

Deep Tech für den Industriestandort Deutschland

Wie Zukunftstechnologien Wachstum und Resilienz stärken können

September 2025

Im Auftrag von



BDI

Die Boston Consulting Group (BCG) unterstützt führende Akteure aus Wirtschaft und Gesellschaft in partner-schaftlicher Zusammenarbeit dabei, Herausforderungen zu meistern und Chancen zu nutzen. Seit der Gründung 1963 leistet BCG Pionierarbeit im Bereich Unterneh-mensstrategie. Die Boston Consulting Group hilft Kun-den, umfassende Transformationen zu gestalten: Die Beratung ermöglicht komplexe Veränderungen, eröffnet Wachstumschancen, schafft Wettbewerbsvorteile, verbessert die Kunden- und Mitarbeiterzufriedenheit und bewirkt so dauerhafte Verbesserungen des Geschäftsergebnisses.

Der Bundesverband der deutschen Industrie (BDI) ist die Spitzenorganisation der deutschen Industrie und der industrienahen Dienstleister. 39 Branchenverbände, 15 Landesvertretungen und mehr als 100.000 Unter-nehmen mit rund acht Millionen Beschäftigten machen den Verband zur Stimme der deutschen Industrie. Der BDI setzt sich für eine moderne, nachhaltige und erfolg-reiche Industrie in Deutschland, Europa und der Welt ein.

Hinweise

Gender:

Wenn in dieser Studie aus Gründen der besseren Lesbarkeit die männliche Form (generisches Maskulinum) verwendet wird, sind damit stets wertfrei alle Geschlechter (w/m/d) gemeint.

Umrechnungskurs:

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden Beträge in USD generell auf Basis eines gerundeten Durchschnittskurses der Jahre 2020–2024 in EUR umgerechnet (1 EUR = 1,10 USD; entsprechend 1 USD \approx 0,91 EUR). Gleiches gilt für die Umrechnung von GBP in EUR (1 EUR = 0,85 GBP; entsprechend 1 GBP \approx 1,15 EUR).

Deep Tech für den Industriestandort Deutschland

Wie Zukunftstechnologien Wachstum und Resilienz stärken können

September 2025

Inhaltsverzeichnis

1 Executive Summary und Kernbotschaften	2
1.1 Kontext und Motivation: Deep Tech als wirtschaftlicher Schlüssel- und Standortfaktor	11
1.2 Ziel der Studie: Eine strategische Deep-Tech-Agenda für Deutschland, um im europäischen Kontext international an die Spitze zu gelangen	12
1.3 Dringlichkeit und strategischer Handlungsbedarf: Warum Deep Tech? Warum jetzt?	13
2 Der globale Wettlauf um Deep Tech: Wo steht Deutschland heute?	16
2.1 Analyseansatz: Eine ganzheitliche Betrachtung des Deep-Tech-Ökosystems entlang von sechs Dimensionen	16
2.2 Wo Deutschland steht: Deep Tech im internationalen Spannungsfeld	18
2.3 Technologische Fokusfelder	22
3 Künstliche Intelligenz: Wertschöpfung durch konsequente Anwendung in Politik und Wirtschaft erzeugen	24
3.1 Executive Summary und Kernbotschaften für Künstliche Intelligenz (KI)	24
3.2 Definition, Reifegrad und strategische Relevanz	27
3.3 Anwendungsfelder und Marktpotenzial	31
3.4 Globale Wettbewerbslandschaft und Position Deutschlands	35
3.5 Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken	39
4 (KI-basierte) Robotik: Führungsrolle durch Ausbau von Kompetenzen und Infrastruktur sichern	46
4.1 Executive Summary und Kernbotschaften für (KI-basierte) Robotik	46
4.2 Definition, Reifegrad und strategische Relevanz	49
4.3 Anwendungsfelder und Marktpotenzial	53
4.4 Globale Wettbewerbslandschaft und Deutschlands Position	56
4.5 Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken	61
5 Quantentechnologien: Erfolg durch Kontrolle von Schlüsseltechnologien im Quanten-Tech-Stack erzielen	66
5.1 Executive Summary und Kernbotschaften für Quantentechnologien	66
5.2 Definition, Reifegrad und strategische Relevanz	68
5.3 Anwendungsfelder und Marktpotenzial	72
5.4 Globale Wettbewerbslandschaft und Deutschlands Position	77
5.5 Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken	83

