannten Funktionen der Interviewpartnerinnen und Interviewpartner beziehen sich auf den Zeitpunkt des jeweiligen Gesprächs.

Die Geschäftsstelle dankt im Namen des acatech Präsidiums allen nachfolgend aufgeführten Beteiligten sehr herzlich für ihre Bereitschaft zur Teilnahme an den Interviews und Hintergrundgesprächen!

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)

Universität Bremen

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

International Federation of Robotics (IFR)

ABB Ltd.,  
ABB Robotics Division

Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme

Magazino GmbH

Technische Universität Nürnberg

Agile Robots AG

SAP SE

Max-Planck-Institut für Medizinische Forschung  
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg,  
Fakultät für Physik und Astronomie

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Thomas Hofmann	Technische Universität München (TUM)
Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)
Prof. Dr. Michael Kaschke	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Sven Koenig	University of Southern California (USC) Computer Science Department
Dr. Stefan König	OPTIMA packaging group GmbH
Frank Konrad	Hahn Automation GmbH
Kai Korte	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Dr. Peter Körte	Siemens AG
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger	Technische Universität Berlin
Georg Kube	SAP SE
Joachim Kuelgen	BMW AG
Prof. Dr.-Ing. Jens Lambrecht	Gestalt Robotics GmbH Technische Universität Berlin
Dr. Sicco Lehmann-Brauns	Siemens AG
Prof. Dr.-Ing. Peter Liggesmeyer	Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE)
Prof. Dr. Dirk Messner	Umweltbundesamt
Max Najork	Technische Universität München, TUM Venture Labs
Dr. Milan Nedeljković	BMW AG
Prof. Dr. Wolfgang Nejdil	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Forschungszentrum L3S
Maria Piechnick	Wandelbots GmbH
Dr. Carsten Polenz	SAP SE



Dr. Frank Possel-Dölken	Phoenix Contact GmbH & Co. KG Plattform Industrie 4.0
Ricarda Puschky	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. Geraldine Rauch	Technische Universität Berlin
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel	Universität Stuttgart
Prof. Dr. Martin Ruskowski	Deutsches Forschungszentrum für Künst- liche Intelligenz GmbH (DFKI)
Dr. Thomas Schneider	TRUMPF Werkzeugmaschinen SE + Co. KG
Prof. Dr. Margrit Seckelmann	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. Metin Sitti	Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme ETH Zurich Institute for Biomedical Engineering
Victor Splittgerber	WAKU Robotics GmbH
Ernst Stöckl-Pukall	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Oliver Suchy	Deutscher Gewerkschaftsbund (DGB) Bundesvorstand
Dr. Moritz Tenorth	Magazino GmbH
Ronnie Vuine	Micropsi Industrie GmbH
Prof. Dr. Dr. Wolfgang Wahlster	Deutsches Forschungszentrum für Künst- liche Intelligenz GmbH (DFKI)
Dr.-Ing. Tobias Weber	TRUMPF Werkzeugmaschinen SE + Co. KG
Jürgen Wittmann	BMW AG

## Mitwirkende

### Gesamtleitung

- Prof. Dr. Henning Kagermann, Vorsitzender des acatech Kuratoriums
- Prof. Dr. Stefan Asenkerschbaumer, Robert Bosch GmbH
- Dr. Tina Klüwer, K.I.E.Z.

### Inhaltliche Begleitung/Review

- Prof. Dr. Reimund Neugebauer, Fraunhofer-Gesellschaft
- Prof. Dr. Martin Stratmann, Max-Planck-Gesellschaft
- Dr. Patrick Dieckhoff, Fraunhofer-Gesellschaft
- Dr. Christoph Ettl, Max-Planck-Gesellschaft

### Konzeption, Text und Interviews

- Dr. René Hartke, Robert Bosch GmbH
- Anja Kunack, K.I.E.Z.
- Dr. Kai Oliver Arras, Robert Bosch GmbH
- Dr. Annabel Dischinger, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Sven Grundmann, acatech Geschäftsstelle
- Florian Süssenguth, acatech Geschäftsstelle

### Mit Unterstützung durch

- Mehdi Bhourri, acatech Geschäftsstelle
- Lars Hofius, acatech Geschäftsstelle
- Silke Liebscher, acatech Geschäftsstelle
- Elisa Reker-Gluhic, acatech Geschäftsstelle
- Preskal Tadrous acatech Geschäftsstelle

Die aufgelisteten institutionellen Anbindungen der Mitwirkenden beziehen sich auf den Erarbeitungszeitraum des vorliegenden IMPULSES von Juli bis Dezember 2022.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16PLI7004 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**



# 1 Industrie 4.0 als Triebfeder für Wertschöpfung, Resilienz und Nachhaltigkeit

Langfristiges Ziel ist es, mit Industrie 4.0 die **Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und die Transformation zu einer resilienten sozial-ökologischen Marktwirtschaft hierzulande zu erreichen**. Allerdings bedarf es diesbezüglich weiterer Anstrengungen. Der erste Abschnitt des ersten Kapitels beleuchtet die derzeit größten Transformationsherausforderungen und gibt einen detaillierten Einblick in die Gestaltungsmöglichkeiten einer KI-basierten Robotik im Sinne des Konzepts *Guter/Bessere Arbeit* mit KI-basierter Robotik.

Durch Industrie 4.0 wird die **Entstehung neuer Geschäftsmodelle** ermöglicht, die sich zunehmend am Nutzen für Kundinnen und Kunden orientieren. Voraussetzung hierfür sind funktionierende wirtschaftliche Ökosysteme. Für die Umsetzung des von der Plattform Industrie 4.0 erstellten Leitbilds *2030 Vision for Industry 4.0: Shaping Digital Ecosystems Globally*<sup>2</sup> braucht es zunächst einen **vertrauenswürdigen Datenaustausch** innerhalb des einzelnen Ökosystems sowie zwischen den Ökosystemen verschiedener Branchen. Mit *Manufacturing-X* soll zu diesem Zweck ein Datenraum für das produzierende Gewerbe geschaffen und mit einem hohen Betrag gefördert werden. Der zweite Abschnitt vertieft diese Thematik.

Ein weiterer wichtiger Schritt ist die **Verwirklichung der Industrie 4.0** in der Breite. Ohne ein technologisches Upgrade der deutschen Industrie und insbesondere des Mittelstands wird es Deutschland nicht gelingen, die kurz- und langfristigen Herausforderungen durch Wettbewerb und Transformationsdruck erfolgreich zu meistern. Der dritte Abschnitt erläutert vor diesem Hintergrund, warum eine Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen zur Stärkung der Robotik im Kontext der flächendeckenden Implementierung von Industrie 4.0-Technologien zur Bewältigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Herausforderungen beiträgt.

Entscheidend für eine schnelle Umsetzung der genannten Punkte wird zudem ein **angemessener regulatorischer Rahmen** sein.

Die befragten Expertinnen und Experten sprechen sich für eine pragmatischere Vorgehensweise aus, um sowohl Daten als auch KI besser einsetzen zu können. In diesem Kontext empfiehlt es sich, auch auf die *Deutsche Normungsroadmap Künstliche Intelligenz* zurückzugreifen.<sup>3</sup> Der vierte Abschnitt beleuchtet dann im Anschluss aktuelle regulatorische Hürden und verweist zudem auf den Data Act und den AI Act der Europäischen Union (EU).

Das zweite Kapitel rundet die Einordnung der KI-basierten Robotik mit **zwei Ausblicken** ab: Zunächst wird die Diskussion um Dual-Use im Kontext autonomer Systeme wiederaufgenommen<sup>4</sup> und zu einer Neubewertung dieser Thematik angesichts der aktuellen geopolitischen Situation angeregt. Anschließend wird ein Schlaglicht auf die Potenziale von Small-scale Robotics insbesondere im Gesundheitsbereich und in der Biotechnologie geworfen. Diese Technologie gilt als vielversprechendes Zukunftsfeld der Robotik der übernächsten Generation, sie sollte jedoch schon heute adressiert und gefördert werden.

Kapitel 3 nimmt eine **Analyse zentraler Stärken und Schwächen KI-basierter Robotik in Deutschland**, strukturiert nach den Aspekten Markt und Wettbewerb, Technologie, Innovations- und Transferprozess sowie Wertschöpfungsnetzwerk vor. Aus den hierbei gewonnenen Erkenntnissen wird in Kapitel 4 eine Robotikstrategie abgeleitet, mit der Deutschland die übergeordneten **Ziele zur Wettbewerbsfähigkeit, Technologiesouveränität, Resilienz und Nachhaltigkeit erreichen** kann. Abschließend werden in Kapitel 5 auf Basis der Strategiebetrachtung und der Impulse der Interviewpartnerinnen und -partner konkrete **Handlungsempfehlungen** definiert.

## 1.1 Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und Transformation zu einer resilienten sozial-ökologischen Marktwirtschaft

Die vorgeschlagenen Maßnahmen und Handlungsempfehlungen zielen darauf ab, das volle Potenzial der Industrie 4.0 an der **Schnittstelle zwischen Robotik und KI** zu entfalten:

- **Wettbewerbsfähigkeit:** Der Hochlohnstandort Deutschland muss auf Automatisierung setzen, um international konkurrenzfähig zu bleiben und in einzelnen kritischen Feldern

2 | Vgl. BMWi 2019.

3 | Vgl. DIN/DKE 2022.

4 | Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

zudem ein Reshoring zu ermöglichen, also Produktionsstandorte aus dem Ausland zurück nach Deutschland zu verlagern. Autonome Wandelbarkeit der Produktion bedeutet, dass starre Fertigungslinien **durch flexible Fertigungszellen sowie lernende und selbstregulierende Automatisierung** ersetzt werden. Auf der Grundlage individueller Daten können individualisierte Güter im Rahmen günstiger Massenfertigung bereitgestellt werden, da die Produktion durch intelligente Vernetzung flexibel anpassbar sein wird. Dies ermöglicht außerdem die Fertigung komplexer Produktvarianten. Angesichts unsicherer Lieferketten steigert eine flexible Produktionsweise die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere in Krisenzeiten. Durch die Fertigungspräzision KI-basierter Roboter können standardisierte Endprodukte auch auf Basis unterschiedlicher Ausgangsprodukte mit verschiedenen Rohstoffeigenschaften oder unterschiedlichen Geometrien hergestellt werden.

- **Resilienz:** Der Einsatz von KI-basierter Robotik kann zur Steigerung der Widerstands- und Wandlungsfähigkeit der Produktion und der Intralogistik maßgeblich beitragen. Selbst wenn aufgrund von Rohstoffmangel oder technischen Defekten ein Teil der Maschinen ausfällt, kommt die Produktion nicht zum Stillstand. Die Fertigung kann weiterlaufen, weil im Rahmen eines **automatisch generierten „Plan B“** einzelne Produktionsschritte neu arrangiert und andere Komponenten genutzt werden können oder die Produktion kurzfristig auf andere Produkte umgestellt wird.
- **Nachhaltigkeit:** Energie- und Ressourceneffizienz sowie das Upcycling als Kernidee der Kreislaufwirtschaft gehen oftmals mit zusätzlichen, aber automatisierbaren Arbeitsschritten einher. Die KI-basierten Produktionsmethoden der Industrie 4.0

zielen auf eine **Zero Defect Production** ab und tragen zudem zur **Etablierung von Kreislaufprozessen** bei, in denen begrenzte natürliche Ressourcen recycelt und wiederverwendet werden. Resultierend aus dem zunehmenden **Leichtbau** arbeiten Roboter immer energie- und ressourcensparender. Zudem können durch interoperable Daten beispielsweise **CO<sub>2</sub>-Emissionswerte der Produktion** gesammelt und sowohl firmen- als auch länderübergreifend geteilt werden können. Die Industrie kann so ihren Beitrag zur Erreichung der europäischen Nachhaltigkeitsziele leisten und gleichzeitig lokale Wertschöpfungsketten erhalten und ausbauen.

- **Bessere Arbeit:** Der Einsatz von Robotern verbessert die Arbeitsbedingungen substantiell, da Menschen von **gefährlichen oder ermüdenden repetitiven Aufgaben** entlastet werden können. Auch die **Mensch-Maschine-Interaktion** mittels Cobots bietet diesbezüglich viele Chancen. Angesichts des demografischen Wandels kann intelligente Automatisierung zudem die Arbeitsproduktivität steigern und so dem Fachkräftemangel entgegenwirken. Dies betrifft nicht nur die industrielle Fertigung, sondern durch Anwendung von Assistenzsystemen basierend auf Servicerobotik alle Branchen.

Der breite Einsatz autonomer Systeme erfordert einerseits die Fortführung der bereits im Fachforum Autonome Systeme und in der Plattform Lernende Systeme begonnenen Debatte um die möglichen gesellschaftlichen Implikationen dieser Technologie, andererseits eine neue **Einstellung auf Anwenderseite**. Nachfolgend werden die Chancen KI-basierter Robotik für die Arbeitswelt skizziert.



## Gute Arbeit durch KI-basierte Robotik

Laut Prognosen wird die Summe der Arbeitszeit von Menschen und Maschinen bereits 2025 gleich hoch sein.<sup>5</sup> Aber nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ ändert sich die Arbeitswelt: An die Stelle des bisher vorherrschenden Nebeneinanders menschlicher und maschineller Arbeit soll zukünftig **echte Kollaboration** treten. Beispielsweise werden leicht programmierbare **Cobots** den Menschen bei unangenehmen oder gefährlichen Tätigkeiten entlasten.

Roboter führen **Präzisionsarbeiten** genauer und konsistenter aus, als Menschen es je könnten. Die Überlegenheit des Menschen bei **Anpassungsfähigkeit, Kreativität und kritischem Denken** wird dadurch nicht infrage gestellt. In vielen Produktionsabläufen ergänzen sich menschliche Arbeit und Robotik, sodass **menschliche Kreativität und maschinelle Produktivität eine Symbiose** eingehen.

Die Mehrheit der befragten Expertinnen und Experten erwartet daher keine Verdrängung der menschlichen Arbeit durch Maschinen. Sie betrachten unter dem Vorzeichen des Fachkräftemangels die Automatisierung im Gegenteil eher als einen Schlüssel zum Erhalt von Arbeitsplätzen durch eine sinnvolle **Zusammenarbeit** zwischen Mensch und Maschine.<sup>6</sup> Für diese Einschätzung spricht auch, dass gegenwärtig nur 10 Prozent der Arbeitsplätze vollständig automatisierbar sind.<sup>7</sup>

„Roboter stehen nicht im Wettbewerb zum Menschen. Sie sind eine Antwort auf den Fachkräftemangel.“

Gerade kleinere und mittlere Unternehmen können durch die neuen Technologien dem Wettbewerbsdruck und dem demografischen Wandel begegnen und damit weiter gute Arbeitsplätze anbieten. KI-basierte Robotik-Systeme **steigern die Produktivität** und wirken damit dem stärker werdenden **Fachkräftemangel** entgegen. Prognosen zufolge werden allein in Europa zwischen 2016 und 2030 knapp **10 Millionen Stellen in den Bereichen Anlagen- und Maschinenbedienung sowie Montage** unbesetzt bleiben.<sup>8</sup> Auch in anderen Branchen (zum Beispiel Pflege, Bau, Landwirtschaft) zeigt sich hohes Potenzial.

Der Aufbau neuer KI-basierter Produktionsmethoden und Servicerobotik muss durch **gezielte Aus- und Weiterbildung** flankiert werden. Der Bedarf in diesem Zusammenhang ist groß, denn Schätzungen zufolge könnten weltweit bis zu 85 Millionen Arbeitsplätze von der Mensch-Maschine-Interaktion betroffen sein. Etwa 40 Prozent der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer wären damit auf **Umschulung oder Weiterbildung** angewiesen, um für die Herausforderungen der zukünftigen Arbeitswelt vorbereitet zu sein.<sup>9</sup>

Andererseits sollte der Fokus aber auch auf der **Einführung neuer attraktiver Berufsgruppen** liegen. Laut Prognosen werden die neuen Technologien weltweit voraussichtlich 97 Millionen **neue Arbeitsplätze** schaffen.<sup>10</sup> Knapp zwei Drittel der Arbeitsplätze, in denen die nächste Generation tätig sein wird, existieren heute noch gar nicht.<sup>11</sup>

5 | Vgl. IFR 2018.

6 | Vgl. ebd.

7 | Vgl. IFR 2017.

8 | Vgl. IFR 2020b

9 | Vgl. IFR 2018.

10 | Vgl. WEF 2020.

11 | Vgl. IFR 2018.

## 1.2 Vertrauenswürdiger Datenaustausch im Ökosystem

Ohne **semantische Interoperabilität** und Zugriff auf einen **geteilten Datenschatz** kann es keine vernetzten und agilen

Systeme in Produktionsprozessen geben. Auch die Entstehung neuer Geschäftsmodelle innerhalb des Ökosystems ist ohne diese Voraussetzungen nicht möglich. Um Daten effizient und souverän nutzen zu können, soll mit **Manufacturing-X** eine neue Plattform gebildet werden, die einen **gemeinsamen Datenraum für die herstellende Industrie** zur Verfügung stellt.

### Gemeinsame Datenräume *Catena-X* und *Manufacturing-X*

Um Versorgungssicherheit, Transparenz und Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten, müssen Anbieter und Anwender der digitalen Transformation in **gemeinsamen Datenräumen** zusammengebracht werden. Als Leuchtturmprojekt wurde in Deutschland mit *Catena-X* ein Datenraum für die Automobilindustrie geschaffen.

Um in ähnlicher Weise den Datenschatz in der industriellen Fertigung zu heben, sollte **Manufacturing-X als Leuchtturmprojekt** innerhalb der Förderung von Industrie 4.0 mit höchster Priorität politisch unterstützt werden. **Aufbauend auf *Catena-X* und bereits am Markt etablierten Konzepten** muss nach Einschätzung der Befragten mit Nachdruck ein gemeinsamer Datenraum für die Industrie realisiert werden.<sup>12</sup>

Das Ziel von *Manufacturing-X* ist daher die Etablierung eines **Datenraums „Fabrikation“** für das produzierende Gewerbe (unter anderem Maschinenbau, chemische Industrie, Energieerzeugung, Baustoffindustrie) sowie für zentrale Anwenderindustrien und Zulieferer.

Ein zentraler Aspekt des Vorhabens ist die Sicherstellung der **Interoperabilität** der einzelnen unter *Manufacturing-X* zusammengefassten Datenräume, die den verschiedenen Branchen zugeordnet sind. Die Struktur von *Catena-X* und die in diesem Zusammenhang entwickelten Lösungen sollten adaptiert werden, da nur so folgende Herausforderungen für eine **zukunftsfähige industrielle Fertigung in Deutschland** schnell zu bewältigen sind:

- Lieferkettenmanagement zur Erhöhung der Transparenz und Resilienz der Wertschöpfungsnetzwerke
- Energie- und CO<sub>2</sub>-Footprint-Management zur Identifikation von Nachhaltigkeitspotenzialen
- Nutzung erneuerbarer Energien

Eine breite operative Implementierung dieser Transformationsschritte in der Industrie ist von großer strategischer Bedeutung, um den derzeitigen **Wettbewerbsvorsprung**, den Deutschland in **Kernbranchen** hat, auch künftig zu erhalten.

„Es ist entscheidend, dass zentrale Marktakteure verschiedener Branchen sich aktiv zu Manufacturing-X bekennen.“

Neben dem politischen Rückhalt ist eine **schlanke, zielorientierte Governance-Struktur** nötig, damit das Vorhaben mit der erforderlichen Dynamik verfolgt werden kann. Hierzu haben sich im Februar 2023 auf Einladung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Verbände und Pionierunternehmen aus der Industrie in einem Steering Committee zusammengefunden, also einem Steuerungsgremium, um die *Manufacturing-X*-Aktivitäten bis zur Umsetzung zu koordinieren.

**Die Umsetzung von *Manufacturing-X* ist anhand klar definierter Meilensteine zu begleiten, um den Fortschritt messbar zu machen.** In diesem Zusammenhang sprechen sich die Befragten dafür aus, nicht nur die Zahl der beteiligten Akteure als Erfolgsmaßstab anzusetzen, sondern das Augenmerk vor allem **outputorientiert** auf das Spektrum der Lösungen und deren tatsächliches Nutzungsvolumen zu legen.

Im April 2023 hat das BMWK ein **Förderkonzept zur Unterstützung der Industrieinitiative *Manufacturing-X*** vorgelegt und entsprechende Erfolgsfaktoren für ein Gelingen der Initiative definiert. Ausgewählte Förderprojekte sollen bereits im Dezember 2023 starten.<sup>13</sup>

12 | Vgl. Plattform Industrie 4.0 2022a; 2022b; VDMA 2022.

13 | Vgl. BMWK 2023.



### 1.3 Förderung der breiten Anwendung datenbasierter Fabriktechnologien

In der **ersten Dekade Industrie 4.0** haben bereits einzelne Anbieter von Fabriktechnologien ihr Produktportfolio digitalisiert und verschiedene Lösungen für zukünftige Informationssysteme der Fabrik entwickelt. In den letzten zwei Jahren sind nun zunehmend die **Anwender digitaler Fabriktechnologien** ins Blickfeld gerückt.

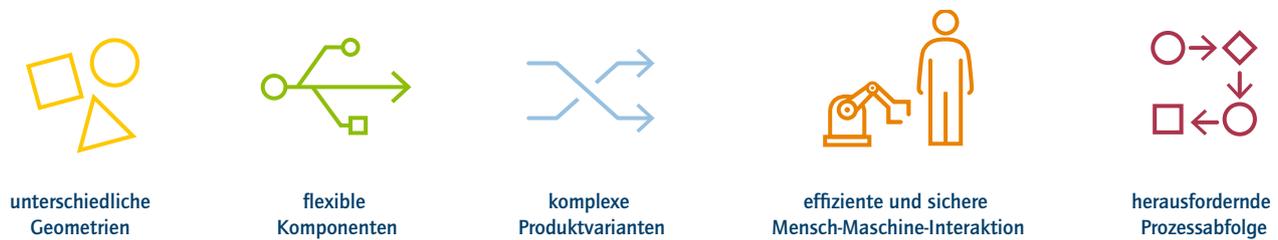


Abbildung 1: Technologische Hürden der Industrierobotik (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf BCG 2022)

Ein bedeutendes Entwicklungsfeld umfasst die Verbesserung von **Sensorik** in Kombination mit maschinellem Lernen sowie die **Haptik** von Manipulatoren. Die **Handhabung unterschiedlicher Geometrien, flexibler und elastischer Komponenten sowie komplexer Produktvarianten** könnte durch technologische Durchbrüche in diesen Bereichen signifikant verbessert werden. Zudem stellen **komplexe Prozessabfolgen** in der Fertigung noch eine große Herausforderung dar. Einen weiteren zentralen Forschungsgegenstand stellt schließlich die **intuitive und sichere Interaktion** von Roboter und Mensch dar.<sup>14</sup>

Neben der Förderung anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung ist eine flächendeckende Digitalisierung der Produktion erforderlich, damit Deutschland zum **Leitanwender** KI-basierter Robotik avancieren kann. Der deutsche Mittelstand steht diesbezüglich zum Großteil jedoch noch ganz am Anfang. Laut **Industrie 4.0 Maturity Index**, der den digitalisierungsbezogenen Reifegrad von Unternehmen angibt, weisen bisher nur **4 Prozent der untersuchten Unternehmen eine Reifegradbewertung von 3 (Sichtbarkeit)** auf. Reifegrad 3 stellt laut Definition aber nur das Frühstadium von Industrie 4.0 dar.<sup>15</sup>

Roboter der neuen Generation sowie intelligente Automatisierungsprozesse sind unabdingbare Voraussetzungen, um die Versprechen der Industrie 4.0 einzulösen und der deutschen Industrie eine gesteigerte Wertschöpfung, mehr Resilienz sowie Nachhaltigkeit zu ermöglichen. Abbildung 1 gibt einen Überblick über einige der derzeit noch **bestehenden technologischen Herausforderungen** in der industriellen KI-basierten Robotik:

„Der Mittelstand ist der Treiber für unseren Wohlstand. Diese Unternehmen können es sich nicht leisten, nicht zu digitalisieren und automatisieren.“

Damit der **Wettbewerbsvorteil** der deutschen Wirtschaft in der Industrie 4.0 erhalten bleibt und der Übergang in eine neue Phase möglich wird, sind Maßnahmen in **drei strategischen Säulen** erforderlich, die durch zusätzliche Initiativen der in Kapitel 4 vorgestellten Robotikstrategie flankiert werden sollen.

- **Senkung der Einstiegshürden:** Sensorik und Vernetzung von Maschinen bilden das Nervensystem der digitalen Fabrik. Damit kleineren Unternehmen der Start ins Zeitalter von Industrie 4.0 gelingt, müssen die Eintrittsbarrieren weiter gesenkt werden. Hierzu gehören **kostenfreie Beratungs- und Informationsangebote** zur Einführung von Produktionsprozessen der Industrie 4.0, finanzierbare **Komplettlösungen zur Neuinstallation** sowie die Möglichkeit, auch **ältere Produktionsanlagen** mit entsprechenden Technologien nachzurüsten. **Benutzerfreundliche Schnittstellen** und das Angebot, einzelne Lösungen zunächst zu sondieren, ohne alle technologischen Möglichkeiten ausschöpfen zu müssen, erleichtern zudem gerade kleineren Herstellern den Einstieg in die digitale Produktion.

14 | Vgl. BCG 2022.

15 | Vgl. Schuh et al. 2020.

- **Nutzerfreundlichkeit (Ease of Use):** Die befragten Expertinnen und Experten aus der Robotik-Industrie berichten, dass sich Kundinnen und Kunden zunehmend **preisgünstige Roboter** wünschen, die auch für angelernte Fachkräfte **einfach zu installieren, zu programmieren und umzuprogrammieren** sind. Gerade in Bezug auf die **Kosten-effizienz** könnte KI eine Schlüsselrolle spielen. Die Kosten der Installation sowie des Programmierens der Roboter könnten **mittels KI um 50 Prozent gesenkt** werden.<sup>16</sup> Die befragten Industrievertreterinnen und -vertreter weisen darauf hin, dass sowohl die Installation als auch die Bedienung der Roboter ebenso einfach sein muss wie das Nutzen einer App. Gerade für kleine Unternehmen, die Schwierigkeiten haben, spezialisierte Fachkräfte zu gewinnen, sind eine einfache Bedienung und die Wartung der Software als **Serviceleistung** sehr wichtig.
- **Gemeinsame Normen und Standards:** Um KI-basierte Systeme trainieren und anlernen zu können, ist eine breite Datenverfügbarkeit unabdingbar, die nur durch standardisierte Plattformen erreicht werden kann. Zwar entstehen jeden Tag unzählige Daten, allerdings kann eine Vielzahl davon aufgrund **uneinheitlicher Formate** nicht genutzt werden. Die befragten Industrievertreterinnen und -vertreter schlagen deshalb die Etablierung von **Standards für die Datenkommunikation** vor und fordern die Umsetzung der *Deutschen Normungsroadmap Künstliche Intelligenz*.<sup>17</sup> Die Initiative *Manufacturing-X* ist eine große Chance für die heimische Industrie, an dieser Stelle **internationale Standards** zu setzen und dadurch die europäische Souveränität für die Zukunft zu stärken.

## 1.4 Regulatorische Hürden im Robotiksektor

Für Deutschlands Rolle im weltweiten Wettbewerb wirkt sich die **Fülle regulatorischer Hürden** hierzulande nicht nur negativ auf die Verbreitung von Industrie 4.0-Technologien aus, sondern sie erschwert auch die Nutzung KI-basierter Robotik an der Schnittstelle von Mensch und Maschine.

So wird auf **Anwenderseite** vor allem die **innovationshemmende Überregulierung** kritisiert. Dies betrifft etwa das kollaborative Arbeiten mit Cobots. Aus diesem Grund sollten die in diesem Zusammenhang an Unternehmen gestellten **Anforderungen** an die technologische Entwicklung angepasst werden, damit der Einsatz von Robotern in unstrukturierten Umgebungen ohne Schutzvorrichtung ermöglicht wird.

Der Einsatz KI-basierter Robotik ist für viele Unternehmen wirtschaftlich aufgrund der strengen **regulatorischen Hürden** schlichtweg nicht realisierbar. Hinzu kommt der **Mangel an zertifizierter Software**, mittels derer Roboter beispielsweise befähigt würden, herannahenden Gefahrenquellen auszuweichen, ohne anhalten zu müssen.

Auch auf **EU-Ebene** wünschen sich die Befragten eine anwendungsorientierte Regulatorik, die den Fokus vorwiegend auf mögliche Chancen statt auf Risikovermeidung richtet. Insbesondere der **Data Act** und der **AI Act** der EU sind Teil der aktuellen Diskussion.

### EU Data Act and AI Act

#### Europäische Union als Regulierungsmacht des digitalen Raums

Nach der europäischen Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) bringt die EU derzeit **neue Regulierungsvorhaben** auf den Weg, um die digitale Zukunft Europas zu gestalten. Die derzeit wichtigsten Vorhaben sind der **Data Act** und der **AI Act**.

Bei beiden Vorhaben sieht eine Mehrheit der Interviewpartnerinnen und -partner jedoch die Gefahr der **Überregulierung**. Einige der befragten Expertinnen und Experten befürchten zudem, dass regulatorische Hürden und Complianceanforderungen gerade Kleine und Mittelständische Unternehmen (KMU) und Start-ups überfordern

werden. Dies kann zu einer Bevorteilung für Großunternehmen mit entsprechenden juristischen und administrativen Ressourcen führen.

#### Data Act

Der **Data Act** ist ein Teil der **Europäischen Datenstrategie**, die bereits Anfang 2020 vorgestellt wurde. Die EU-Kommission strebt mit dem Data Act einen **rechtlichen Rahmen** an, der die **Nutzung und das Teilen von Daten** verbessern sowie Hemmnisse für den Datenaustausch abbauen soll. Einen Entwurf des Data Act hat das EU-Parlament im März 2023 angenommen und damit nach langer Diskussion den Weg für Trilog-Verhandlungen und einen möglichen Abschluss des Gesetzgebungsverfahrens im Jahr 2023 eröffnet.

16 | Vgl. IFR 2022a.

17 | Vgl. DIN/DKE 2022.



Bislang werden nach Angaben der Kommission mehr **als 80 Prozent der Industriedaten nicht genutzt**. Gelingt es, diesen Datenbestand auf Grundlage des Data Act umfassend zu nutzen, könnte das Bruttoinlandsprodukt der Europäischen Union bis 2028 zusätzlich um 270 Milliarden Euro gesteigert werden.<sup>18</sup> Insbesondere für die Robotik der nächsten Generation ist der Austausch von Industriedaten essenziell, denn Daten sind unter anderem die Basis für eine wandelbare Produktion und für Roboter, die voneinander lernen.

**Maschinendaten sind nicht personengebunden** und daher nicht unmittelbar von den Regelungen der DSGVO betroffen. In einigen Bereichen wie etwa bei Daten, die in Kraftfahrzeugen und bei deren Nutzung erhoben werden, gibt es jedoch **Grauzonen zwischen privaten und anonymen Maschinendaten**. Einige Expertinnen und Experten befürchten ein Labyrinth unterschiedlicher Regelungen und rechtlicher Grauzonen, das zu langwierigen juristischen Auseinandersetzungen und Rechtsunsicherheit führt.<sup>19</sup> Nach derzeitigem Diskussionsstand zum Data Act ist vorgesehen, dass die **Datenzugangs- und Datennutzungsrechte** gleichermaßen für **personenbezogene** wie für **nichtpersonenbezogene Daten** gelten sollen.

In der Automatisierungsindustrie wird der Entwurf zum Data Act der Befragung zufolge in großen Teilen **skeptisch bewertet**. Das Regulierungsvorhaben enthalte Ansätze, die zu weit in die unternehmerische Freiheit eingreifen würden. Hierzu zählten etwa **Datenzugangs- und Informationspflichten, Einschränkungen der Vertragsfreiheit und Anforderungen an die technische Ausgestaltung**. Viele Industrievertreterinnen und -vertreter bevorzugen marktgetriebene Innovationen und freiwillige Kooperationen. Einige der befragten Expertinnen und Experten befürchten zudem, dass Unternehmen die **Kontrolle über die Daten** durch die Weitergabe an Dritte verlieren und **Geschäftsgeheimnisse** an außereuropäische Konkurrenten gelangen könnten.

Einige Vertreterinnen und Vertreter aus der Wissenschaft weisen wiederum auf die **hohen Transaktionskosten** hin, die durch die **freiwillige Datenweitergabe** entstehen. Um große Datensätze zu generieren, müssten sehr viele Akteure zum Teilen ihrer Daten überzeugt werden. Aus ökonomischer Sicht könnte sich deshalb eine **Opt-out-Regelung** als sinnvoller erweisen als eine Opt-in-Regelung im Rahmen einer freiwilligen Datenweitergabe.

#### AI Act

Im April 2022 hat die EU-Kommission den Entwurf für einen Rechtsrahmen zur **Regulierung von KI-Systemen**

vorgelegt. Dieser soll die **Grundrechte und die Sicherheit von Nutzerinnen und Nutzern** gewährleisten und hierdurch das Vertrauen in die Entwicklung und Verbreitung dieser Technologien stärken.

Die Mehrzahl der KI-Systeme birgt nur ein geringes oder gar kein Risiko. Es gibt jedoch Ausnahmen, die im Rahmen einer europäischen KI-Regulierung adressiert werden sollen. **Risiken** bestehen beispielsweise bei KI-gestützten biometrischen Identifizierungssystemen und automatisierten Entscheidungen in sensiblen Bereichen wie dem Personalwesen, der Gesundheitsversorgung, der Strafverfolgung oder dem Verteidigungssektor. Die Kommission schlägt daher einen risikobasierten Ansatz mit **vier unterschiedlichen Risikostufen** vor.<sup>20</sup>

Der Entwurf für den AI Act wird in der **Maschinenbauindustrie** ambivalent bewertet. Einerseits werden einheitliche EU-Regeln für KI als wichtiger Baustein zum Schutz von Grundrechten in Europa begrüßt. Andererseits sei die von der Kommission geplante **starre Top-down-Risikoeinordnung** durch den Gesetzgeber nicht effizient. Problematisch sei insbesondere die „Hochrisiko“-Einordnung von Maschinen-KI, wodurch Freiräume für **fallspezifische Risikoanalysen und -maßnahmen** ausgeschlossen und viele KI-Anwendungen unnötig stark reguliert werden würden.

Aus Perspektive der Arbeitnehmendenvertretung wird der Entwurf der EU-Kommission für eine europäische KI-Verordnung grundsätzlich begrüßt. In der Verordnung solle aber deutlich werden, dass sämtliche KI-Systeme im Bereich des **Personalwesens** und im **Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion** als **Hochrisiko-KI-Systeme** eingestuft werden und deshalb einer **externen Prüfung** bedürfen. Spezifische Regelungen in nationalen Rechtsvorschriften oder Kollektivvereinbarungen sollten zudem auch weiterhin im Rahmen einer **Öffnungsklausel** zulässig bleiben.<sup>21</sup>

Einige der befragten Expertinnen und Experten halten die Vorschläge und Überlegungen der **Deutschen Normungsroadmap Künstliche Intelligenz** gegenüber den aktuellen EU-Entwürfen für zielführender.<sup>22</sup> Dort fänden ethische, technische und ökonomische Aspekte gleichermaßen auf eine pragmatische und operationalisierbare Art und Weise Berücksichtigung.

Nach ausführlicher Diskussion hat der Rat der EU im Dezember 2022 seinen Standpunkt zum AI Act festgelegt, eine Befassung im Plenum des EU-Parlaments wird für Juni 2023 erwartet.

18 | Vgl. Europäische Kommission 2022.

19 | Vgl. Voß 2022.

20 | Vgl. Europäische Kommission 2021.

21 | Vgl. DGB 2021.

22 | Vgl. DIN/DKE 2022.

## 2 Ausblicke: Herausforderung Dual Use und die Potenziale der Small-scale Robotics

Das folgende Kapitel enthält **zwei Ausblicke**, die zwar nicht unmittelbarer Gegenstand der Interviews mit den Expertinnen und Experten waren, die für die zukünftige Entwicklung der Robotik in Deutschland aber dennoch relevant sein werden.

Der erste Abschnitt richtet den Fokus auf die wieder aufgeflamnte Diskussion um sogenannte Dual-Use-Technologien, also Technologien, die sowohl zivil als auch militärisch zu nutzen sind. Angesichts der sicherheitspolitischen ‚Zeitenwende‘ im Zuge des Ukrainekriegs, der zunehmenden Konfrontation mit der Großmacht China und immer aggressiver geführten Konflikten auch in anderen Regionen der Welt stellt sich die Frage nach dem politischen **Umgang mit Dual-Use-Technologien** in Deutschland, was auch Auswirkungen auf die Robotik und angrenzende Technologiefelder hierzulande haben dürfte.

Der zweite Abschnitt gibt einen Ausblick auf die **Robotik von übermorgen**. Denn in der Grundlagenforschung wird schon heute an Systemen geforscht, die vollkommen neue Einsatzbereiche ermöglichen. Diese Roboter von der Größe weniger Millimeter bis hinab in den Mikro- und Nanometerbereich haben das Potenzial, insbesondere den Gesundheitssektor sowie die Biotechnologie disruptiv zu verändern.

### 2.1 Zivile und militärische Anwendungen robotischer Systeme

Durch den russischen Angriff auf das Staatsgebiet der Ukraine am 24. Februar 2022 und seinen geopolitischen Folgen werden neben kritischen Abhängigkeiten und Souveränitätsaspekten auch normative Fragen aufgeworfen, die einer grundsätzlichen Behandlung bedürfen. Zu diesen Fragen zählt auch der Umgang mit **Dual-Use-Technologien** im Rahmen der deutschen Forschungs-, Innovations- und Industriepolitik.

#### Dual-Use-Technologien

Das **europäische Handelsrecht** verwendet den Begriff Dual Use für **Güter mit doppeltem Verwendungszweck**, die sowohl für zivile als auch für militärische Zwecke eingesetzt werden können (Rat der Europäischen Union 2009). Die Grenze zwischen dem zivilen und dem militärischen Bereich ist jedoch in der Robotik wie auch in vielen anderen Zukunftstechnologiefeldern zunehmend fließend. Beispielsweise können handelsübliche **Drohnen** mit vergleichsweise geringem Aufwand zu Waffensystemen umgebaut werden.