6 mRNA-Medikamente, Gen- und Zelltherapien (GCT): Wettbewerbsfähigkeit durch Translation und Skalierung sichern	92
6.1 Executive Summary und Kernbotschaften für mRNA-Medikamente, Gen- und Zelltherapien	92
6.2 Strategische Relevanz	95
6.3 mRNA- Medikamente	95
6.3.1 Definition und Reifegrad: mRNA-Medikamente	95
6.3.2 Anwendungsfelder und Marktpotenzial von mRNA-Medikamenten	96
6.3.3 Globale Wettbewerbslandschaft und Position Deutschlands hinsichtlich mRNA-Medikamenten	99
6.4 Gen- und zellbasierte Therapien	102
6.4.1 Definition und Reifegrad: Gen- und zellbasierte Therapien	102
6.4.2 Anwendungsfelder und Marktpotenzial von Gen- und Zelltherapien	103
6.4.3 Globale Wettbewerbslandschaft und Position Deutschlands hinsichtlich Gen- und Zelltherapien	105
6.5 Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken	108
7 Übergreifende Handlungsempfehlungen	116
Quellen	124
Über die Autoren	144
Danksagung	145

1. Executive Summary und Kernbotschaften

Warum Deutschland Industriestandort bleiben muss – und Deep Tech der Schlüssel ist

Automobilindustrie, Maschinenbau, Chemie, Pharma und Elektrotechnik: Deutschlands wirtschaftliche Stärke fußt seit Jahrzehnten auf Führerschaft in Spitzentechnologien – auf der Verbindung von Forschungsexzellenz, Ingenieurskunst und einer Industriestärke, die „Made in Germany“ zum weltweit gefragten Gütesiegel gemacht hat.

2024 entfielen noch immer 17 % der Exporte auf Fahrzeuge und Teile, 14 % auf Maschinen und 9 % auf chemische Produkte – zusammen fast 40 % aller Ausfuhren¹. Insgesamt trug der produzierende Sektor 19,7 % zur Bruttowertschöpfung bei – deutlich mehr als im Vereinigten Königreich (8,0%), in Frankreich (10,6 %) oder den USA (17,5 %)^{2,3}.

Diese industrielle Basis sicherte Deutschlands Stellung als Exportnation über Jahrzehnte und schuf einen einzigartigen Wohlstand. Produzieren statt nur Konsumieren, Entwickeln statt nur Anwenden – auf dieser Maxime beruhte der Erfolg des deutschen Modells.

Doch die Spielregeln ändern sich rasant. Neue technologische Fortschritte, etwa in der Künstlichen Intelligenz (KI), führen bereits heute zu tiefgreifenden Transformationen in zahlreichen Branchen und

bestimmen künftiges Wachstum und Wettbewerbsfähigkeit. In einer Welt, in der Disruption zur Regel wird, reicht die Fortschreibung des alten Erfolgsmodells nicht mehr, denn die Schlüsseltechnologien von gestern sind nicht die von morgen.

Diese Ausgangslage stellt Deutschland vor Herausforderungen – und eröffnet zugleich große Chancen: Das Land kann sich als Industrienation neu erfinden. Voraussetzung dafür ist die Erschließung neuer Märkte durch Entwicklung und Anwendung neuer Technologien – von KI über (KI-basierte) Robotik und Biotechnologie bis hin zu Quantentechnologien. Es geht dabei nicht nur ums mithalten, sondern darum, eine führende Rolle einzunehmen. Denn im Bereich Deep Tech entscheidet sich, wer die globalen Champions von morgen stellt.

Technologieführerschaft ist dabei kein Selbstzweck – sie bildet die Grundlage für Wettbewerbsfähigkeit, Wohlstand und technologische Souveränität.

Damit Deutschland auch bei künftigen Spitzentechnologien zu den Weltmarktführern gehört, braucht es jetzt eine konkrete Roadmap. Mit der Hightech Agenda Deutschland wurden bereits erste wichtige Schritte eingeleitet – nun gilt es, darauf aufzubauen: In welchen Schlüsseltechnologien wollen wir künftig stark sein? Wie übersetzen wir Forschungsexzellenz in Wertschöpfung? Bis wann wollen wir unsere Ziele erreichen?

¹ Destatis (2025c).

² Deutschland.de (2025).

³ Worldbank (2025).

Im Bereich Deep Tech sind diese Fragen besonders komplex: Die Innovationen verlangen weit mehr als Forschungsexzellenz – sie erfordern langfristige Finanzierung, hohen Kapitaleinsatz sowie das Zusammenspiel von Industrieunternehmen, Start-ups, Wissenschaft und Politik. Nicht die Genialität eines Einzelnen entscheidet heute über den Erfolg, sondern leistungsfähige Ökosysteme, starke Plattformen und strategische Allianzen.

Deutschland bringt dafür starke Voraussetzungen mit: eine international einzigartige industrielle Basis, ein dichtes Netz von Forschungs- und Bildungseinrichtungen sowie eine weltweit anerkannte Ingenieurskultur. Jetzt gilt es, diese Stärken neu zu kombinieren und gezielt auf Technologien zu lenken, die die Märkte von morgen prägen.

Die Zeit drängt. Die USA und China investieren bereits massiv in Deep Tech und setzen globale Standards. Bei einzelnen Schlüsseltechnologien – etwa großen Sprachmodellen (LLMs) in der generativen KI – haben Deutschland und Europa schon heute einen deutlichen Rückstand, der nur schwer aufzuholen sein wird.

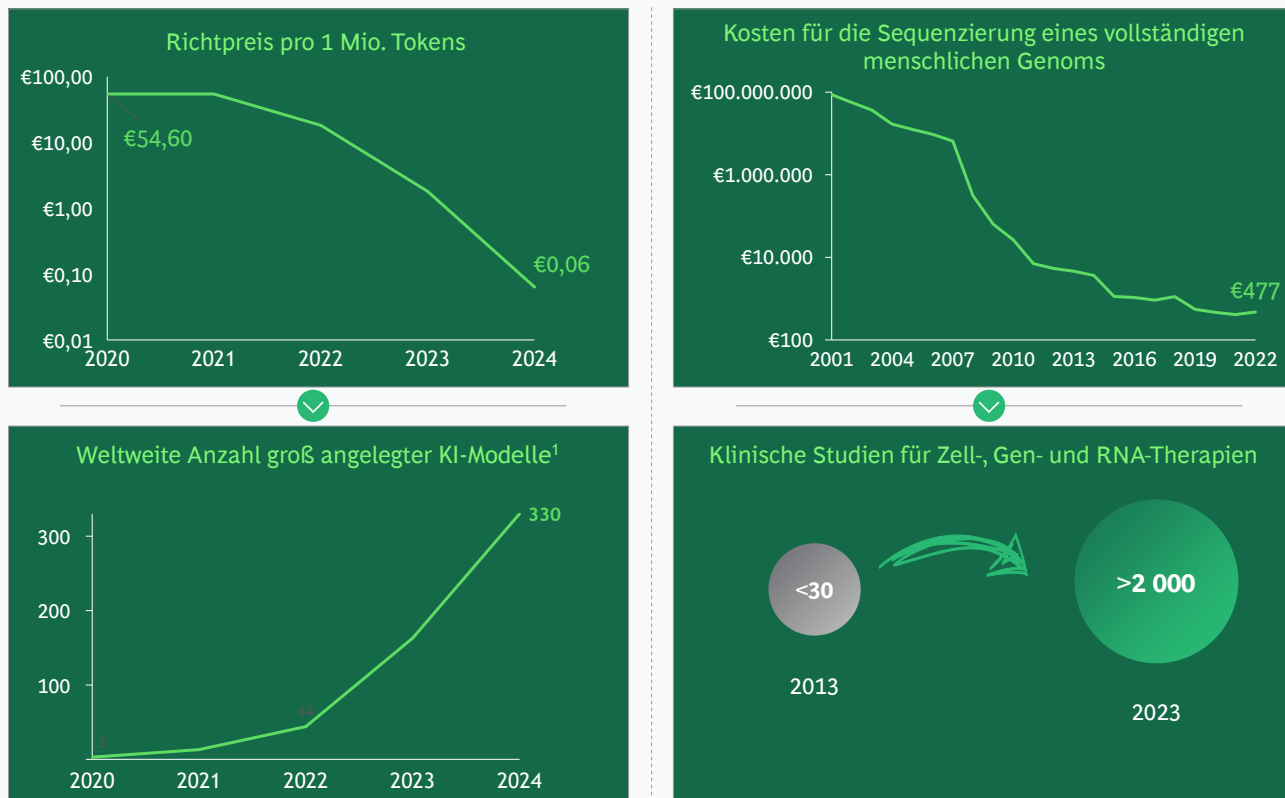
Große Sprachmodelle in der KI oder andere Deep-Tech-Bereiche wie Biotechnologie galten dabei lange als Zukunftsmusik – spannend, aber weit von breiter Anwendung entfernt. Der entscheidende Faktor, warum diese Technologien heute Realität sind und ihre Anwendungsfälle rasant wachsen, liegt in den rapide sinkenden Kosten. Solche Kostenkurven führen häufig zu einem Kipppunkt: Was zuvor nur im Labor möglich war, wird plötzlich massentauglich und wirtschaftlich attraktiv.