Andererseits ergeben sich **Chancen für den Einsatz in menschenfeindlichen Umgebungen**, da autonome Systeme Gefahren minimieren und Einsatzorte erschließen, die für Menschen nicht ohne Weiteres oder nicht längerfristig zu erreichen sind. Die Bandbreite reicht von Erkundung, Überwachung und Entschärfung in der Tiefsee über den Einsatz in stark radioaktiv belasteten Umgebungen und im Weltraum bis hin zu Bergungsaufgaben in Katastrophengebieten. Ob der Dual-Use-Aspekt autonomer Systeme in menschengefährdenden Umgebungen als Chance oder Risiko angesehen wird, hängt dabei vom politischen Blickwinkel ab.<sup>23</sup>

In Deutschland ist die öffentliche Forschung zu Technologien mit militärischem Anwendungspotenzial seit langer Zeit umstritten.<sup>24</sup> Viele öffentlich finanzierte Wissenschaftseinrichtungen haben sich durch eine **Zivilklausel** dazu verpflichtet, ausschließlich für zivile Zwecke zu forschen, und lehnen deshalb eine Zusammenarbeit mit der Verteidigungsindustrie ab. Einige befragte Expertinnen und Experten vertreten die Ansicht, dass Zivilklauseln in ihrer gegenwärtigen Form überholt seien. Als Alternative schlagen sie eine **Friedensklausel** vor.<sup>25</sup> Letztere würde es öffentlichen Forschungseinrichtungen ermöglichen, an Projekten zu arbeiten, die dem **Schutz des Gemeinwesens** vor inneren und äußeren Bedrohungen dienen.

„Wir brauchen eine Friedensklausel statt einer Zivilklausel.“

23 | Vgl. Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017.

24 | Vgl. Wörner/Rauch 2022.

25 | Vgl. Wörner/Schmidt 2022; Mohaupt 2013.

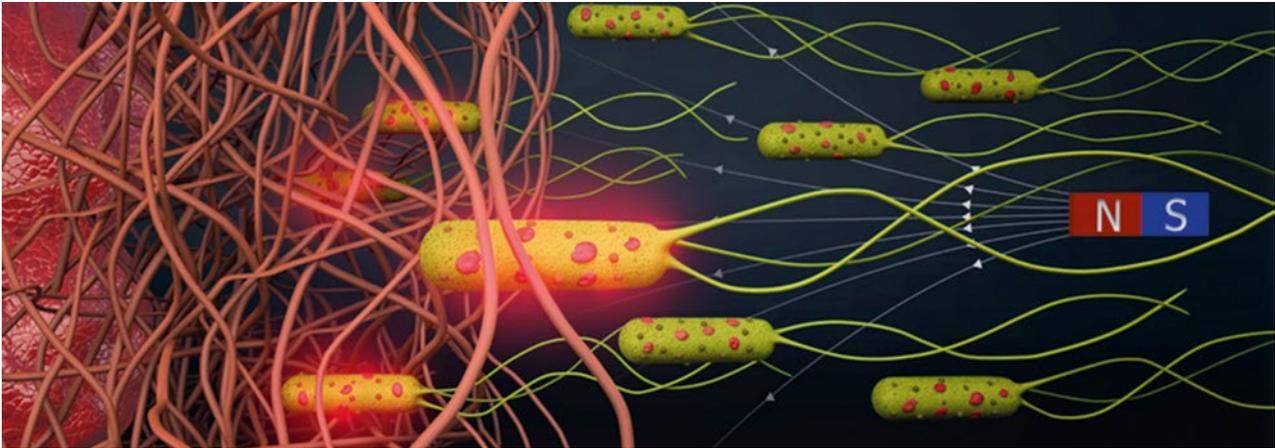


Abbildung 2: Schematische Darstellung bakterienbasierter Mikroroboter, die magnetisch durch faserige Umgebungen geführt werden (Quelle: Akolpoglu et al. 2022)

Einige der Befragten weisen auf den Mehrwert militärischer Forschung für zivile Anwendungen hin. Umgekehrt gibt es jedoch auch Bereiche, in denen **zivile Produkte technologisch weiter fortgeschritten** sind und für eine militärische Nutzung nur aufbereitet werden müssten.

Die militärische Beschaffungspolitik könnte in einigen Sektoren innovationspolitische Akzente setzen. Expertinnen und Experten weisen jedoch darauf hin, dass die Auftragsvergabe nie zulasten einer adäquaten Ausstattung gehen dürfe. Für die **militärische Beschaffungspolitik** sei entscheidend, dass die Bundeswehr den an sie gestellten **gesetzlichen Auftrag** vollumfänglich erfüllen könne.

**Zielkonflikte** können entstehen, wenn unabhängig vom Bedarf der Streitkräfte und von sicherheitspolitischen Bedenken anderweitige politische Ziele prioritär verfolgt werden. Dies kann die Pflege außenpolitischer Beziehungen, die Sicherung von Arbeitsplätzen in wirtschaftlich schwachen Regionen oder die industriepolitische Förderung von Spitzentechnologien einschließen.

Die sich verändernde **geopolitische Lage** erfordert daher eine **ergebnisoffene Diskussion** über das Verhältnis zwischen öffentlich finanzierter Forschung einerseits und Verteidigungsindustrie andererseits. Teilaspekt dieser in Gesellschaft, Politik, Wissenschaft und Wirtschaft zu führenden Debatte müssen neben den zentralen ethischen Fragen auch die durch einen Verzicht auf technologische Fähigkeiten verursachten Opportunitätskosten sein, beispielsweise als Folge strategischer Abhängigkeiten vom Ausland.

## 2.2 Zukünftige Anwendungsfelder der Robotik

**Biotechnologie und Robotik wachsen zusammen** und eröffnen **neue individualisierte Therapiemöglichkeiten mit großem medizinischem Bedarf**. In Deutschland arbeiten einige Firmen an maßgeschneiderten Krebsmedikamenten, die individuell auf die jeweiligen Patientinnen und Patienten abgestimmt sind. Um diese Zukunftsvision zu verwirklichen, beschäftigen Biotechnologieunternehmen auch Ingenieurinnen und Ingenieure, die zusammen mit Robotik-Unternehmen skalierbare Produktionsmethoden entwickeln.

Ein weiteres Beispiel für die Perspektiven der technologischen Entwicklung in diesem Feld sind die **Small-scale Robotics**, die sich mit der Erforschung und Entwicklung sehr kleiner robotischer Systeme befassen. Auch wenn zu diesem Feld noch vorwiegend Grundlagenforschung betrieben wird, kann Deutschland den befragten Expertinnen und Experten zufolge hier eine exzellente wissenschaftliche Forschung vorweisen. Daher besteht das Potenzial, Deutschland in diesem Technologiesektor durch gezielte Maßnahmen als einen **führenden Standort** zu platzieren.

### Small-scale Robotics

Mikro- und Nanoroboter besitzen große wirtschaftliche und gesellschaftliche Potenziale. Die Forschung auf diesem Gebiet befindet sich gegenwärtig noch im **Anfangsstadium**, allerdings

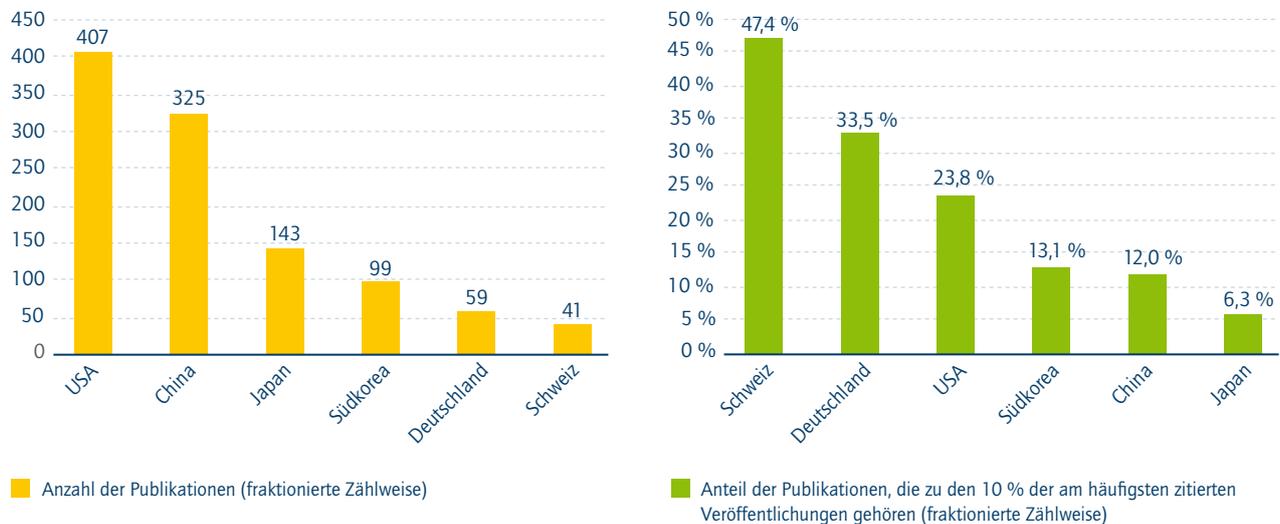


Abbildung 3: Anzahl der Publikationen und Citation Impact ausgewählter Länder zum Thema Small-scale Robotics (Quelle: Bornmann/Ettl 2022 und Inhouse-Datenbank der Max Planck Digital Library, basierend auf dem Web of Science)

wurden in den **vergangenen 15 Jahren erhebliche Fortschritte** gemacht. Der Großteil der aktuellen Forschung konzentriert sich auf **biomedizinische Anwendungen**. So könnten Mikro- und Nanoroboter zukünftig womöglich als Werkzeuge für eine gezieltere **Medikamentenverabreichung** am Wirkort oder für **chirurgische Anwendungen** genutzt werden. Wirkstoffe gegen Krebs könnten wesentlich effektiver und gleichzeitig schonender konzentriert werden, wenn sie zielgenau in den Tumor eingebracht werden würden.

Der Begriff Small-scale Robotics umfasst Systeme mit einer Größe im Milli-, Mikro- und Nanometerbereich. **Milliroboter** sind in etwa so groß wie durchschnittliche Insekten, **Mikroroboter** nähern sich bereits der Größe von Zellen, während **Nanoroboter** den Größenmaßstab von einem Mikrometer unterschreiten. Forschenden ist es bereits gelungen, Nanoroboter in der Größe von Bakterien (circa 800 Nanometer) zu konstruieren (siehe Abbildung 2).

Mit den Verkleinerungsschritten von der unmittelbar wahrnehmbaren Makrowelt bis hin zu Systemen auf Mikro- oder Nanoebene, die sich der menschlichen Sinneswahrnehmung entziehen, verändern sich die **physikalischen Eigenschaften** und damit die Anforderungen an die Roboter.

Die Fortbewegung oder die Steuerung dieser Mikro- oder Nanosysteme lassen sich nicht mit Konzepten der klassischen Ingenieurwissenschaften realisieren; in einem Mikroroboter ist etwa kein

Platz für herkömmliche elektronische Schaltungen. Dennoch gelingt mit diesen winzigen Robotern eine **gezielte Manipulation**, beispielsweise im Inneren des menschlichen Körpers, auf der Mikro- und Nanoebene. Die Steuerung kann etwa durch Magnetfelder, Ultraschall, Licht oder über chemische Gradienten erfolgen.

Eine Herausforderung ist es, diesen Maschinen Intelligenz „einzuprogrammieren“. **Intelligente Materialien** bilden dafür die Schlüsseltechnologie und sind wesentlich für zukünftige Erfolge, etwa für die Entwicklung ansteuerbarer Aktoren, Ventile und aktiver Oberflächen. Um die Anwendungsgrenzen der Small-scale Robots zu erweitern, sind Anstrengungen vor allem in **vier großen Forschungsfeldern** nötig:

- Fortbewegung
- **Biokompatibilität** und **biologische Abbaubarkeit** der Materialien
- **Kooperation** der Roboter untereinander und **kollektive Steuerung** durch den menschlichen Bediener
- in die physische Struktur eingebettetes **autonomes Verhalten**

Die Realisierung intelligenter Small-scale Robots bedarf auch weiterhin einen **stark interdisziplinären Ansatz**, bei dem Forschende unter anderem aus den Bereichen Materialwissenschaft, Ingenieurwesen, Physik, Chemie, Biologie, medizinische Bildgebung, Robotik und Maschinelles Lernen eng zusammenarbeiten und der im medizinischen Bereich zudem einer engen Kollaboration mit Klinikerinnen und Klinikern erfordert.



Aus Sicht der befragten Expertinnen und Experten leistet Deutschland bereits heute international wegweisende Beiträge zur Forschung auf diesem Gebiet. Als Stärken werden vor allem die **Qualität der akademischen Ausbildung** und die **hohe Kompetenz sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der angewandten Forschung** betont.

Deutschland hat ausgezeichnete Voraussetzungen, sich wissenschaftlich auf dem Feld der Small-scale Robotics zu etablieren. Nach der Schweiz weist Deutschland den **zweithöchsten Citation Impact** auf, der als Qualitätsmerkmal von wissenschaftlichen Publikationen gilt. Allerdings deuten die Zahlen der veröffentlichten Publikationen darauf hin, dass dieser Bereich in anderen Staaten wie den USA, China, Japan und Südkorea noch stärker beforscht wird (siehe Abbildung 3).

Als Schwächen werden in Deutschland neben dem **geringen Wagniskapital die mangelnden Karriereperspektiven** für talentierte Nachwuchsforscherinnen und Forscher beklagt. Mit der einsetzenden Gründung von **Start-ups** in Deutschland könnte sich zumindest das Problem der mangelnden Arbeitsplätze bald entschärfen lassen.

Damit Deutschland die gute Position im Bereich der Small-scale Robotics hält und weiter ausbaut, empfehlen die Befragten unter anderem eine vereinfachte Visaregelung für ausländische Top-Talente sowie unbürokratischere Regelungen für die Forschungsförderung und Forschungspraxis.

### 3 Analyse: Zentrale Stärken und Schwächen KI-basierter Robotik in Deutschland

Die vorliegende Analyse konzentriert sich auf **zentrale Stärken und Schwächen der KI-basierten Robotik in Deutschland**, strukturiert nach den Aspekten Markt und Wettbewerb, Technologie, Innovations- und Transferprozess sowie Wertschöpfungsnetzwerk. Die Ergebnisse basieren auf Experteninterviews, Hintergrundgesprächen und Besuchen in Exzellenzzentren, ergänzend wurde zudem eine Literaturrecherche durchgeführt.

#### 3.1 Marktsegmente, Wettbewerb und Marktumfeld

Robotik wird von den Befragten einstimmig als eine der **wichtigsten Schlüsseltechnologien** angesehen. Eine führende Position in Schlüsseltechnologien ist insbesondere relevant, wenn es um die **technologische Souveränität** Deutschlands und Europas geht und wird daher auch in der Zukunftsstrategie des BMBF hervorgehoben.<sup>26</sup>

„Robotik wird den Wohlstand in Deutschland erhalten.“

Nur wenn Deutschland im Bereich Robotik wettbewerbsfähig bleibt, können Produktivität und Wohlstand gesichert werden. Insbesondere KI-basierte Robotik hat das Potenzial, die **Wirtschaftskraft** Deutschlands zu stärken und dem **Fachkräftemangel** in vielen Branchen entgegenzuwirken.

#### Marktsegmente

Die Robotik lässt sich grob in vier Kategorien einteilen. In jedem dieser Anwendungsfelder besitzt die Verknüpfung von Hardware und KI disruptives Potenzial. Um seine Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und auszubauen, muss Deutschland in der breiten Anwendung KI-basierter Robotik und idealerweise auch in der Technologieentwicklung eine Führungsrolle einnehmen.

Die Robotik bietet aufgrund ihrer breiten Technologiebasis **vielfältige Anwendungsmöglichkeiten**, die sich in die folgenden Kategorien einteilen lassen:

- **Servicerobotik** unterteilt sich in mobile und stationäre Roboter:
  - **Mobile Serviceroboter** werden aufgrund ihrer Bewegungsfreiheit beispielsweise für Reinigungs- oder Bauarbeiten eingesetzt, sie kommen aber auch zunehmend unter Wasser oder in Gefahrenbereichen zum Einsatz.
  - **Stationäre Serviceroboter** finden beispielsweise im medizinischen oder auch landwirtschaftlichen Bereich Anwendung. Sie assistieren und entlasten den Menschen vor allem bei der Ausübung monotoner oder gefährdender Arbeiten.
- **Fahrerlose Transportfahrzeuge**, sogenannte **Autonomous Guided Vehicles (AGVs)**, werden überwiegend zum Transport von Waren in der (Intra-)Logistik verwendet.
- Industrieroboter und Cobots bilden die letzte Kategorie:
  - **Industrieroboter** dienen ebenso wie stationäre Serviceroboter der Entlastung des Menschen und übernehmen in der industriellen Fertigung klassische Fließbandarbeiten. Aus Sicherheitsgründen sind sie durch Schutzvorrichtungen vom menschlichen Arbeitsbereich getrennt und agieren somit ausschließlich in strukturierten Umgebungen
  - **Cobots** sind spezielle Industrieroboter, die dem Menschen bei gewissen Arbeitsschritten zuarbeiten. Je intelligenter und präziser Cobots sind, umso enger können Mensch und Maschine zusammenarbeiten, ohne durch Schutzvorrichtungen voneinander getrennt zu sein. Viele Industrieexpertinnen und -experten gehen davon aus, dass Cobots die Arbeitsweise der Zukunft entscheidend prägen werden.<sup>27</sup>

26 | Vgl. BMBF 2023.

27 | Vgl. Statista 2021.



In allen genannten Bereichen wird die **Kombination von KI und Roboterhardware** zu neuen Durchbrüchen in den jeweiligen Anwendungsbereichen führen. Innovationen sind in jedem der Bereiche für Hersteller und Anwender eine Voraussetzung, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

## Robotik als Wirtschaftsfaktor: Gesamtumsätze und Umsatzprognosen

Die Anwendung KI-basierter, lernfähiger Robotik in unstrukturierten Umgebungen ist ein entscheidender Wettbewerbsfaktor bei der Transformation der Fertigungsbasis Deutschlands. Die Automatisierung via Robotik als Kernelement wirtschaftlicher Industrie 4.0 muss dabei insbesondere auch im deutschen Mittelstand gelingen.

Robotik ist bereits heute ein **relevanter Wirtschaftsfaktor**, dessen Bedeutung weiter zunehmen wird. Für 2023 wird der globale **Jahresumsatz** des Robotik-Markts auf **circa 40 Milliarden US-Dollar** geschätzt. Laut Prognosen wird bis Ende des Jahrzehnts die **Servicerobotik** den Markt dominieren.<sup>28</sup> Die Entwicklungsprognose für Industrie- und Servicerobotik ist in Abbildung 4 dargestellt.

Das geschätzte Marktpotenzial der Servicerobotik beträgt bis zu **170 Milliarden US-Dollar** und wird damit voraussichtlich doppelt so hoch sein wie das der **Industrie- und Logistikrobotik** mit bis zu **90 Milliarden US-Dollar im Jahr 2030**.<sup>29</sup> Dabei wird der Einsatz von Robotern in **unstrukturierten Umgebungen** eine immer größere Rolle spielen. In diesem Kontext wird KI eine enorme Bedeutung haben, um intelligentes, adaptives Lernverhalten zu ermöglichen.

Für den Erhalt des Wohlstands und die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Deutschland ist die fertigungsnahe intelligente Automatisierung von höchster Priorität. **Industrie 4.0** wird nur dann erfolgreich sein, wenn sowohl in der **Produktion** als auch in der **Intralogistik** vermehrt KI-basierte Robotik Anwendung findet. Das große Potenzial der Servicerobotik kann basierend auf den Erfahrungen im industriellen Bereich erschlossen werden. Technologische Spillover-Effekte in die Servicerobotik sind insbesondere in den

Bereichen Bau, Landwirtschaft, aber auch in Haushalten, in der Pflege oder im Search-and-Rescue-Bereich zu erwarten. Die folgenden Betrachtungen fokussieren aber zunächst stärker auf die Industrierobotik.