Die Dynamik zeigt sich besonders in der KI (vgl. Abb. 1): Sinkende Trainings- und Anwendungskosten bei gleichzeitig steigender Leistungsfähigkeit haben die Zahl groß angelegter KI-Modelle stark ansteigen lassen – von drei im Jahr 2020 auf 330 im Jahr 2024.

Ein ähnliches Muster ist in der Biotechnologie erkennbar. Die Kosten für die Sequenzierung eines menschlichen Genoms fielen seit 2001 von etwa 100 Mio. € auf unter 500 €. Parallel dazu haben neue Verfahren wie CRISPR oder CAR-T-Therapien die Zahl klinischer Studien stark steigen lassen.

Diese Beispiele verdeutlichen ein übergeordnetes Prinzip: Sobald die Kostenkurve eine bestimmte Schwelle unterschreitet, erreichen Technologien einen Kipppunkt, an dem sie von Forschungsobjekten zu marktfähigen Anwendungen werden. Auch Technologien, die heute noch weit entfernt wirken – etwa Quantencomputing oder humanoide Robotik auf KI-Basis – könnten in den kommenden Jahren einen solchen Übergang erleben und dabei zentrale Meilensteine wie Quantenüberlegenheit oder breite Anwendbarkeit erreichen. Damit Deutschland und Europa diesen Moment nicht verpassen, ist es entscheidend, jetzt gezielt in Forschung, Entwicklung und die richtigen Rahmenbedingungen zu investieren. Nur so lassen sich die Dynamik und Geschwindigkeit aufbauen, die notwendig sind, um international mithalten und eigene Standards zu setzen.

ABBILDUNG 1 | Wenn Kostenkurven Kippunkte erreichen: vom Forschungsobjekt zur marktfähigen Anwendung



1. Ein Modell gilt als "groß angelegtes KI-Modell", wenn seine Trainingsrechenleistung nachweislich 10^{23} Gleitkommaoperationen (floating-point operations; FLOPS) übersteigt. Quelle: Stanford AI Index; Our World in Data auf Basis von Epoch; Alliance for Regenerative Medicine; National Human Genome Research Institute; BCG-Analyse.

Daher muss die Strategie- und Willensbildung nun schnellstmöglich in die operative Umsetzung überführt werden – mit mutigen Investitionen, der gezielten Bündelung von Forschungs- und Entwicklungskräften sowie wirksamer Zusammenarbeit, um Transfer- und Skalierungshürden zu überwinden, Tempo aufzunehmen und eigene Maßstäbe zu setzen.

Gelingt dies, kann Deutschland „Made in Germany“ neu erfinden: durch die Entwicklung und Skalierung von Deep Tech, die Übersetzung in Produkte, Services und neue Geschäftsmodelle sowie den weltweiten Markterfolg. Damit entsteht die nächste Erfolgsgeschichte einer exportstarken, souveränen Industriena­tion – und Deutschland bleibt seinem Anspruch treu, nicht nur anzuwenden, sondern selbst zu gestalten und zu produzieren.