## Hersteller von Industrierobotern

Die Weltmarktführer in der Industrierobotik kommen überwiegend aus Japan. Die Marktmacht chinesischer Anbieter nimmt aber zu und sollte im Rahmen von wirtschafts- und innovationspolitischen Initiativen zur strategischen Souveränität Deutschlands aufmerksam verfolgt werden, um kritische Abhängigkeiten zu vermeiden. Deutsche Hersteller entstammen vor allem dem Mittelstand und haben erfolgreich einzelne Nischen in der Robotik besetzt.

Die weltweit führenden Industrierobotik-Hersteller sind **Fanuc, Yaskawa, Epson, KUKA, Estun und ABB**. Damit dominiert Japan das Feld, wobei jedoch zunehmend chinesische Anbieter in den Markt drängen.

In **Deutschland** zeigt sich ein **gemischtes Bild** bei den Herstellern von Industrierobotik. Zwar wird die Fertigung nach wie vor von **Großunternehmen** aus dem Bereich Automatisierung und Logistik wie Dürr, Bosch Rexroth, Jungheinrich, KUKA, Linde oder SSI Schäfer dominiert. Allerdings finden sich auch **zahlreiche mittelständische Robotik-Spezialisten**, die spezifische Marktnischen für sich erschließen konnten und dort zu **weltweit führenden Roboterlieferanten** avanciert sind.<sup>30</sup>

Mehr als **drei Viertel der 50 größten Industrierobotik-Hersteller** in Deutschland sind auf die Entwicklung und Produktion eines **spezifischen Robotertyps** spezialisiert. Dabei fertigen die meisten der analysierten Unternehmen fahrerlose Transportsysteme, sechsachsige Knickarmroboter oder Linearroboter.

Bei Betrachtung der **Standortverteilung** der deutschen Top-50-Industrierobotik-Hersteller fällt auf, dass es hierzulande zu einer **Clusterbildung** gekommen ist: Mehr als drei Viertel der Unternehmen haben ihren Hauptsitz in den Bundesländern Baden-Württemberg (30 Prozent), Bayern (28 Prozent) und Nordrhein-Westfalen (20 Prozent).<sup>31</sup>

28 | Vgl. BCG 2021.

29 | Vgl. BCG 2021.

30 | Vgl. Meyer Industry Research 2020.

31 | Vgl. ebd.

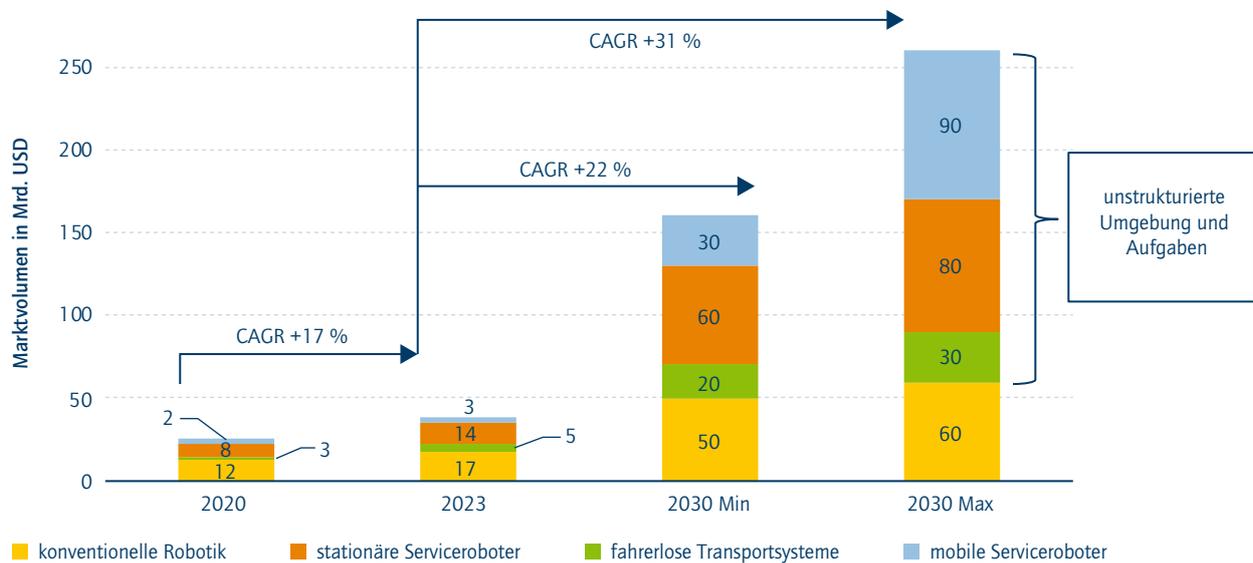


Abbildung 4: Prognose zur Marktentwicklung von Service- und Industrierobotik; Abkürzung: CAGR = durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf BCG 2021)

### Industrierobotik: Deutschland als Anwendermarkt im globalen Marktvergleich

Auf China allein entfällt fast die Hälfte der globalen Industrieroboternachfrage. Deutschland ist zwar noch unter den Top-5-Anwendungsländern der Welt, aber die Zahl der Neuinstallationen stagniert, während sie in anderen Wirtschaftsräumen steigt.

Der **Gesamtmarkt der Industrierobotik** belief sich 2022 nach Schätzungen auf rund **15 Milliarden US-Dollar**. Neben **China** wird der globale Markt noch von vier weiteren Ländern dominiert: **Japan, USA, Südkorea und Deutschland** (siehe Abbildung 5).

2021 wurden weltweit insgesamt **rund 520.000 Industrieroboter** neu installiert. Dies entspricht einer **Wachstumsrate von 31 Prozent** im Vergleich zum Vorjahr. Aktuell erreicht der weltweite Bestand an einsatzfähigen Industrierobotern einen neuen Rekord mit etwa **3,5 Millionen Stück**, eine Verdopplung allein in den letzten sechs Jahren.<sup>32</sup>

Zuletzt stiegen die Neuinstallationen in den USA und in Asien nach einem kurzen Rückgang während der Covid-19-Pandemie zudem wieder an. Bereits in den vergangenen Jahren hat sich **China** bezüglich der Neuinstallation von Industrierobotern an der **Weltspitze** positioniert. Seit 2015 verzeichnet das Land diesbezüglich einen **Zuwachs von 72 Prozent**, während die **Zahl der Neuinstallationen in Deutschland seit Jahren stagniert**. 2021 wurde die Hälfte der weltweit neu installierten Industrieroboter in China in Betrieb genommen, in Deutschland waren es lediglich 4,5 Prozent.<sup>33</sup>

Es wird geschätzt, dass China 2022 Industrieroboter im Wert von fast 6,7 Milliarden US-Dollar gekauft hat. **China** wäre damit nicht nur für **44 Prozent des Gesamtumsatzes** verantwortlich, sondern würde im Vergleich zu Deutschland auch das **Zehnfache** in neue Industrieroboter investieren.<sup>34</sup>

32 | Vgl. IFR 2022d.

33 | Vgl. IFR 2022c.

34 | Vgl. Statista 2021.

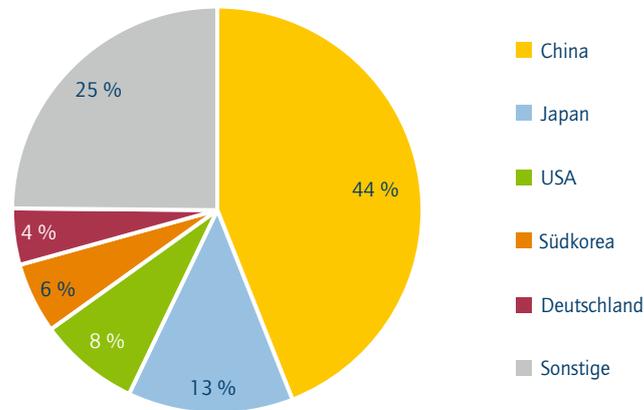


Abbildung 5: Weltweite Marktanteile der Industrierobotik (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Statista 2021)

### Abnehmerbranchen der Industrierobotik

International sind die Elektronik- und die Automobilindustrie Hauptabnehmer der Industrierobotik, in Deutschland ist es nur die Automobilindustrie. Intelligente Roboter erschließen in beiden Branchen neue Anwendungsfelder und öffnen weitere Branchen, vor allem solche mit unstrukturierten Arbeitsumgebungen, für erstmals großflächigen Robotereinsatz.

Global gesehen sind die beiden größten Abnehmer von Industrierobotern die **Elektronik- und die Automobilhersteller** (siehe Abbildung 6). Zusammengenommen machen diese Branchen **fast die Hälfte des globalen Industrierobotermarkts** aus, sie verlieren aber zunehmend ihre Dominanz.

Sowohl die Elektronik- als auch die Automobilherstellung erfordern ein **hohes Maß an Fertigungspräzision**. Damit eignen sich die entsprechenden Branchen ideal für die klassische Automatisierung durch traditionelle Roboter, die ausschließlich in **strukturierten Umgebungen** agieren können.

Neben dem Bedarf an klassischen Industrierobotern wächst aber auch das Interesse an **kollaborativen Robotern**. 2018 waren weltweit knapp 5 Prozent der 375.000 installierten Industrieroboter Cobots.<sup>35</sup> Bis Ende 2022 könnte sich dieser Anteil bereits verdreifacht haben (13 Prozent), und das Wachstum setzt sich fort.<sup>36</sup> Laut

Prognose werden innerhalb der nächsten 10 Jahre **über 50 Prozent der Hersteller in der Fertigungsindustrie** kollaborative Robotik in ihre Arbeitsprozesse integrieren.<sup>37</sup>

Neue Robotik-Generationen, die in **unstrukturierten Umgebungen** eingesetzt werden können, werden **neue Einsatzfelder** erschließen, beispielsweise in der Nahrungsmittelindustrie, in den Bereichen Kunststoffe und Chemie (siehe Abbildung 6) und vermehrt auch in Branchen wie Landwirtschaft, Bau sowie Gesundheit und Pflege.

Im internationalen Wettbewerb positionieren sich neben etablierten Anbietern auch **globale Spitzentechnologieunternehmen** mit Moonshot-Projekten im Bereich der KI-basierten Robotik, also technologisch äußerst ambitionierten Vorhaben. Die Alphabet-Tochter Intrinsic möchte den Industriemarkt erobern. Darüber hinaus hat Alphabet mit Everyday Robots als einem weiteren Tochterunternehmen Ambitionen, in den Markt für intelligente Haushaltsrobotik einzusteigen. Xiaomi und Tesla arbeiten an der Entwicklung eines humanoiden Roboters. Hyundai wiederum hat Boston Dynamics aufgekauft und 400 Millionen US-Dollar als Startkapital in ein Institut zur Entwicklung fortschrittlicher Roboter gegeben. US-Unternehmen wie Alphabet, Microsoft und Amazon haben in den letzten Jahren Ableger ihrer Forschungsbereiche in Städten wie München, Tübingen, Berlin oder Zürich angesiedelt, machen Angebote in ungeahnten Gehaltshöhen und greifen damit viele junge, exzellente Talente ab.

35 | Vgl. IFR 2020a.

36 | Vgl. Statista 2021.

37 | Vgl. IFR 2020b.

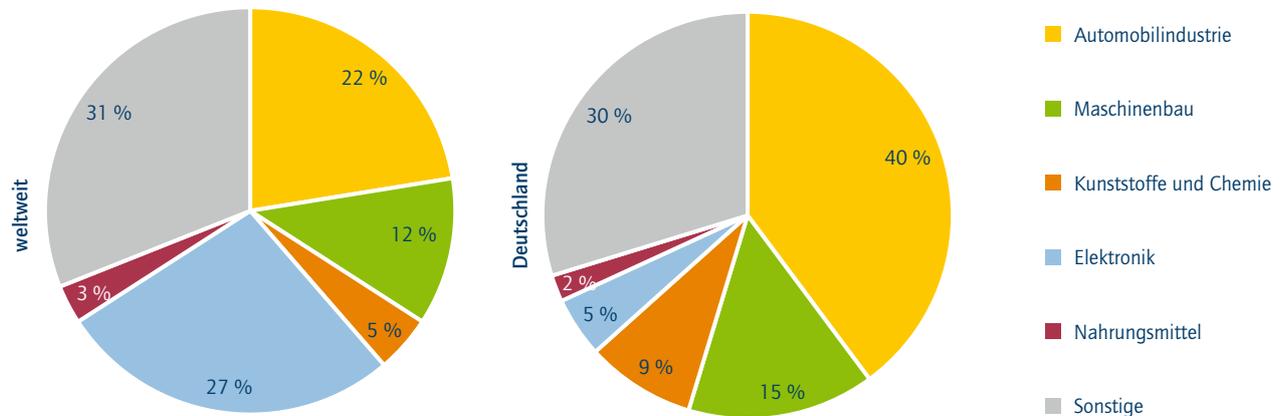


Abbildung 6: Abnehmerbranchen der Industrierobotik weltweit und in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Statista 2021)

### 3.2 Technologie: Von Automaten zu selbstlernenden, intelligenten Systemen

Die Robotik verändert sich tiefgreifend. Roboter gewinnen zunehmend Fähigkeiten, sich in unstrukturierten, veränderlichen Umgebungen zurechtzufinden und anspruchsvollere Aufgaben zu übernehmen. Die Aufschlüsselung der technologischen Bausteine zeigt, dass KI-basierte Robotik eine Deep-Tech-Innovation ist. Deutsche Stärken liegen in der starken Anwenderrolle und teilweise in der Forschung. Besondere Beachtung verdient die Digitalisierung, die für KI-basierte Robotik in der notwendigen Breite noch stattfinden muss.

Herkömmliche Robotersysteme werden überwiegend für vorprogrammierte, sich wiederholende **Bewegungsabläufe in strukturierten Umgebungen** eingesetzt. Dank signifikanter Fortschritte in der Robotik- und der KI-Forschung ändert sich dieses Bild grundlegend und in hoher Geschwindigkeit. Der Trend geht klar zu komplexen, höhergradig autonomen, KI-basierten Robotersystemen, die **anspruchsvolle Aufgaben in unstrukturierter Umgebung** wahrnehmen können, sich fortlaufend durch Lernverfahren anpassen und dabei einfacher zu bedienen sind.

„Robotische Systeme müssen zukünftig so einfach zu bedienen sein wie ein Smartphone.“

Beispielsweise erreichen Roboterarme durch gelerntes Fühlen extrem hohe Fügegenauigkeit in der Montage. Auch mobile Transportplattformen werden einfacher zu bedienen, weil sie neue Umgebungen hochautonom einlernen, Änderungen erkennen und sich im Betrieb selbstständig daran anpassen können.

Die neue Generation von Robotern wird synonym intelligente, KI-basierte oder kognitive Robotik genannt. Da dieser Trend in der vollen Breite Roboterarten und anwendungen erfasst, wird im weiteren Verlauf des Textes einfach von **KI-basierter Robotik** die Rede sein. Dies ist als vereinfachender Sammelbegriff gemeint; Fortschritte in der Hardwareentwicklung sowie Themen, bei denen KI nur am Rande zum Einsatz kommt, sollen darin enthalten sein. Abbildung 7 zeigt die grobe Gliederung eines KI-basierten Robotersystems in fünf Abschnitten, die in Abbildung 8 noch verfeinert wird.

- **Abschnitt 1** (links oben): Ein Systementwurf leitet sich aus den **Anforderungen reeller Anwendungen** ab. Dieser Schritt ist für die Wirksamkeit gerichteter Innovation essenziell, weil er Technologieentwicklung vorbei an den Marktbedürfnissen zu minimieren sucht. Unabhängig davon ist ungerichtete Innovation aus der Grundlagenforschung ebenso wichtig, insbesondere langfristig.
- **Abschnitt 2** (links unten): Intelligente Roboter unterscheiden sich stark von herkömmlichen Systemen durch die signifikant **gesteigerte Bedeutung von Software und Daten**. Komplexe Robotersysteme enthalten hunderttausende Zeilen von Quellcode. Die Bedeutung von **maschinellen Lernverfahren**

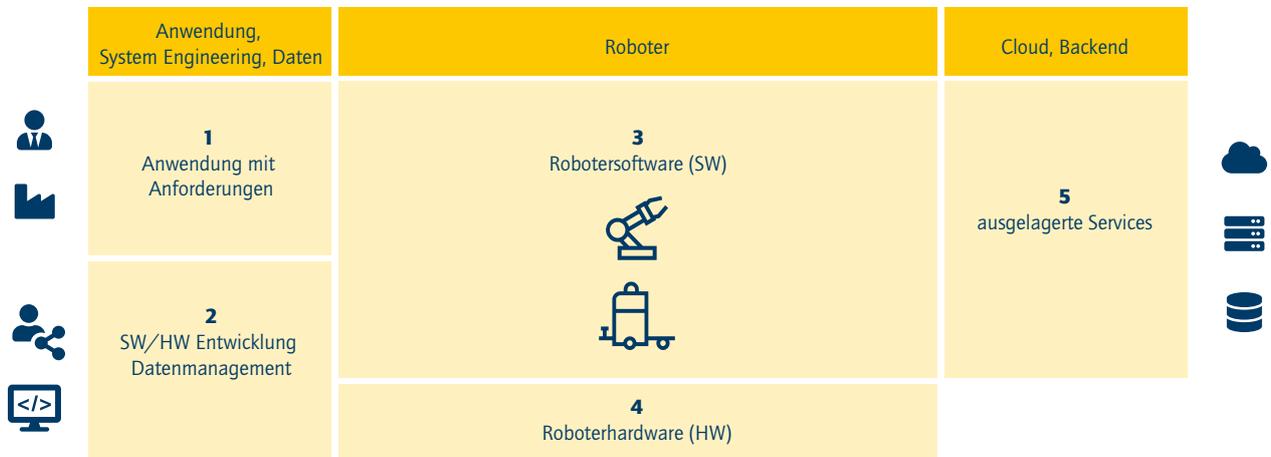


Abbildung 7: Grobgliederung KI-basierter Robotiksysteme (Quelle: Robert Bosch GmbH 2022)

nimmt in vielen funktionalen Bausteinen zu und erfordert die Verarbeitung großer Mengen an Daten. Die Entwicklung solcher Systeme geschieht in teils großen Teams von Softwareentwicklerinnen und -entwicklern, Algorithmusexpertinnen und -experten sowie Systemspezialistinnen und -spezialisten, die über eine moderne Tooling-Landschaft verfügen. Neben der Verarbeitung von Realdaten kommt dabei heute immer mehr **Simulation** zum Einsatz, in der möglichst realitätsnah simulierte Roboter in simulierten Welten ihrer Aufgabe nachgehen.

- **Abschnitt 3** (mittig oben): Jedem intelligenten Roboter sind **elementare funktionale Bausteine** gemein. Diese sind sehr forschungsintensiv und differenzierend am Markt:
  - **Wahrnehmung** (Perception, Fusion) verleiht Robotern die Fähigkeit, mittels Sensoren die Umgebung wahrzunehmen und darin Hindernisse, Objekte oder Menschen zu erkennen.
  - **Lokalisierung und Kartografierung** (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) verleihen mobilen Robotern die Fähigkeit, neue Umgebungen einzulernen (zu kartografieren), um sich darin zu lokalisieren, das heißt ihre Position in der Karte zu bestimmen. Das Kartenmodell hat weitere Funktionen, etwa als Digitaler Zwilling oder in der Mensch-Maschine-Interaktion.
  - **Planung** (Planning) ist die Grundlage intelligenten Verhaltens mit Beispielen wie Bewegungsplanung (wie kommt ein Roboter von A nach B?), Handlungsplanung (welche Aktionsreihenfolge führt am besten zum Ziel?) oder Abdeckungsplanung (mit welcher Bewegungsabfolge kann eine Fläche lückenlos abgefahren werden?).
  - **Motorische Fähigkeiten** (Motor Skill Learning) sind einzelne Fertigkeiten wie beispielsweise Greifen, Fügen,

Stecken für Montageroboter oder Bewegungsmanöver wie Andocken, Folgen, Kantenreinigen für mobile Service-roboter. Diese können dann durch Planen oder Lernen zu zielorientierten Aktionssequenzen zusammengesetzt werden.

- **Bewegungssteuerung und -regelung** (Motion Control) bezeichnet die möglichst zielloptimale Bewegungsausführung mittels Aktuatoren, beispielsweise Elektromotoren in robotischen Achsen.
- **Mensch-Roboter-Interaktion und Kollaboration** (Human-Robot Collaboration bzw. Human Machine Interface, HMI) bezeichnen Fähigkeiten zur Interaktion und Zusammenarbeit mit Menschen, die stark an Bedeutung gewonnen haben, weil leichtere Bedienbarkeit etwa für den Mittelstand, der nicht immer über interne Robotik-Integrationskompetenz verfügt, essenziell ist.

Unter den funktionalen Blöcken befinden sich wiederum **System-schichten** (Details siehe Abbildung 8), die wesentlich dafür sind, dass Roboter sicher, skalierend und synergetisch in vielen Anwendungen eingesetzt werden können. Zum Beispiel sorgen Open-Source-Initiativen für neue Standards in diesen Schichten, wie die weltweit verbreitete Robotik-Middleware ROS.

Ein Thema von zentraler Wichtigkeit ist **Robotersicherheit**. Mit den wachsenden Fähigkeiten der Roboter müssen Regulatorik und Standardisierung also stetig mit entwickelt werden. Hier gibt es ebenfalls starken Forschungsbedarf, beispielsweise in der Entwicklung standardisierter Prüf- und Testmethoden mit sehr großem Differenzierungspotenzial.

- **Abschnitt 4** (mittig unten): In der **Hardware** spiegelt sich die Vielfalt der Robotik wider – vom Mikroroboter über den

elastischen Manipulator bis hin zur mobilen Putzmaschine und zum Roboterarm für schwere Lasten. Sie alle bestehen aus Sensoren, Aktuatoren, eingebetteten und netzwerkfähigen Recheneinheiten. Das Gebiet der Roboterhardware ist ebenfalls forschungsintensiv; Themen sind beispielsweise die Erschließung neuer **Sensorprinzipien**, **Materialeigenschaften** (Soft Robotics) oder **Skalierungsdomänen** (Mikro-/Nanorobotik). Der letzte Aspekt wird gezielt und vertieft in Kapitel 2 aufgegriffen.

- **Abschnitt 5** (rechts): So wie die Spracherkennung heutiger Smartphones nicht auf den Geräten selbst läuft, sondern in der **Cloud**, also in externen Datenverarbeitungsstrukturen, werden rechenintensive KI-Algorithmen und andere zentrale Dienste wie die Flottenplanung immer mehr ausgelagert. Darüber hinaus produzieren Roboter mit ihren Sensoren große Mengen an Daten, die beispielsweise wesentlich für die fortlaufende Verbesserung vieler KI-lastiger Bausteine sind und Auskunft über den Betrieb im Feld oder die Kundenbedürfnisse geben.

„Im Deep-Tech-Bereich kann Deutschland noch abheben.“

Die enorme Komplexität dieses Technologiefelds macht aus KI-basierter Robotik eine **Deep-Tech-Innovation**. Bei Deep-Tech handelt es sich um Technologien, die tiefgreifend sind und hohes Disruptionspotenzial besitzen. Deep-Tech-Innovationen sind forschungsintensiv, gehen in der Umsetzung mit einem hohen Technologie- und folglich auch mit einem **hohen unternehmerischen Risiko** sowie mit langen Amortisationszeiten einher. Andere Beispiele für solche Technologien sind Quantencomputing, Autonomes Fahren oder Digital Health.

Die **deutschen Stärken und Schwächen** in der Technologie werden wie folgt gesehen:

Als Industrienation liegen die **Stärken** Deutschlands im Zugang zum Kunden, zu Märkten und im Schlüssel-Know-how in vielen Anwendungsdomänen. Kurze Wege zwischen Anbieter und Anwender und das Wissen um reelle Marktbedürfnisse sind wesentliche, darauf basierende Vorteile. Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, verändert sich dieses Bild, Anwendungsdomänen wie Elektronik gewinnen an Wichtigkeit, in denen aber andere Wirtschaftsräume führende Robotik-Abnehmer sind.

- **Schwächen** werden vor allem bei **Digitalisierungsthemen** gesehen. Diese reichen von der immer noch geringen Durchdringung des Mittelstands (siehe Kapitel 1) bis hin zur zahlenmäßig unzureichenden Ausbildung und Gewinnung

von Software-, Daten- sowie Cloud-Entwicklerinnen und Entwicklern, die Infrastruktur und Werkzeuglandschaften auf dem letzten Stand der Technik beherrschen. Viele Technologien der digitalen Vernetzung wie Cloud-Dienstleistungen sind fest in der Hand US-amerikanischer und chinesischer IT-Firmen. Für die Datenwirtschaft fehlt zudem in vielen Fällen eine ausreichend differenzierte Regulatorik.

- Die **Forschung** im Bereich Robotik-Software und Hardware ist in Deutschland im internationalen Vergleich gesehen zwar überdurchschnittlich, jedoch noch **ausbaufähig**. Eine zielgerichtete Stärkung der Forschung und Talentgewinnung sowie strukturelle Verbesserungen der Forschungsbedingungen an den Universitäten sind zentral für das Erreichen technologischer Führerschaft zur nachhaltigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit. Mehr dazu in Kapitel 4.2.

### 3.3 Wertschöpfungsnetzwerk

Die **herkömmliche Wertschöpfungskette** in der Robotik besteht vereinfacht aus dem Roboterhersteller, dem Systemintegrator und dem Endanwender. Der Roboterhersteller verkauft die Hardware – ob manipulierende Arme oder mobile Plattformen – mit Steuerung und Basisfunktionen, der Systemintegrator bettet den Roboter zuzüglich notwendiger Komponenten für Sicherheit oder Prozesse in die Anwenderumgebung ein, wo der Anwender das Robotersystem schließlich besitzt und betreibt.

In einzelnen Fällen können Akteure auch entfallen, wenn beispielsweise mehrere Rollen vom selben Unternehmen abgedeckt werden oder wenn der Anwender selbst über hohe Automatisierungskompetenz verfügt und keinen Integrator benötigt, etwa bei Großunternehmen der Automobilbranche.

Diese starre Kette bricht jedoch immer mehr auf, wird zum **Wertschöpfungsnetzwerk**, schafft Platz für neue Akteure und Partnerschaften (siehe Abbildung 9). Getrieben durch die Öffnung von Schnittstellen, Standardisierung und Spezialisierung entsteht so ein neuer Markt für Roboterkomponenten, die auf neuen **Marktplätzen** angeboten werden, wie im Fall des UR+ Store von Universal Robots, dem führenden dänischen Hersteller von kollaborativen Robotern.

Insbesondere technisch anspruchsvolle Komponenten wie KI-basierte Wahrnehmung und smarte Aktorik sind überproportional gefragt.<sup>38</sup> Weiterhin geben **Geschäftsmodellinnovationen**, die

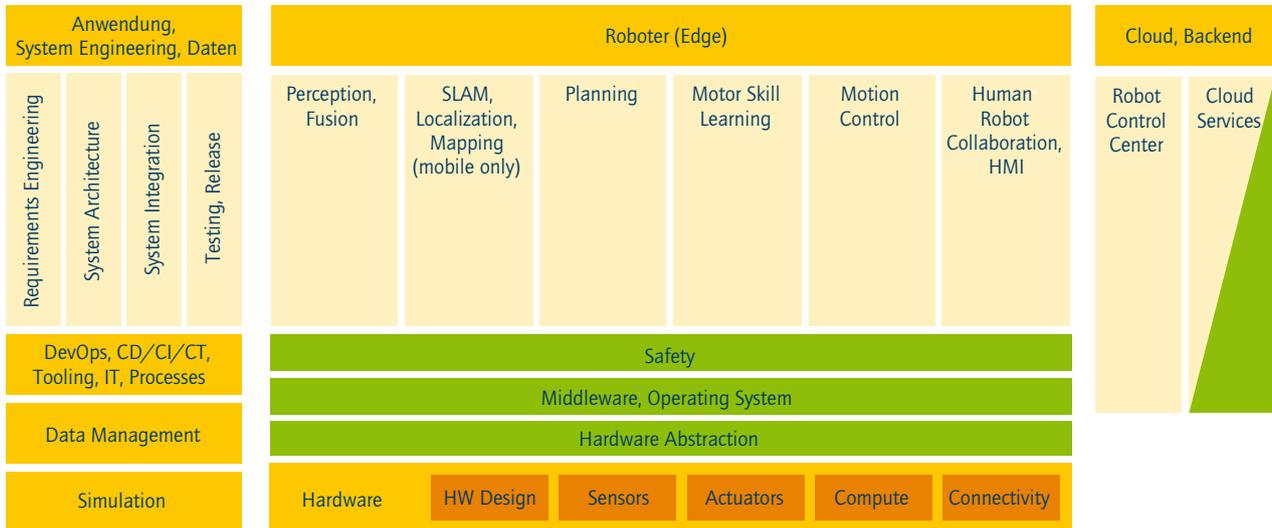


Abbildung 8: Feingliederung KI-basierter Robotersysteme. Die Darstellung zeigt das vollständige Bild, nicht jedes System enthält zwingend alle Bausteine. Die Entwicklung endet typischerweise nicht mehr mit dem Verkauf des Geräts, sondern ist fortlaufend, indem Daten aus dem Feld zurück in die Anforderungsdefinition, SW-Entwicklung und Verbesserung KI-basierter robotischer Fähigkeiten fließen (Quelle: Robert Bosch GmbH 2022).

wie Robot-as-a-Service (RaaS) auf Daten oder Dienstleistungen basieren, Raum für neue Betreiberkonzepte und Akteure.

Die Rollen im Robotik-Ökosystem (siehe Abbildung 9) sowie die **Stärken und Schwächen** in Deutschland sind wie folgt:

- 1./2. **Komponentenlieferanten:** Deutschland hat traditionelle Stärken in Maschinenbau und Mechatronik und eine reichhaltige Start-up-Landschaft für die Hardware- und Softwarekomponenten manipulierender und mobiler Roboter. Junge, innovative Firmen profitieren besonders von einem einfachen Marktzugang über neu entstehende Marktplätze (zum Beispiel UR+ Store oder Franka World). Hier ist es wichtig, durch eigenes Engagement Standards mitzugestalten und an der Wertschöpfung der entstehenden Marktplätze zu partizipieren.
3. **Robotik-OEMs:** Es ist eine große Dynamik durch Start-ups und mittelgroße Hersteller von kollaborativen Roboterarmen und AGV/AMR-Transportplattformen festzustellen. Etablierte Erstausrüster (englisch: Original Equipment Manufacturers, OEMs) stehen unter hohem Preisdruck, auch durch chinesische Wettbewerber. Große Akteure bringen sich mit Akquisitionen in Position. Nachdem KUKA als einziger großer Robotik-OEM nicht mehr in deutschem Besitz ist, ist diese zentrale Rolle im Ökosystem industriepolitisch durch neue Akteure abzusichern. Ein fehlender deutscher OEM ist zwar für die Anwenderindustrie nicht unmittelbar problematisch,

solange es gut verfügbare internationale Angebote gibt, aus Souveränitätsgründen allerdings durchaus wünschenswert.

4. **Systemintegratoren:** Produktion und Logistik für das klassische Automatisierungsgeschäft sind in Deutschland zwar kompetent ausgeprägt, müssen sich aber dem Wandel durch Digitalisierung, Datenwirtschaft und KI-basierte Robotik stellen. Neue Kompetenzen und Fachkräfte wie Computer-Vision-Technikerinnen und -techniker werden hierfür in hoher Zahl benötigt.<sup>39</sup> Systemintegratoren, denen diese Anpassung gelingt, können die Innovationstreiber und Profiteure des Wandels werden. Handhabbare Lösungsbaukästen sind dabei ein Mittel, um in neue Anwendungen vorzustoßen, die bisher nicht wirtschaftlich waren. Herausforderungen liegen darüber hinaus in der Erschließung neuer Anwendungsfelder für Roboter, beispielsweise im Bau- oder Gesundheitswesen, wo die Endanwenderumgebungen besondere Anforderungen stellen.
5. **Betreiber:** In Zukunft stellen neue Geschäftsmodelle auf der Basis von Daten oder Dienstleistungen besondere Herausforderungen dar. Hier entsteht Raum für die neue Rolle des Betreibers, der auch nach Verkauf für den effizienten Betrieb der Robotik-Leistung in einem Anwendungsfeld verantwortlich bleibt. Die strategische Bedeutung und der entsprechende Anteil der Wertschöpfung werden davon abhängen, wie der Zugang zu Daten aus dem Feld im Ökosystem verteilt sein wird.

39 | Vgl. IFR 2020b.

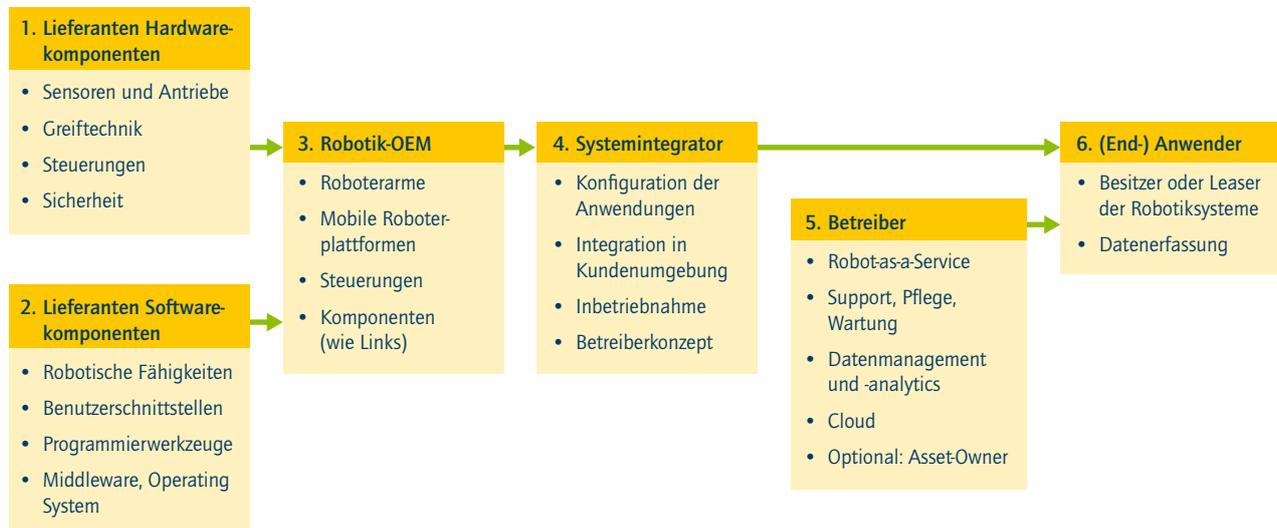


Abbildung 9: Modernes Wertschöpfungsökosystem der Robotik. Die einst starre Kette Roboterhersteller – Integrator – Anwender bricht auf, schafft Platz für neue Akteure und lässt strategische Kontrollpunkte wie Marktplätze für Komponenten oder differenzierende KI-basierte robotische Fähigkeiten entstehen. Größere Unternehmen sind in der Lage, mehrere dieser Rollen gleichzeitig zu übernehmen (Quelle: Robert Bosch GmbH 2022).

6. **(End-)Anwender:** Deutschland ist als Industrienation traditionell stark in der Anwenderrolle in Produktion und Logistik mit Zugang zu Märkten, Kunden sowie kritischem Domänenwissen. Die Integration von KI-basierter Robotik stellt Anwender branchenübergreifend vor neue Herausforderungen hinsichtlich sich verändernder Berufsbilder und Kompetenzbedarfe. Auch besteht in neuen Anwendungsfeldern wie Bau, Landwirtschaft, Gesundheit, Pharma, Haushalt oder Kreislaufwirtschaft – für die ein steigender Automatisierungsbedarf prognostiziert wird – eine sehr unterschiedliche Digitalisierungskompetenz und Risikobereitschaft in Bezug auf Implementierung KI-basierter Robotik.

Wie bereits in Kapitel 3.2 ausgeführt, handelt es sich bei KI-basierter Robotik um **Deep-Tech**, also um forschungsintensive Technologien mit **hohem Disruptionspotenzial**, mit risikoreicher Umsetzung und langen Amortisationszeiten. Aktuell sind in Deutschland die meisten Teilnehmer des Wertschöpfungsnetzwerks, darunter selbst Großunternehmen, überfordert damit diese Technologie skalierend in den Markt zu bringen und zu einem neuen globalen OEM im Bereich der KI-basierten Robotik zu werden. Damit Deutschland in der Robotik Weltspitze wird, ist eine **nationale innovationspolitische Anstrengung** erforderlich.

### 3.4 Innovations- und Transferprozess

Die Innovationslandschaft in Deutschland ist breit und gut aufgestellt. Bei Deep-Tech-Innovationen wie der KI-basierten Robotik ist insbesondere der Übergang von der Machbarkeitsanalyse zur Industrialisierung und Skalierung kritisch. Hier wird ein Pull-Effekt seitens der Anwenderindustrie benötigt, um eine praxisnahe Marktperspektive zu eröffnen und so einen effektiven, zielgerichteten Transferprozess von der Forschung zur Anwendung zu bewirken.

Im Innovations- und Transferprozess sollen aus guten Ideen rasch neue Produkte und Dienstleistungen entstehen sowie Umsätze generiert werden. Dieser Prozess ist sehr herausfordernd; insbesondere bei forschungsintensiven Technologien wie der KI-basierten Robotik ist er langwierig und involviert viele verschiedene Akteure. In Abbildung 10 ist der **Innovations- und Transferprozess mit den typischen Phasen** dargestellt.

Deutschland ist mit seinen starken universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, Großunternehmen, Start-ups und einem Mittelstand der Weltklasse vollständig und gut aufgestellt. Damit der **Technologietransfer** gelingt, ist aber mehr erforderlich: Ideen, die einen **reellen Bedarf** befriedigen,



zum **richtigen Zeitpunkt** kommen, **genug Mittel** erhalten und exzellent umgesetzt werden.

Auch das Überwinden kultureller Hürden gehört dazu, wie befragte Expertinnen und Experten bestätigen. Sie konstatieren große Lücken zwischen Forschung und industrieller Anwendung. Aus Sicht der Industrie besteht bei Forschenden oftmals ein **mangelndes Verständnis für die Bedürfnisse der Industrie**, umgekehrt zeigen aus Sicht der Wissenschaft viele Unternehmen eine **unzureichende Innovationsbereitschaft**.

## Übergänge und Rahmenbedingungen

Zur Verbesserung des Zusammenspiels der Akteure sind die Übergänge und Rahmenbedingungen des Transferprozesses zu betrachten. Start-ups werden nachfolgend separat dargestellt.