Was über Deep-Tech-Erfolg entscheidet – und welche Handlungsschritte jetzt zählen

Ziel der vorliegenden Studie ist es, sowohl technologie-spezifische als auch übergreifende Handlungsempfehlungen für eine Umsetzungs-Roadmap zu formulieren, die auf der Hightech Agenda Deutschland aufbaut und den Weg zu einer Spitzenrolle Deutschlands im Bereich Deep Tech weist. Um nachhaltig erfolgreich zu sein, braucht es ein starkes Innovationsökosystem, das alle relevanten Stellhebel entlang der Wertschöpfungskette adressiert. Einzelmaßnahmen reichen nicht aus – entscheidend ist ein integrierter Ansatz, der die zentralen Ökosystemdimensionen verbindet: **(1) Strategie und Zielsetzung, (2) eine leistungsfähige Infrastruktur, (3) die Ausbildung und Gewinnung von Fachkräften, (4) effektiver Technologietransfer und Skalierung, (5) Kooperation zwischen Akteuren sowie (6) Spitzenforschung und -entwicklung.** Nur durch eine solche Ausrichtung lassen sich Innovationshemmnisse überwinden, Synergien nutzen und die Potenziale von Deep Tech in Deutschland voll entfalten.

Deep Tech umfasst zudem eine breite Vielfalt an Technologien, die sich in wissenschaftlicher Grundlage, Reifegrad sowie Industrie- und Anwendungsfeldern unterscheiden. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen entlang der gesamten Innovationskette – von Forschung und Entwicklung über Technologietransfer und Skalierung bis hin zu Kommerzialisierung und Anwendung. Diese Studie fokussiert daher auf vier ausgewählte Deep-Tech-Technologien, für die jeweils konkrete Handlungsempfehlungen in den sechs Ökosystemdimensionen erarbeitet werden. Diese Empfehlungen stellen keine separate Strategie dar, sondern sind als Impuls zur weiteren Ausgestaltung der kürzlich veröffentlichten Hightech Agenda Deutschland zu verstehen. Dementsprechend orientiert sich auch die Auswahl der Technologien an den im Koalitionsvertrag festgelegten Schlüsseltechnologien, die durch die Hightech Agenda Deutschland jüngst präzisiert und mit ersten Zielsetzungen unterlegt wurden^{4,5}.

- **Künstliche Intelligenz (KI)** als Technologie mit breitem Anwendungsspektrum
- **KI-basierte Robotik** als spezialisierter Teilbereich der Robotik und Anwendungsbeispiel von KI
- **Quantentechnologien** einschließlich Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik
- **mRNA-Medikamente⁶ sowie Gen- und Zelltherapien (GCT)⁷** als spezialisierter Teilbereich der Biotechnologie.

Zwei Rennen, in denen Deutschland je Technologie antritt: Die technologiespezifischen Handlungsempfehlungen basieren auf einer detaillierten Analyse der globalen Wettbewerbssituation sowie der spezifischen Stärken und Herausforderungen Deutschlands im europäischen und internationalen Kontext. Im Fokus stehen dabei zwei parallele Wettläufe: zum einen **der globale Wettbewerb um Entwicklung, Skalierung und Bereitstellung der Technologie**, zum anderen **der darauf aufbauende Wettbewerb um ihre frühzeitige und wertschöpfende Anwendung in Wirtschaft und Gesellschaft** – etwa durch neue Produkte, Prozesse und Geschäftsmodelle, die diese Technologie nutzen. Erfolg in beiden Wettläufen eröffnet erhebliches Potenzial für Wertschöpfung und ist damit zentral für Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit.

Die Ergebnisse je Technologie werden in dieser übergreifenden Executive Summary nur kurz skizziert – ausführlicher finden sie sich in den dedizierten, technologiespezifischen Executive Summaries (vgl. Abb. 2). Letztere richten sich primär an Akteure und Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, die sich mit einzelnen Technologien befassen, etwa politische Gremien oder Arbeitsgruppen auf Länder-, Bundes- oder europäischer Ebene.

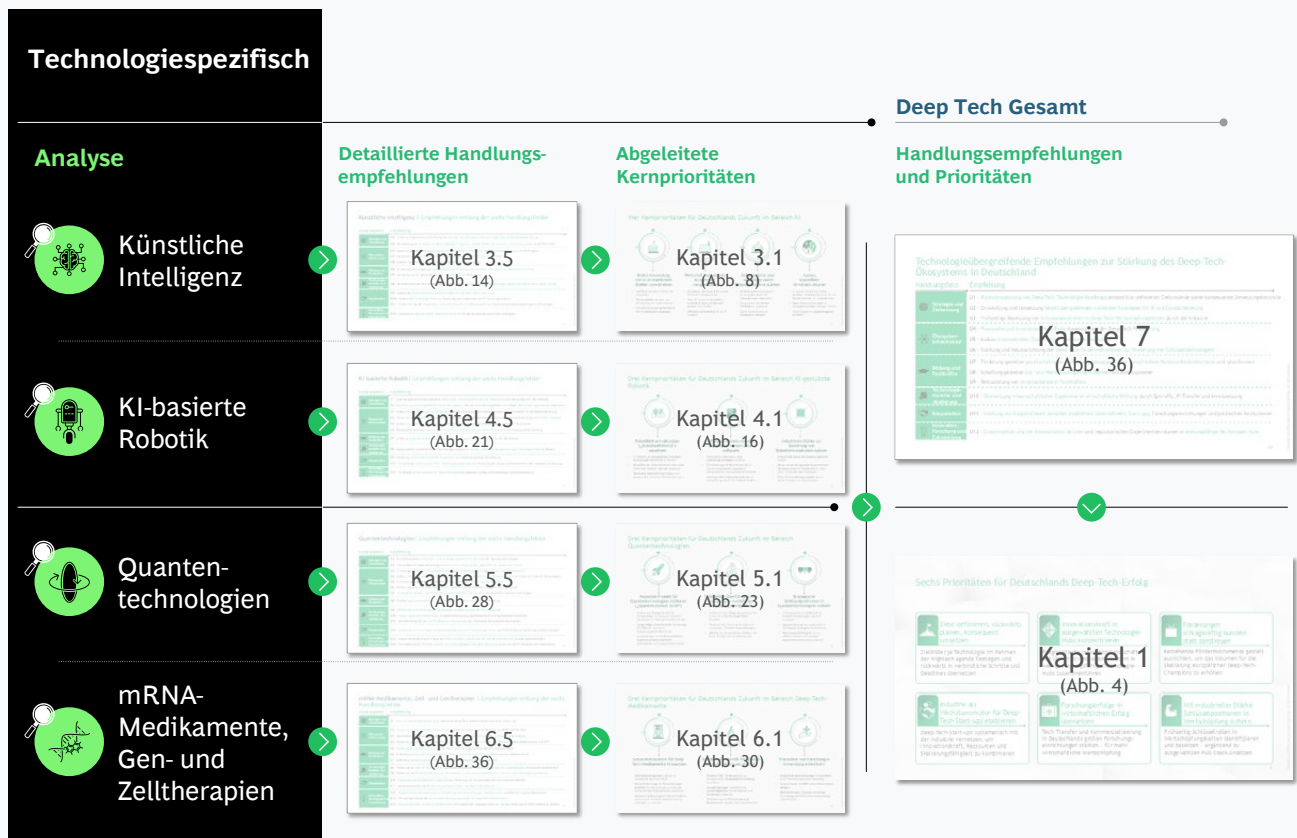
⁴ Bundesregierung (2025a).

⁵ BMFTR (2025a).

⁶ Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Studie der Begriff „mRNA-Medikamente“ verwendet. Dieser umfasst sowohl Wirkstoffe, deren zentrales Wirkprinzip auf mRNA basiert, als auch mRNA-basierte Medikamente, bei denen mRNA eine unterstützende oder vermittelnde Rolle spielt.

⁷ Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Studie der Begriff „Gen- und Zelltherapien“ (GCT) verwendet. Dieser umfasst sowohl Therapien mit direkter Gen- oder Zellmodifikation als auch gen- und zellbasierte Ansätze, die auf entsprechenden Technologien beruhen, ohne primär Gene oder Zellen zu verändern.