- **Übergang 1:** Universitäten und Fachhochschulen sowie die außeruniversitären Einrichtungen (Max-Planck-Gesellschaft, Fraunhofer-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft und Leibniz-Gemeinschaft) decken das Spektrum von der reinen Grundlagenforschung über die anwendungsorientierte Grundlagenforschung bis hin zur anwendungsbezogenen Entwicklung gut ab, und es kann von einem fließenden Übergang gesprochen werden. Insbesondere Deutschland hat starke Akteure, die Ergebnisse der angewandten Forschung in Richtung Anwender transferieren; zum Beispiel tritt die Fraunhofer-Gesellschaft auch als Forschungsdienstleister für den Mittelstand auf. Die **strikte Arbeitsteilung** zwischen öffentlich finanzierter Grundlagenforschung und privat finanzierter angewandter Forschung hat sich jedoch insbesondere in den Bereichen von KI und Robotik **aufgelöst**.

„Unternehmen müssen aktiv an der Wissenschaft teilnehmen wollen, sich als Teil der Wissenschaft begreifen.“

- Kapitalstarke **Großunternehmen**, viele davon **Plattformunternehmen aus den USA**, betreiben **selbst anwendungsorientierte Grundlagenforschung**. Dabei ziehen die höheren Gehälter, die bessere Forschungsinfrastruktur und die Perspektive, wissenschaftliche Inventionen in Innovationen zu transformieren, viele der besten Talente an. Die öffentliche Forschung in Deutschland muss auf diese aktuellen Entwicklungen Antworten finden, um in Zukunft mit Spitzenstandorten in Asien und Nordamerika konkurrieren zu können.

- **Übergang 2:** Hier trifft oft Wissenschaft auf Wirtschaft, und Technologielösungen treffen auf Marktbedürfnisse. Viele Fördermaßnahmen und öffentlich-private Partnerschaften wie die BMBF-Forschungscampus schaffen Möglichkeiten der Begegnung, aus denen Partnerschaften hervorgehen. Typischerweise münden diese in Machbarkeitsstudien (Proof of Concepts) mit dem Ziel, nachzuweisen, dass eine Produktentwicklung prototypisch den kritischen Anforderungen der Anwendung gerecht werden kann. Dieser Schritt ist oftmals kritisch und schafft nicht die notwendige Voraussetzung für den Weg in den Markt.
- **Übergang 3:** Der Weg vom Machbarkeitsnachweis zum erfolgreichen Produkt am Markt ist lang, wissens- und kapitalintensiv. Aus Prototypen muss ein robustes, hoch qualitatives, in Stückzahlen produzierbares, zertifiziertes Erzeugnis werden, das den Anwendererwartungen entspricht und zudem wirtschaftlich ist. Bei forschungsintensiven, potenziell disruptiven Technologien wie der KI-basierten Robotik erfordert dies viel unternehmerische Weitsicht, Risikobereitschaft und Ausdauer. Dieser Übergang ist die **größte Schwachstelle** im nationalen Innovationsprozess, was sich in verschiedenen Ausprägungen zeigt:
  - Start-ups treffen auf zögerliche Mittelständler, die gemischte Erfahrungen mit Digitalisierungsprojekten gemacht haben.
  - Universitäten entwickeln für Großunternehmen neue Technologien, die am Markt zwar stark differenzierend wären, aber zugunsten risikoärmerer Innovationen in angrenzenden Geschäften zurückpriorisiert werden.
  - Fraunhofer-Institute entwickeln beeindruckende Prototypen für Partner, die zwar den Handlungsdruck zur Automatisierung erkannt haben, aber vor der Investition in den Aufbau eigener Robotik-Expertise für die Industrialisierung zurückschrecken.

Von großer Bedeutung für einen erfolgreichen Transferprozess sind auch die **Rahmenbedingungen**:

- **Innovationspolitik:** Wie im aktuellen Gutachten der *Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)* zu *Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands* dargelegt wird, sollte das innovationspolitische System Deutschlands strategisch weiterentwickelt werden. Inkrementelle Produktverbesserungen, die das Land in den letzten Dekaden Wohlstand beschert haben, reichen nicht mehr aus, um den transformativen Wandel zu gestalten. Vorgeschlagen wird eine **agile missionsorientierte Politik**, die Zielvorgaben macht, deren Erreichung dann im Rahmen von Evaluationen nachgehalten wird<sup>40</sup>.

40 | Vgl. EFI 2022.

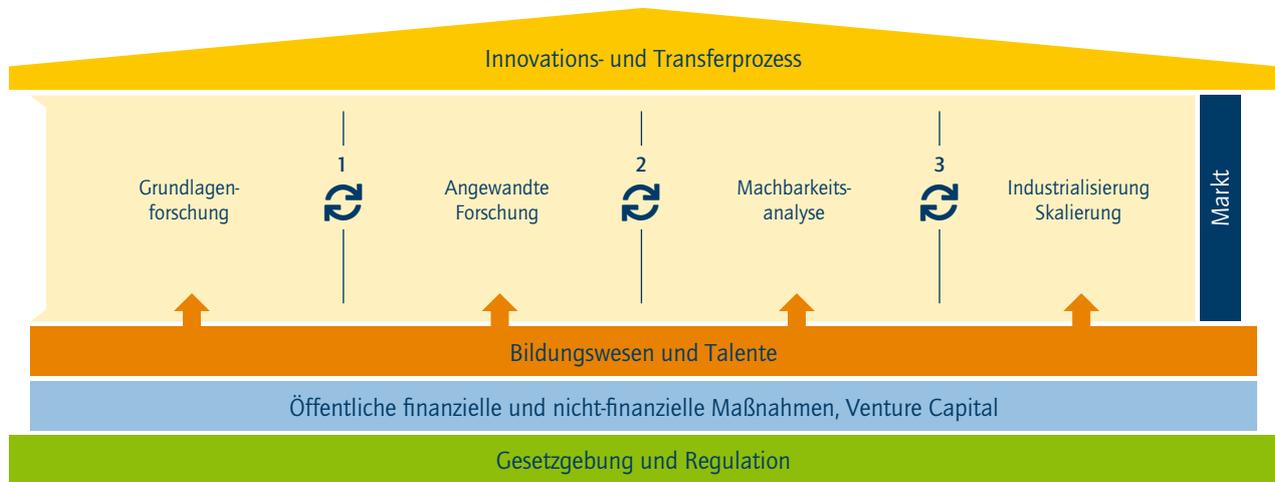


Abbildung 10: Innovations- und Transferprozess. Ideen aus der Grundlagenforschung gelangen über die angewandte Forschung in die Machbarkeitsanalyse und schließlich über die Industrialisierung in den Markt. Dabei gewinnen sie an technologischer Reife und passieren die Übergänge 1 bis 3. Viele bestehende Fördermaßnahmen, insbesondere öffentlich-private Partnerschaften, zielen darauf, Akteure der Forschung mit denen der Wirtschaft am Übergang 2 zusammenzubringen. Die vorliegende Analyse macht aber deutlich, dass aufgrund der hohen unternehmerischen Risiken und der langen Amortisationszeiten von KI-basierter Robotik das schwächste Prozesselement bei der Industrialisierung und Skalierung liegt (Übergang 3). (Quelle: Robert Bosch GmbH 2022).

- Zudem fordert die Expertenkommission eine Stärkung von Schlüsseltechnologien, zu denen die Robotik zählt. Um den Robotik-Standard Deutschland weiterzuentwickeln, schlagen die interviewten Expertinnen und Experten eine Abkehr von der Gießkannenpolitik vor. Standorte, die bereits heute in den relevanten Disziplinen eine international starke Stellung haben, haben bessere Chancen sich als **Robotik-Hubs** im globalen Standortwettbewerb zu etablieren. Im Rahmen der Wissenschafts- und Technologiepolitik ist deshalb die Förderung der Spitze intelligent mit der Förderung der Breite zu verknüpfen, um den Standort Deutschland als Ganzes weiterzuentwickeln.
- **Regulierung:** Eine innovative Regulatorik zur Robotersicherheit, die nationale und internationale Normen, Teststandards und Zertifizierungskompetenz entwickelt, wäre ein strategischer Kontrollpunkt und würdehandfeste Wettbewerbsvorteile für die deutschen Marktakteure schaffen. Im Detail geht es um die Entwicklung von Prüf- und Testverfahren mit dem Ziel, Grundlagen für die Gewährleistung von Arbeitsschutz sowie Rechtssicherheit und Klarheit in Haftungsfragen für das Inverkehrbringen von KI-basierten Robotern zu schaffen.
- Durch den KI-Anteil entstehen zusätzliche Herausforderungen wie die Gewährleistung sicheren Maschinellen Lernens, von Datensicherheit und Regeln für den Datenzugang sowie die einer sicheren Interaktion. Die Regulatorik muss
  - branchenübergreifend für stationäre wie mobile Roboter entwickelt werden. Daher sollte eine effektive **Standardisierungs- und Zertifizierungshoheit** strategisch entwickelt und international aufgestellt werden. Wenn dies nicht geschieht, läuft Deutschland Gefahr, in der Schlüsseltechnologie Robotik-Zertifizierung, insbesondere in Anbetracht der massiven Bemühungen und Investitionen Chinas in diesem Gebiet, ins Hintertreffen zu geraten. Das BMWK-Konzept der Reallabore, verstanden als Freiräume für die rechtssichere Erprobung von Innovationen unter realen Bedingungen, kommt diesem Bedarf entgegen.
  - **Bildungswesen und Talente:** Die Wichtigkeit einer genügend großen Anzahl und Qualität von Robotik- und KI-Talenten wurde schon in Kapitel 4.2 erwähnt und wird in Kapitel 5.2 weiter vertieft. Kernherausforderung ist, dass Robotik-Nachwuchstalente in allen Phasen des Innovationsprozesses (siehe Abbildung 10) und aus dem ganzen Spektrum des tertiären Bildungsbereichs in Deutschland benötigt werden: von angehenden Spitzenforschenden mit Promotion oder Habilitation über Universitäts- und Fachhochschulabsolventinnen und -absolventen auf Master- und Bachelorniveau bis hin zu Spezialistinnen und Spezialisten mit Fachschulabschluss und hohem Praxisbezug. Auch in der Berufsausbildung müssen praxisnahe Robotik-Qualifikationen verstärkt vermittelt werden.



## Start-ups und Wagniskapital

Das Angebot der **deutschen Robotik-Start-ups** reicht von neuen Robotik-OEMs für kognitive kollaborative Roboter oder autonome Transportplattformen über Komponentenanbieter für das Greifen unbekannter Objekte bis hin zur intelligenten Steuerung von Roboterflotten.

Die Herausforderung für Robotik-Entrepreneure besteht darin, dass – wie auch bei anderen jungen Deep-Tech-Unternehmen – die Produktentwicklung überdurchschnittlich **langwierig und kostenintensiv** ist. Dazu kommen **deutsche Schwächen** in Bezug auf Wagniskapital: Die durchschnittliche Investitionshöhe von Risikokapital liegt in Deutschland um den Faktor 2,7 hinter der von Großbritannien, um den Faktor 4,1 hinter den USA und um den Faktor 5,2 hinter China. Das ist für Start-ups kein ideales Umfeld, wie für Fertigung und Robotik bereits festgestellt wurde.<sup>41</sup>

Bislang hat es eine überschaubare Anzahl von Robotik-Start-ups geschafft, sich **Finanzierungen** in signifikantem Umfang zu sichern. Mit Agile Robots hat Deutschland sein erstes Robotik-Einhorn. Unter anderem konnten auch die Start-ups Wandelbots, Fruitcore oder Micropsi im letzten Jahr ihre Finanzierungsrunden erfolgreich abschließen. Aktiv mit Investments in Robotik-Start-ups sind dabei Tech-Investoren, Investmentgesellschaften, Private-Equity-Firmen und Venture-Capital-Fonds ebenso wie Business Angels, Family Offices und Konzerne aus China.

Das in Deutschland vorhandene Wagnis- und Wachstumskapital konzentriert sich vor allem auf die Seed- und Exit-Phase von Start-ups und Wachstumsunternehmen. Daraus entsteht eine **kritische Investitionslücke in der Wachstumsphase**, die vorwiegend durch ausländisches Venture Capital überbrückt wird. Dieses Angewiesensein auf ausländische Investoren aufgrund des **mangelnden heimischen Kapitalangebots** birgt zusätzlich zu möglichen Sicherheitsfragen die Gefahr, dass Know-how abfließt, Talente abwandern oder sogar Unternehmen komplett ins Ausland verlagert werden.

Junge Robotik-Start-ups tun sich schwer, **Kunden aus dem deutschen Mittelstand** zu akquirieren. Dort wächst zwar durch den Fachkräftemangel der Handlungsdruck zugunsten einer stärkeren Automatisierung des Fertigungsbetriebs. Jedoch sind viele KI-basierte Roboter keine Fertiglösungen, die einfach zu skalieren wären. Durch den **Mangel an Risikokapital und Skalierungsexpertise** scheitern viele Jungunternehmen so am Übergang vom Machbarkeitsnachweis zum konkreten Produkt.

Auch die Überregulierung und eine nachteilige Gesetzgebung bezüglich der Abschreibungsmöglichkeiten für Forschung und Entwicklung und der Vergütung in Form von Unternehmensbeteiligungen, werden von den Befragten als Standortnachteile genannt.

41 | Vgl. KfW Research 2020.

## 4 Robotikstrategie

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Bedeutung der KI-basierten Robotik für Deutschland als Industriestandort sowie ihr Marktpotenzial aufgezeigt. Es wurde erläutert, in welche Richtung sich die Technologie weiterentwickeln wird und welche Elemente im Innovations- und Transferprozess für eine erfolgreiche Industrialisierung wesentlich sind.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen gilt es im Folgenden eine Strategie abzuleiten, mit der Deutschland die übergeordneten **Ziele zur Wettbewerbsfähigkeit, Technologiesouveränität, Resilienz und Nachhaltigkeit** erreichen kann.

Der hier gewählte **Ansatz der Anwenderorientierung und -incentivierung** ist ein zielgenauer Vorschlag für die Herausforderungen der spezifischen Transferhürden KI-basierter Robotik gerade auf den letzten Schritten zum Markt. Er ist damit als **komplementäres Steuerungsinstrument** zur weiterhin essenziellen kraftvollen öffentlichen **Förderung der Grundlagenforschung** im Robotikbereich zu verstehen.

### 4.1 Wettbewerbsfähigkeit durch Anwenderorientierung

Angesichts der beträchtlichen Herausforderungen des Markts, der Technologie und des Transferprozesses braucht es einen ökonomischen Anreiz bei der Anwendung, um einen Pull-Effekt zu erzeugen. Das Ziel, Deutschland zum Leitenden für KI-basierte Industrie- und Servicerobotik zu entwickeln, ermöglicht ein großes Wertschöpfungspotenzial und erfüllt die innovationspolitischen Anforderungen bezüglich technologischer Resilienz, Demografie und Nachhaltigkeit. Die ausgeprägte Industrie 4.0-Kompetenz in Deutschland und das starke Domänenwissen hierzulande steigern die Erfolgswahrscheinlichkeit bei der Umsetzung. Parallel zur Skalierung der Automatisierung in die Breite der deutschen Industrie ist die Weiterentwicklung zukünftiger Robotik-Systeme daher wirtschafts- und innovationspolitisch voranzutreiben.

Deutschland als Industrie- und Produktionsstandort kann die Zukunft der Robotik nur mitgestalten und seine **Souveränität** wahren, wenn der Zugriff auf notwendige Technologien und Kompetenzen in Europa gesichert ist.

Wie in Kapitel 3.1 zur Marktanalyse bereits dargelegt wurde, entwickelt sich die chinesische Industrierobotik sehr dynamisch. Darüber hinaus gewinnt **China** durch die Komplettübernahme von KUKA und mehrere Mehrheitsbeteiligungen an deutschen Robotik-Start-ups (unter anderem am einzigen deutschen Robotik-Einhorn Agile Robots sowie an Neura Robotics) für die deutsche Robotik-Industrie zunehmend an Bedeutung. Die befragten Vertreterinnen und Vertreter aus der Wirtschaft bewerten die Situation derzeit noch als unkritisch. Allerdings sollte diese Entwicklung sorgfältig beobachtet werden, um gegebenenfalls **frühzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen** zu können.

Um das hohe wirtschaftliche und strategische Potenzial der KI-basierten Robotik zu erschließen und seine technologische Souveränität im produzierenden Gewerbe abzusichern, kann Deutschland auf seinen **Stärken in der Forschung**, der auf **klassischen Ingenieursfähigkeiten** basierenden Hardwareentwicklung und dem **ausgeprägten Domänenwissen** seiner Industrie aufbauen. Die Kompetenzen bei Industrie 4.0 stellen eine gute Basis für eine Steigerung der Automatisierung dar, sie sind allerdings noch weiter zu stärken. Die Bedeutung von Industrie 4.0 und die Notwendigkeit KI-basierter Robotik für deren Skalierung wurden in den Kapiteln 1 und 2 ausführlich behandelt.

Eine nachhaltige wettbewerbsfähige Position bei der KI-basierten Robotik erfordert aber noch deutlich mehr. Wie auch bei anderen Deep-Tech-Innovationen müssen sich Politik, Wirtschaft und Wissenschaft mit ihren Maßnahmen untereinander abstimmen und sich koordinieren, da nur so das gemeinsame Ziel eines **starken Robotik-Ökosystems** verwirklicht werden kann. Die Regierung ist an dieser Stelle gefordert, einen international konkurrenzfähigen innovationspolitischen Rahmen zu setzen, in dem solch ein Ökosystem gedeihen kann. Am effektivsten sind in diesem Zusammenhang markt- und anwenderorientierte Anreize, die einen Pull-Effekt auslösen und eine **Incentivierung der Anwendung** ermöglichen.

Die Förderung des Anwenders sollte zum einen an den Markterfolg gekoppelt sein. Da dieser nur in Kooperation mit anderen Partnern erreicht werden kann, ist der Anwender motiviert, die **benötigten Kompetenzen in einem Konsortium zusammenzubringen** und hinreichende finanzielle Mittel an die Teilnehmer weiterzugeben. Andererseits müssen finanzielle Mittel frühzeitig bereitgestellt werden, da insbesondere Start-ups oder kleinere Mittelständler auf entsprechende Einnahmen angewiesen sind. Dies kann zum Beispiel über Projektförderung für die Konsortiumsmitglieder erfolgen.



„In Deutschland gibt es viel zu viel Klein-Klein. Für eine erfolgreiche Durchdringung ist jedoch die Bündelung der Kräfte entscheidend.“

Die an einer marktorientierten Anwendung ausgerichteten Konsortien, bestehend aus Innovationsanbietern wie Start-ups, KMU und Großunternehmen, werden als **Robotope** bezeichnet. Mehrere dieser Robotope sind die Basis für ein starkes Robotik-Ökosystem in Deutschland. Dieses Ökosystem ist nicht nur wesentliche Voraussetzung für einen Leitanwendermarkt, sondern auch möglicher Kristallisationspunkt für einen international wettbewerbsfähigen Robotik-OEM, wie das Beispiel von Universal Robots aus dem Ökosystem bei Odense in Dänemark zeigt, die vom kleinen Innovationsanbieter zum Weltmarktführer bei Cobots aufgestiegen sind.

Zur Unterstützung von Industrie 4.0 und damit der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands sollten Robotope zunächst für **Anwendungen in der Fertigung** etabliert werden. Aufgrund der hohen Synergien in der technologischen Architektur ließe sich KI-basierte Robotik im Anschluss daran gut auf weitere Anwendungen übertragen. **Intralogistik** ist eine weitere Kernbranche, für die anwenderorientierte Robotope zu priorisieren sind. Auch in den Branchen Landwirtschaft und Bau ergeben sich interessante Anwendungen. Zusätzlich sollten frühe Anwendungen zudem für die **Human-centered Robotics (Servicerobotik)** adressiert werden. Ein Wettbewerbsvorteil im internationalen Vergleich lässt sich schließlich erzielen, wenn Aufbau und Betrieb der Robotope von Maßnahmen zur **Entwicklung einer innovativen Regulatorik und Standardisierung** begleitet werden.

Das Ziel der Robotope ist neben der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit, der Gewährleistung resilienter Wertschöpfungsketten sowie der Stärkung der technologischen Souveränität auch die **Förderung der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen**. Nach Angaben der International Federation of Robotics hat Robotik das Potenzial, bei der Erreichung von 13 der 17 **United Nations Sustainable Development Goals** eine wichtige Rolle zu spielen.<sup>42</sup> Unter anderem können Roboter den Einsatz von chemischen Unkrautvernichtungsmitteln in der Landwirtschaft substituieren oder in der Materialrückgewinnung den Ressourcenverbrauch von Städten reduzieren. In Kapitel 1 wurde das Thema Robotik und Nachhaltigkeit vertiefend aufgegriffen.

## 4.2 Spitzenforschung, -lehre und Talentgewinnung

Aus der Technologiebetrachtung in Kapitel 3.2 leitet sich ein starker Forschungsbedarf im Feld der KI-basierten Robotik ab. Alleinstellungsmerkmale, die die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Akteure nachhaltig sichern könnten, erfordern Spitzenforschung, die gezielt und im Verbund an bereits vorhandenen Orten akademischer Exzellenz gestärkt werden sollte. Neben der Forschung sind die universitäre Lehre und auch die Berufsausbildung wichtig, um eine genügend große Anzahl hoch qualifizierter Robotik- und KI-Talente rekrutieren zu können. Die aktuell sehr hohen Abwanderungsquoten von Talenten müssen zudem signifikant reduziert werden.

Zur Sicherung der **technologischen Souveränität** und um signifikant an der Wertschöpfung von KI-basierter Robotik zu partizipieren, muss Deutschland auch in der Grundlagenforschung und Entwicklung führend sein.

„Deutschland muss Robotik-Entwickler werden.  
Wir dürfen nicht anderen die Entwicklung überlassen.“

Dazu braucht es **Spitzenforschung in der KI-basierten Robotik** und ein Hochschulbildungssystem, das internationale Spitzen-talente anzieht, halten kann und eine exzellente Lehre anbietet. Die Forschung sollte einen starken Fokus auf die **interdisziplinäre Verbindung von KI und Robotik** richten und so vorhandene Stärken Deutschlands wie den traditionellen Maschinenbau, die Hardwareentwicklung, aber auch den Datenschatz eines führenden Industriestandorts kombinieren.

In der Umsetzung sollten bereits bestehende **Zentren exzellenter Robotik-Forschung gestärkt** werden. Diese sollten aber nicht einzeln agieren, sondern sich in Verbänden organisieren, um Synergien zu schaffen, Redundanzen zu reduzieren und sich gemeinsam mit einem **langfristigen Forschungs- und Investitionsvorhaben** zu bewerben. Ziel ist es, die strategischen Kontrollpunkte der Technologie zu sichern und die deutsche

42 | Vgl. IFR 2022b.

Wirtschaft zu befähigen, die strategischen Kontrollpunkte des Wertschöpfungsnetzwerks zu besetzen. Die Vorhaben müssten eine gute **Balance zwischen ungerichteter Innovation** (reine Grundlagenforschung) **und gerichteter Innovation** (anwendungsorientierte Grundlagenforschung bis zur anwendungsbezogenen Entwicklung) aufweisen.

Im internationalen Vergleich steht die deutsche Robotik-Forschung gut da, bleibt in der Breite aber hinter ihrem Potenzial zurück, hauptsächlich wegen der häufig **wenig attraktiven Forschungsbedingungen und Karrierewege an den Universitäten**. Die befragten Expertinnen und Experten benennen in diesem Zusammenhang die sehr hohe Lehrbelastung deutscher Universitätsprofessorinnen und -professoren, marktferne Gehälter und Hürden für in den USA übliche längere Forschungsaufenthalte in Firmen als Schwächen der deutschen Forschungslandschaft. Dieser Umstand ist nicht nur eine verpasste Chance im internationalen Forschungswettbewerb, sondern er belastet auch die Lehre und damit die Ausbildung der nächsten Generation von Robotik- und KI-Talenten.

Ein weiterer zentraler Erfolgsfaktor ist das Vorhandensein einer hinreichend **großen Anzahl hoch qualifizierter Robotik- und KI-Talente**. Vergleichbare Kompetenzen werden auch in anderen KI-Domänen wie dem Automatisierten Fahren benötigt. Es besteht daher eine **massive Nachfrage** am Arbeitsmarkt bei gleichzeitig sehr begrenztem Angebot. Forschung, Start-ups, etablierte Hersteller, Systemintegratoren und Anwender sind davon gleichermaßen betroffen.

Es sind große Anstrengungen notwendig, um diese Bedarfslücke zu schließen. Neben der **verbesserten Ausbildung** (beruflich und

universitär) wird es künftig darauf ankommen, Deutschland zu einem **attraktiven Standort** für Expertinnen und Experten aus EU- und Nicht-EU-Ländern zu machen. Die hohe Abwanderungsquote bei bereits ausgebildeten Talenten, die zurück ins Ausland gehen – in der Max-Planck-Gesellschaft sind das laut Interviews etwa 90 Prozent –, muss reduziert werden. Der gezielte **Abbau bestehender bürokratischer Hürden** bei der Visavergabe, bei der Anerkennung von Abschlüssen, bei der Einbürgerung und bei der Unternehmensgründung durch Entrepreneur:innen aus dem Nicht-EU-Ausland ist hierfür eine notwendige Voraussetzung.

Neben der **Förderung weniger Exzellenzzentren für die Spitzenforschung** ist auch eine **Talentförderung in der Breite** erforderlich. Dieser Bedarf ist in Abbildung 10 durch rote Pfeile dargestellt, die zeigen, dass Robotik- sowie KI-Spezialist:innen und Spezialisten verschiedener Ausprägung entlang des ganzen Innovationsprozesses benötigt werden: von Spitzenforschenden mit Promotion oder Habilitation über Absolvent:innen und Absolventen auf Master-niveau sowie Anwendungsentwickler:innen und -entwickler bis hin zu Applikateuren im Feld. Ziel muss es sein, mehr Talente im ganzen Spektrum der Robotik-Wertschöpfungskette auszubilden und dies mit Maßnahmen zur Talentgewinnung aus dem Ausland zu flankieren.

Die **praxisnahen Berufe** sind aus Leitanwendersicht sehr wichtig. Hier besteht Nachholbedarf in den Ausbildungsberufen, an den Technikerschulen und Berufsakademien. Die dortigen Ausbildungsgänge tragen der Interdisziplinarität der Robotik bislang noch nicht genügend Rechnung. Dezidierte Lehrpläne, die Mechanik, Programmierung, Prozesswissen und die Grundlagen von Robotik, KI, und Computer Vision enthalten, müssen in der Breite aufgebaut werden, sowohl berufsbegleitend als auch in Vollzeit.



## 5 Handlungsoptionen

Nachfolgend werden konkrete Maßnahmen aus dem vorangehend erläuterten Strategiekonzept und den Impulsen der befragten Interviewpartnerinnen und partner abgeleitet.

### 5.1 Fokus auf Leitanwender

**Aufbau von anwenderorientierten Robotopen** mit dem Ziel, Cluster zu schaffen, die die Industrialisierung und Skalierung vom Machbarkeitsnachweis bis zur erfolgreichen Markteinführung betreiben und die Regulatorik mitgestalten. Robotope sind thematisch auf eine Branche (zum Beispiel Produktion, Intralogistik, Landwirtschaft, Bau, Gesundheit) fokussierte Anwendungskonsortien, in denen Unternehmen (KMU, Konzerne), die bereit sind, Robotik-Innovationen zu industrialisieren, gemeinsam mit Innovationsanbietern (Start-ups, Akteure der Forschung) arbeiten. Dabei wird das unternehmerische Risiko durch Projektförderung und Sonderabschreibungen reduziert.

Durch die Vernetzung mehrerer Robotope können Synergien genutzt und ein starkes Robotik-Ökosystem in Deutschland gefördert werden. Dieses Ökosystem ist eine wesentliche Voraussetzung für einen Leitanwendermarkt, ein möglicher Kristallisationspunkt für einen international wettbewerbsfähigen Robotik-OEM und hat darüber hinaus positive Effekte auf Spitzenforschung, Talentgewinnung, Regulatorik und Standardisierung.

Voraussetzung für die **Entwicklung marktreifer Anwendungen** in Robotopen ist neben der Identifikation von **Anwendern mit konkretem Automatisierungsbedarf** die nachfolgende offene Ausschreibung dieser Bedarfe zur Umsetzung in projektbasierten Konsortien. Folgende Schritte sind hierfür notwendig:

- Abfrage des Handlungsbedarfs der Industrie und anderer potenzieller Kernanwender (Bau, Landwirtschaft, Service);
- Festlegung der benötigten Förderinstrumente sowie des relevanten Förderumfangs;
- parallele Ausarbeitung konkreter Umsetzungsroadmaps;
- Ausschreibung für projektbasierte Konsortien.

Zunächst muss der **Handlungsbedarf auf Anwenderseite** abgefragt werden. Hierbei empfiehlt es sich, gemeinsam mit Verbänden und ihren jeweiligen Mitgliedsunternehmen Projektideen für mögliche Robotope zu ermitteln und den Formierungsprozess entsprechender **Konsortien** zu unterstützen.

Sobald der Bedarf geklärt ist, sollte die Anwenderseite als Haupttreiber der Robotope die für sie **zur Umsetzung benötigten Förderinstrumente sowie den Förderumfang** für die jeweiligen Projekte identifizieren.

Auf die Festlegung der potenziellen Anwender könnten Ausschreibungen für entsprechende projektbasierte Konsortien aus Großunternehmen, KMU, Start-ups, Forschungsinstituten und Universitäten folgen. Um den **Wettbewerb** zu steigern, würden sich nach Ausschreibung des Robotops verschiedene Konsortien auf die Projekte inklusive der entsprechenden Projektförderung bewerben müssen.

Die hier vorgestellten Überlegungen zur Stärkung des Robotik-Ökosystems sollten zeitnah durch eine Expertinnen- und Expertengruppe mit Zugang zu den unterschiedlichen Anwender-Robotopen sowie mit Beteiligung der Bundesregierung ausgearbeitet werden. Neben den Auswahlkriterien für die Anwender und deren Konsortien müssen auch Kriterien für die Nachverfolgung bis zur erfolgreichen Umsetzung am Markt definiert werden.

### 5.2 Talentgewinnung

Zur Deckung der sehr hohen und zunehmend **wachsenden Nachfrage nach qualifizierten Robotik- und KI-Talenten**, angefangen bei Spitzenforschenden über Entwicklerinnen und Entwickler auf Masterniveau bis hin zu Applikateuren im Feld, werden im Verantwortungsbereich der für Forschung und Bildung zuständigen Ministerien folgende Maßnahmen empfohlen:

- **Aufbau und Stärkung von Robotik-Masterprogrammen** an ausgewählten Universitäten  
Auszuwählende Universitäten sollten strukturell für international wettbewerbsfähige Lehre im Bereich Robotik befähigt werden. Bestehende und neue Masterprogramme sollten gestärkt oder gegründet werden – unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der KI-basierten Robotik (zum Beispiel infrastrukturintensive Lehrformate). Die Lehrinhalte sollten neben den neuesten Erkenntnissen der Forschung auch Praxisbezug und Wissenstransfer abdecken und sich zudem an den Bedürfnissen der Wirtschaft orientieren. Ziel ist es, die Qualität der Robotik-Lehre auf ein exzellentes Niveau zu heben, sodass auch Absolventinnen und Absolventen ohne Promotion auf Masterniveau in der Wirtschaft rasch produktiv und differenzierend tätig werden können. Die Programme sollten international beworben werden, um mehr ausländische Studierende auf Bachelorniveau nach Deutschland zu bringen.

- **Qualitätspakt der Robotik-Lehre**  
Exzellente Robotik-Lehre, die neben Theorie auch Praxisbezug aufweist, ist infrastrukturintensiv. Anschaffung, Wartung und Bereitstellung von komplexen Robotik-Systemen für eine breite Studierendenschaft übersteigt die Möglichkeiten der allermeisten Fakultäten. Zudem sollten sich Lehrinhalte sich auch an den Bedürfnissen der Wirtschaft orientieren. Der 2020 ausgelaufene Qualitätspakt der Lehre, der hier als themenoffenes Vorbild dienen kann, hat gezeigt, dass Qualität und Breitenförderung sich nicht ausschließen. Die Maßnahme sollte auf KI-basierte Robotik fokussiert sein und sich an Universitäten und Fachhochschulen richten.
- **Stärkung der praxisnahen Robotik-Berufe**  
Aus Leitanwendersicht sind die praxisnahen Berufe besonders wichtig. Es sollten Robotikspezifische Fachrichtungen bereits als Ausbildungsberuf angeboten und an Technikerschulen, Fachschulen und Berufsakademien auf- und ausgebaut werden. Der Fokus sollte auf der Interdisziplinarität der Robotik liegen, das heißt, neben klassischen Themen wie Mechatronik, sollten Roboterprogrammierung, Prozesswissen und die Grundlagen von Robotik, KI und Computer Vision vermittelt werden – in der Ausbildung, berufsbegleitend sowie in Vollzeit. Gefördert werden sollten sich bewerbende Schulen wie auch Individuen (beispielsweise *über* Meister-BAföG). Der Ausbildungsinhalt sollte gemeinsam mit der Industrie- und Handelskammer festgelegt werden, um einen standardisierten Berufsabschluss Robotik zu erhalten.

### 5.3 Spitzenforschung

- **Innovationsstrategische Stärkung von Verbänden exzellenter Robotik-Forschung**  
Durch die fächerübergreifende Kombination von Robotik und KI, in der deutsche Stärken in Roboterhardware, Mechatronik und KI zum Tragen kommen, ergibt sich zum jetzigen Zeitpunkt noch die Chance, eine weltweit herausragende Alleinstellung unter dem Label „Made in Germany“ zu erreichen und so entscheidend zur nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Marktakteure beizutragen.  
Dieses Ziel benötigt jedoch eine innovationsstrategische Förderung der Spitzenforschung, die bestehende Instrumente des Bundes und der Länder wie die *Exzellenzstrategie* nicht leisten können und die das verwandte Konzept der *DFG-Sonderforschungsbereiche* erweitert: Verbände bewerben sich mit einem langfristigen Forschungsvorhaben, das primär auf eine internationale Spitzenstellung in der Grundlagenforschung abzielt. Das Vorhaben ist im Verbund geplant,

schaft Synergien und vermindert Redundanzen. Es sollte aber auch innovationsstrategische Elemente enthalten, die plausibel aufzeigen, wie die Forschungsvorhaben auf die Bedürfnisse der deutschen Akteure im Wertschöpfungsnetzwerk und die Sicherung der strategischen Kontrollpunkte einzahlen und prototypisch in entsprechende Anwendung gebracht werden könnten.

Analog zum 2022 gegründeten KI-Kompetenzzentrum sollte aus einem der geförderten Verbünde schließlich ein deutsches Robotik-Kompetenzzentrum entstehen. Flankiert werden sollte diese Maßnahme durch die Gründung einer Graduate School für Robotik, die sich an das Konzept der Max Planck Schools anlehnt. Max Planck Schools sind eine gemeinsame Initiative von Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, und sie ermöglichen Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern, sich in einem starken Wissenschaftsnetzwerk weiterzuentwickeln. Die neue Graduate School für Robotik sollte in Gemeinschaft mit einem oder mehreren geförderten Verbänden gegründet und international beworben werden, um mehr ausländische Talente auf Masterniveau für Deutschland zu gewinnen.

- **Verbesserung der universitären Lehr- und Forschungsbedingungen**  
Im internationalen Vergleich ist das Lehrdeputat deutscher Universitätsprofessorinnen und -professoren ungewöhnlich hoch. Dies macht es deutschen Universitäten oft schwer, im kompetitiven Umfeld der weltweiten Robotik- und KI-Forschung ausländische Spitzentalente zu gewinnen. Steigende Studierendenzahlen in Robotik und KI – die gleichwohl angestrebt werden – vermehren den Organisations- und Betreuungsbedarf zusätzlich. Daher sollte ein Bund-Länder-Beschluss zur Entlastung beim Lehrdeputat auf den Weg gebracht werden.

### 5.4 Regulatorischer Rahmen and Standardisierung

- **Aufbau eines verteilten interdisziplinären Prüf- und Testzentrums für KI-basierte Roboter**  
Eine innovative Regulatorik zur Robotersicherheit, die nationale und internationale Normen, Teststandards und Zertifizierungskompetenz entwickelt, ist ein strategischer Kontrollpunkt und schafft handfeste Wettbewerbsvorteile für die deutschen Marktakteure.  
Analog zur Euro NCAP, die Crashtests nach standardisierten und wissenschaftlich validierten Testverfahren für die



Automobilindustrie definiert, durchführt und bewertet, geht es um die Entwicklung von Prüf- und Testverfahren, auf deren Basis Roboterhersteller oder Systemintegratoren die Sicherheit ihrer Systeme nachweisen und die Zertifizierungsorgane entsprechend befähigen können. Dies schafft die zukünftigen Grundlagen für die Gewährleistung von Arbeitsschutz sowie Rechtssicherheit und Klarheit in Haftungsfragen für das Inverkehrbringen von KI-basierten Robotern.

Durch den KI-Anteil entstehen zusätzliche Herausforderungen wie die Gewährleistung sicheren Maschinellen Lernens, von Datensicherheit und Regeln für den Datenzugang sowie die einer sicheren Interaktion. Die Regulatorik muss branchenübergreifend sowie für stationäre als auch mobile Roboter entwickelt werden.

Daher sollte eine effektive Standardisierungs- und Zertifizierungshoheit strategisch entwickelt und international aufgestellt werden. Dazu wird die Gründung eines über mehrere Standorte verteilten interdisziplinären Forschungs-

Prüf- und Testzentrums für KI-basierte Roboter empfohlen. Das Zentrum integriert Forschungseinrichtungen, relevante und insbesondere technologieführende Industrieunternehmen sowie Zertifizierungsorgane. Die einzelnen Standorte können sich spezialisieren (auf technologische Aspekte, Branchen etc.), müssen sich aber mit einem gemeinsamen, koordinierten, langfristigen und innovationsstrategischen Vorhaben bewerben.

Das entsprechende Vorhaben sollte aufzeigen, wie es die deutschen Wirtschaftsakteure im Robotiksektor konkret befähigt, die Kontrollpunkte des Wertschöpfungsnetzwerks zu besetzen und nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit zu erlangen. Das Zentrum unterscheidet sich dem Konzept nach von Reallaboren grundsätzlich, weil hier nicht die temporäre Erweiterung des gesetzlichen Rahmens im Vordergrund stehen soll, sondern die dauerhafte Schaffung einer Standardisierungs- und Zertifizierungskompetenz.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technologische Hürden der Industrierobotik	16
Abbildung 2: Bakterienbasierter Mikroroboter, die magnetisch durch faserige Umgebungen geführt werden	20
Abbildung 3: Anzahl der Publikationen und Citation Impact ausgewählter Länder zum Thema Small-scale Robotics	21
Abbildung 4: Prognose zur Marktentwicklung von Service- und Industrierobotik	25
Abbildung 5: Weltweite Marktanteile der Industrierobotik	26
Abbildung 6: Abnehmerbranchen der Industrierobotik weltweit und in Deutschland	27
Abbildung 7: Grobgliederung KI-basierter Robotiksysteme	28
Abbildung 8: Feingliederung KI-basierter Robotiksysteme	30
Abbildung 9: Modernes Wertschöpfungsökosystem der Robotik	31
Abbildung 10: Innovations- und Transferprozess	33



# Literatur

## **Akolpoglu et al. 2022**

Akolpoglu, M.B./ Alapan, Y./ Dogan, N. O./ Baltaci, S. F./ Yasa, O./ Aybar Tural, G./ Sitti, M.: „Magnetically Steerable Bacterial Microrobots Moving in 3D Biological Matrices for Stimuli-responsive Cargo Delivery.“ In: *Science Advances*, 8: 28, 2022.