ABBILDUNG 2 | Handlungsempfehlungen und Prioritäten für Deutschland bottom-up erarbeitet



Quelle: BCG-Analyse

Künstliche Intelligenz: Wertschöpfung durch konsequente Anwendung erzeugen

KI ist bereits heute tief in Alltag und Wirtschaft integriert – von optimierten Produktionslinien und hochautomatisierten Fahrerassistenzsystemen bis zu generativen Anwendungen auf Endgeräten. Gleichzeitig bleibt sie ein zentrales Deep-Tech-Feld, da nächste Stufen wie „Artificial General Intelligence“ (AGI) weiterhin mit hoher Unsicherheit und (voraussichtlich) langen Entwicklungszeiten verbunden sind. Während Deutschland im internationalen Rennen um die Weiterentwicklung grundlegender KI-Technologien gegenüber den USA und China deutlich zurückliegt, bestehen im zweiten Rennen – der Technologieanwendung – reale Chancen, vorhandene Stärken auszubauen und eine führende Rolle einzunehmen.

Daraus ergibt sich eine klare Handlungsagenda: Deutschland sollte sich in der Technologieentwicklung auf strategisch relevante Felder wie „Industrielle KI“ konzentrieren, in denen der Wettbewerb noch offen ist – etwa bei der Entwicklung von „Large Industry Models“ mit spezifischen industriellen Anwendungsfällen. Zudem gilt es, die breite Anwendung von KI in staatlichen Stellen voranzutreiben, Unternehmen bei der konsequenten Umsetzung eines „AI-First“-Ansatzes zu unterstützen, nationale Bildungsinitiativen für Weiterbildung und gesellschaftliche Akzeptanz auszubauen sowie technische Souveränität durch Rechenzentren, Infrastruktur und Open-Source-Lösungen zu erhöhen.

KI-basierte Robotik: Führungsrolle durch Ausbau von Kompetenzen und Infrastruktur sichern

Die Entwicklung der Robotik ist eng mit dem Fortschritt der KI verknüpft. Generative KI-Modelle eröffnen neue Einsatzfelder jenseits der klassischen Industrierobotik, insbesondere in dynamischen Umge-

bungen, die visuelle Wahrnehmung, präzise Handhabung und Planung erfordern. Deep-Tech-Ansätze wie „Robotic Foundation Models“ (RFMs) und „World Models“ könnten diese Möglichkeiten mittelfristig erweitern und langfristig den Weg zu allgemein einsetzbaren Robotern (z.B. in Krankenhäusern und Privathaushalten) ebnen. Damit gewinnt Robotik für Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Wachstum erheblich an strategischer Bedeutung – mit Potenzial zur Entlastung beim Fachkräftemangel, zur Anpassung an den demografischen Wandel und zur Stärkung der industriellen Leistungsfähigkeit. Der globale Markt von derzeit rund 30 Mrd. € dürfte sich bis 2030 mehr als verdoppeln, bei positiver Entwicklung in der humanoiden Robotik sogar verdreifachen⁸.

Deutschland verfügt in der Robotik über exzellente Forschung sowie führende Industrie- und Automatisierungskompetenz. Doch die Differenzierung in der Robotik verlagert sich zunehmend auf Software, KI und deren Integration – Bereiche, in denen Wettbewerber wie die USA, China und Südkorea führend sind. Um im globalen Technologiewettlauf nicht zurückzufallen, muss Deutschland gezielt in Kompetenzen, spezialisierte Robotik-Infrastruktur und Skalierung investieren.

Drei strategische Prioritäten sind dabei entscheidend: eine nationale Robotikoffensive zum Ausbau der Infrastruktur, die Etablierung offener und kompatibler Architekturen für Forschung und Entwicklung sowie die Skalierung von Innovationen mithilfe der industriellen Stärke Deutschlands.