## **BCG 2021**

Boston Consulting Group (BCG): *Robotics Outlook 2030. How Intelligence and Mobility Will Shape the Future*, 2021. URL: <https://www.bcg.com/publications/2021/how-intelligence-and-mobility-will-shape-the-future-of-the-robotics-industry> [Stand: 09.06.2023].

## **BCG 2022**

Boston Consulting Group (BCG): *The Automation Revolution in Manufacturing*, 2022. URL: <https://www.bcg.com/publications/2022/closing-automation-revolution-gap-in-manufacturing> [Stand: 09.06.2023].

## **BMBF 2023**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): *Zukunftsstrategie Forschung und Innovation*, Berlin 2023.

## **BMWi 2019**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *2030 Vision for Industry 4.0. Shaping Digital Ecosystems Globally*, Berlin 2019.

## **BMWK 2023**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): *Förderkonzept zur Unterstützung der Industrieinitiative „Manufacturing-X“*, Berlin 2023.

## **Bornmann/ Ettl 2022**

Bornmann, L./ Ettl, Chr.: *unveröffentlichte Analyse*, Max-Planck-Gesellschaft München 2022.

## **DGB 2021**

Deutscher Gewerkschaftsbund (DGB): *DGB-Position zum Entwurf der EU-Kommission für eine europäische KI-Verordnung*, Berlin 2021.

## **DIN/DKE 2022**

Deutsches Institut für Normung (DIN)/Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE): *Deutsche Normungsroadmap Künstliche Intelligenz*, Berlin 2022.

## **EFI 2022**

Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI): *Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2022*, Berlin 2022.

## **Europäische Kommission 2021**

Europäische Kommission: „Neue Vorschriften für künstliche Intelligenz. Fragen und Antworten“ (Pressemitteilung vom 21.04.2021). URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda\\_21\\_1683](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda_21_1683) [Stand: 09.06.2023].

## **Europäische Kommission 2022**

Europäische Kommission: „European Data Governance Act“ (Pressemitteilung vom 13.07.2022). URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-governance-act> [Stand: 09.06.2023].

## **Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum 2017**

Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum: *Autonome Systeme. Chancen und Risiken für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft* (Abschlussbericht), Berlin 2017.

## **IFR 2017**

International Federation of Robotics (IFR): *The Impact of Robots on Productivity, Employment and Jobs* (Positioning Paper), Frankfurt am Main 2017.

## **IFR 2018**

International Federation of Robotics (IFR): *Robots and the Workplace of the Future* (Positioning Paper), Frankfurt am Main 2018.

## **IFR 2020a**

International Federation of Robotics (IFR): *Demystifying Collaborative Industrial Robots* (Positioning Paper), Frankfurt am Main 2020.

## **IFR 2020b**

International Federation of Robotics (IFR): *Next Generation Skills. Enabling Today's and Tomorrow's Workforce to Benefit from Automation* (Positioning Paper), Frankfurt am Main 2020.

## **IFR 2022a**

International Federation of Robotics (IFR): *Artificial Intelligence in Robotics* (Positioning Paper), Frankfurt am Main 2022.

**IFR 2022b**

International Federation of Robotics (IFR): „Robots Help Reaching UN Goals of Sustainable Development“ (Pressemitteilung vom 05.05.2022). URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robots-help-reaching-un-sdgs> [Stand: 24.11.2022].

**IFR 2022c**

International Federation of Robotics (IFR): *Robot Supplier Committee*, 2022.

**IFR 2022d**

International Federation of Robotics: *World Robotics Report 2022*, 2022.

**Interact Analysis 2021**

Interact Analysis: *Components Used in Industrial Robots 2021. An Analysis of the Components Used in Industrial & Collaborative Robots*, 2021.

**KfW Research 2020**

KfW Research: *KfW Venture Capital Study 2020. VC Market Germany. Ready for the Next Development Stage*, Frankfurt am Main 2020.

**Meyer Industry Research 2020**

Meyer Industry Research: *Top 50 Roboterhersteller in Deutschland 2020*, München 2020.

**Mohaupt 2013**

Mohaupt, D.: *Eingriff in die Freiheit der Wissenschaft*, 2013. URL: <https://www.deutschlandfunk.de/ingriff-in-die-freiheit-der-wissenschaft-100.html> [Stand: 02.11.2022].

**Plattform Industrie 4.0 2022a**

Plattform Industrie 4.0: *Manufacturing-X. Initiative zur Digitalisierung der Lieferketten in der Industrie*, Berlin 2022.

**Plattform Industrie 4.0 2022b**

Plattform Industrie 4.0: *Whitepaper Manufacturing-X. Eckpunkte für die Umsetzung von Manufacturing-X im produzierenden Gewerbe zur Sicherung des Wettbewerbsstandortes Deutschland*, Berlin 2022.

**Raabe 2019**

Raabe, T.: *Bedingt einsatzbereit? Internationale Rüstungsk Kooperationen in der Bundesrepublik Deutschland (1979–1988)*, Frankfurt am Main: Campus 2019.

**Schuh et al. 2020**

Schuh, G./Anderl, R./Dumitrescu, R./Krüger, A./ten Hompel, M. (Hrsg.): *Der Industrie 4.0 Maturity Index in der betrieblichen Anwendung. Aktuelle Herausforderungen, Fallbeispiele und Entwicklungstrends* (acatech KOOPERATION), München 2020.

**Statista 2021**

Statista: *Robotics. A Statista Dossierplus on the Global Robotics Market and Application Areas*, 2021. URL: <https://www.statista.com/study/64326/robotics/> [Stand: 29.08.2022].

**VDMA 2022**

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA): *Manufacturing-X. Denksätze zum Aufbau und zur Etablierung eines deutschen und europäischen Datenökosystems für das produzierende Gewerbe mit der Ausrüsterindustrie als Nukleus und Multiplikator* (VDMA-Whitepaper), Frankfurt am Main 2022.

**Voß 2022**

Voß, O.: „Data Act. ‚Wir brauchen ein Minimum an Konflikten und ein Maximum an Klarheit‘ (Interview)“. In: *Tagesspiegel Background Digitalisierung & KI*, 24.10.2022.

**WEF 2020**

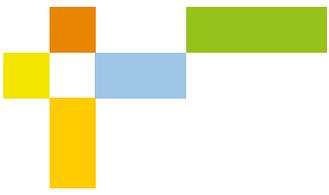
World Economic Forum (WEF): *The Future of Jobs Report 2020*, Genf 2020.

**Wörner/ Schmidt 2022**

Wörner, J.-D. /Schmidt, Chr. M. (Hrsg.): *Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit* (acatech IMPULS), München 2022.

**Wörner/Rauch 2022**

Wörner, J./Rauch, G.: *Sollten deutsche Hochschulen zu militärischen Zwecken forschen dürfen? Zwei Experten analysieren Sinn und Zweck von Zivilklauseln an Hochschulen. Im Für und Wider steht Meinung gegen Meinung*, 2022. URL: <https://www.forschung-und-lehre.de/forschung/sollten-deutsche-hochschulen-auch-zu-militaerischen-zwecken-forschen-duerfen-5093> [Stand: 02.11.2022].





## Über acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter [www.acatech.de](http://www.acatech.de)



#### Autorinnen und Autoren:

**Prof. Dr. Stefan Asenkerschbaumer**  
Robert Bosch GmbH  
Postfach 10 60 50  
70049 Stuttgart

**Dr. Kai Oliver Arras**  
Robert Bosch GmbH  
Postfach 10 60 50  
70049 Stuttgart

**Florian Süssenguth**  
acatech – Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften  
Karolinenplatz 4  
80333 München

**Prof. Dr. Henning Kagermann**  
acatech – Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften  
Karolinenplatz 4  
80333 München

**Dr. René Hartke**  
Robert Bosch GmbH  
Postfach 10 60 50  
70049 Stuttgart

**Dr. Tina Klüwer**  
K.I.E.Z. – Künstliche Intelligenz  
Entrepreneurship Zentrum  
by Science & Startups  
c/o AI Campus Berlin  
Max-Urich-Str. 3  
13355 Berlin

**Anja Kunack, K.I.E.Z.**  
K.I.E.Z. – Künstliche Intelligenz  
Entrepreneurship Zentrum  
by Science & Startups  
c/o AI Campus Berlin  
Max-Urich-Str. 3  
13355 Berlin

#### Reihenherausgeber:

##### acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2023

Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München  
T +49(0)89/52 03 09-0  
F +49(0)89/52 03 09-900

Hauptstadtbüro  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin  
T +49(0)30/2 06 30 96-0  
F +49(0)30/2 06 30 96-11

Brüssel-Büro  
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13  
1000 Brüssel | Belgien  
T +32(0)2/2 13 81-80  
F +32(0)2/2 13 81-89

info@acatech.de  
www.acatech.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums: Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather, Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

#### Empfohlene Zitierweise:

Asenkerschbaumer, S./Kagermann, H./Klüwer, T./Arras, K. O./Hartke, R./Kunack, A./Süssenguth, F.: *Innovationspotenziale KI-basierter Robotik* (acatech IMPULS), München 2023.

DOI: [https://doi.org/10.48669/aca\\_2023-15](https://doi.org/10.48669/aca_2023-15)

ISSN 2702-7627

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

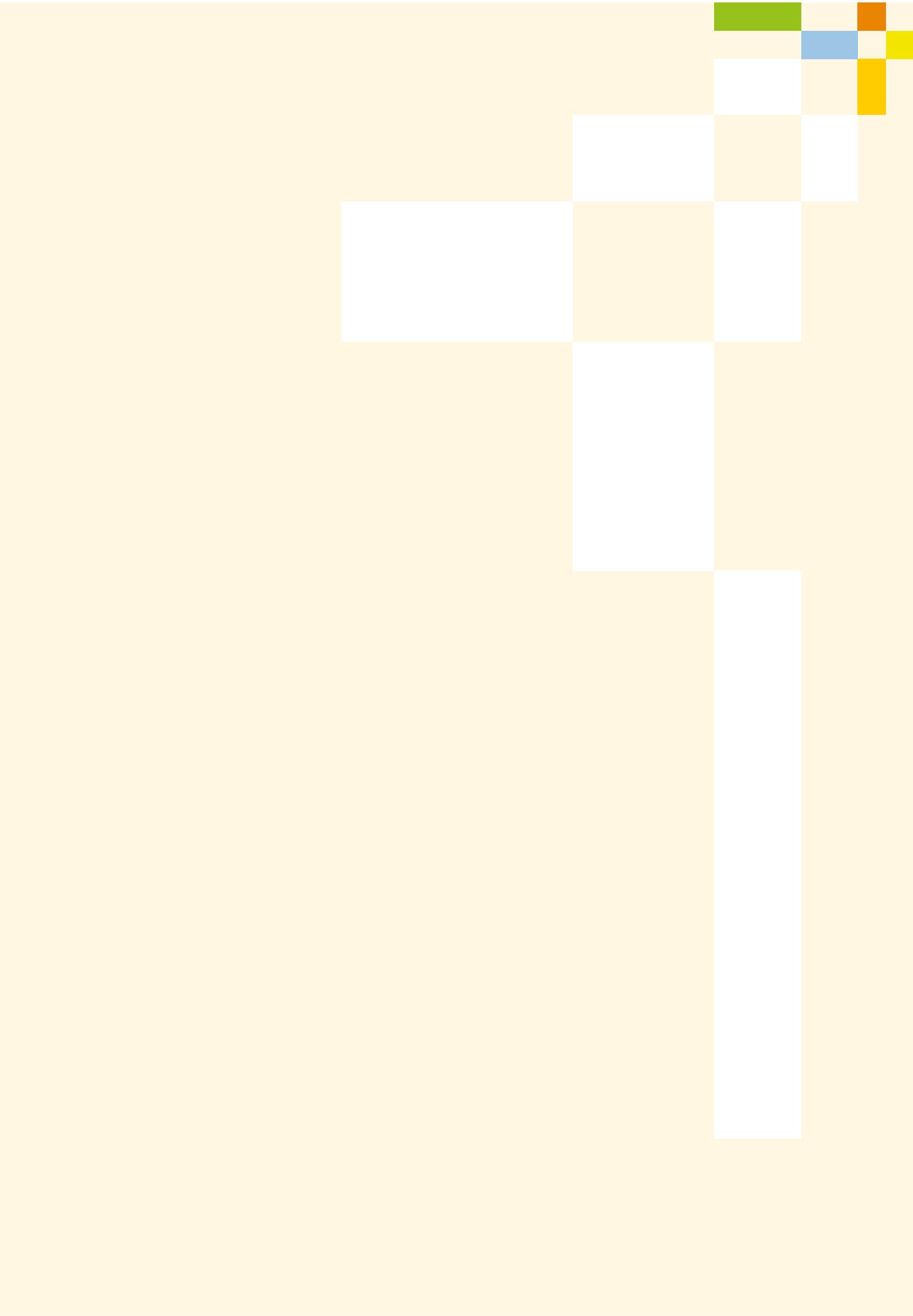
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

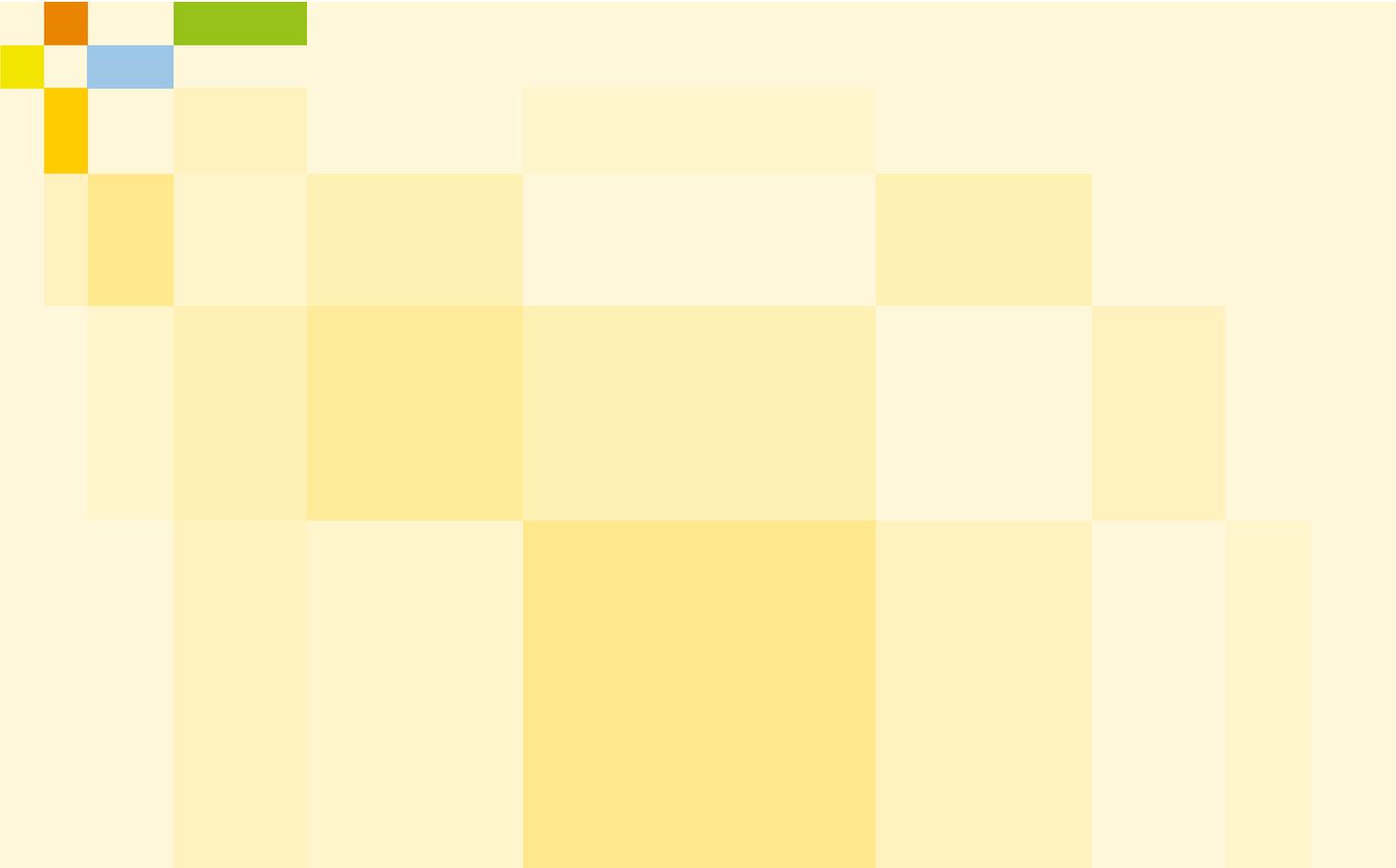
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2023

Koordination: Elisa Reker-Gluhic  
Lektorat: Textkuss – Werkstatt für Sprache und Struktur  
Layout-Konzeption: Groothuis, Hamburg  
Titelfoto: shutterstock/Gorodenkoff  
Konvertierung und Satz: aweberdesign.de, Berlin

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf [www.acatech.de](http://www.acatech.de)





KI-basierte Robotik ist eine Schlüsseltechnologie für die transformative Modernisierung des produzierenden Gewerbes in Richtung Industrie 4.0 und die Bewältigung großer gesellschaftlicher Herausforderungen wie der des demografischen Wandels. Technologische Durchbrüche erweitern die Einsatzmöglichkeiten von Robotern auch abseits abgeschirmter industrieller Fertigungszellen: Durch eine bessere Umfelderkennung, hoch performatives Edge Computing und KI-Software vollziehen Roboter nicht mehr nur vorgegebene Aufgaben in strukturierten Umgebungen. Es entstehen intelligente Systeme, die sich in unstrukturierten, sich verändernden Umwelten orientieren und sowohl eigenständig als auch in Kooperation mit Menschen komplexe Aufgaben erledigen können. Intuitive Benutzerschnittstellen versetzen durch eine einfache Bedienbarkeit sogar Laien in die Lage, Roboter zu programmieren, und machen ihren Einsatz selbst für kleine und mittelständische Unternehmen zunehmend attraktiv. So kann KI-basierte Robotik auch jenseits der Industrie helfen, das Leben zu verbessern, etwa im Bereich der Pflege, der Landwirtschaft, im Bauwesen oder in der Logistik.

Dieser IMPULS zeigt Perspektiven auf, wie Robotik sowohl zur Sicherung der Wertschöpfung im sich verschärfenden globalen Wettbewerb als auch zum Erhalt technologischer Souveränität beitragen kann und beschreibt Wege, um Deutschland auf Basis des vorhandenen industriellen Knowhows in der Produktionstechnologie und der im internationalen Vergleich renommierten Forschung zu einem führenden Standort für KI-basierte Robotik zu etablieren.