Quantentechnologien: Mit Schlüsseltechnologien im Tech-Stack zum Erfolg gelangen

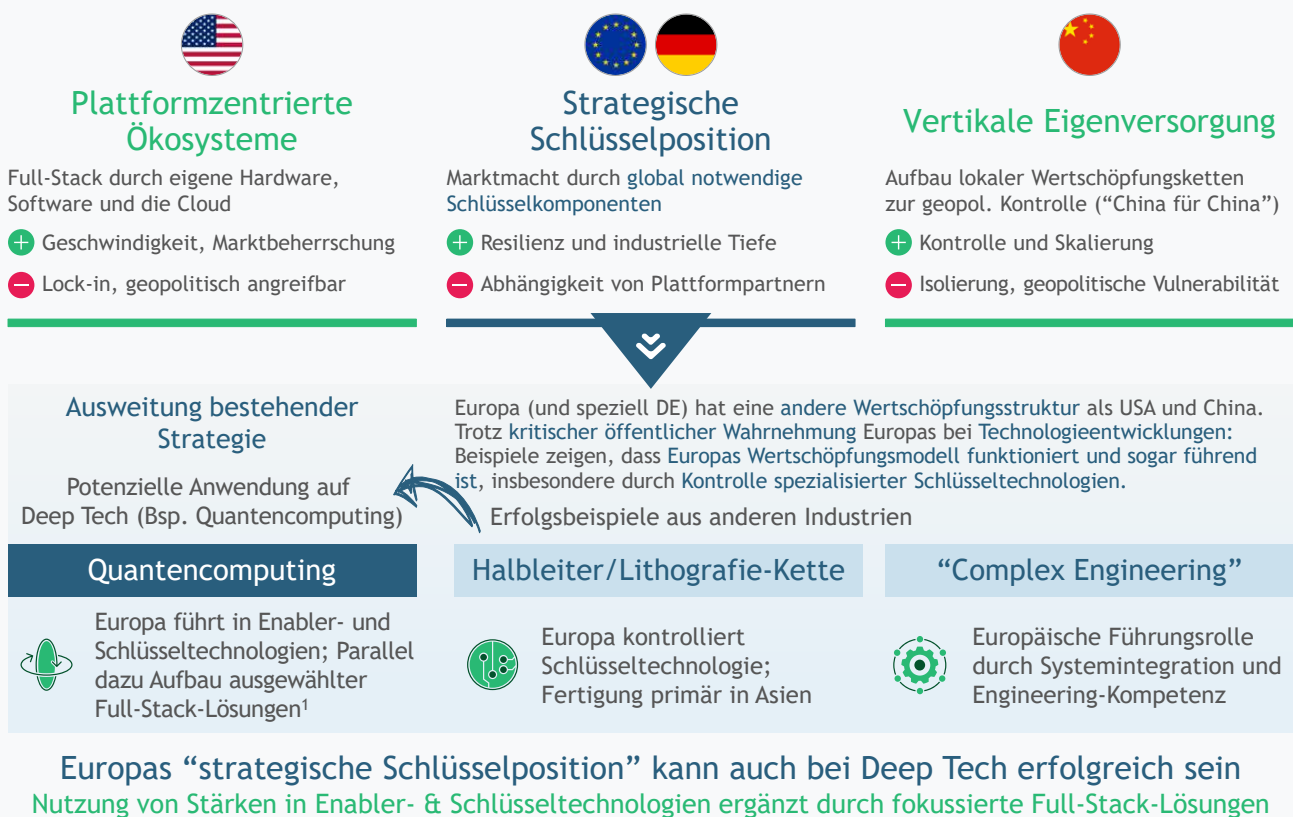
Quantentechnologien eröffnen das Potenzial, fundamentale Grenzen bestehender Technologien zu überwinden – in Rechenleistung, Kommunikationssicherheit und Messgenauigkeit. Mit den drei Säulen Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik rücken sie weltweit ins Zentrum nationaler Innovationsstrategien. Noch befinden sie sich in einem frühen Entwicklungsstadium; die Rennen um Entwicklung und Anwendung sind noch offen. Diese Situation bietet Deutschland und Europa die Chance, sich durch gezielte Investitionen und eine klare Roadmap strategisch zu positionieren und frühzeitig Wertschöpfung zu erschließen.

Deutschland bringt dafür starke Voraussetzungen mit: eine international anerkannte Forschungsbasis sowie führende Industriekompetenzen in Schlüsseltechnologien wie Photonik, Laser und Kryotechnik. Gleichzeitig ist das deutsche Innovationssystem fragmentiert, es fehlen Strukturen für Transfer, Translation und industrielle Anwendung, und Finanzierungslücken schwächen die Dynamik. Nationale und europäische Strategien haben zentrale Weichen gestellt – entscheidend ist nun die Umsetzung in eine verbindliche Roadmap mit Meilensteinen, Verantwortlichkeiten und industrieorientierter Ausrichtung.

Drei Prioritäten stehen im Mittelpunkt: Erstens eine „Quanten-Mission 2030“ als Moonshot-Projekt für souveräne Infrastrukturen und praxisnahe Anwendungen, zweitens die konsequente Übersetzung von Forschung in marktfähige Lösungen durch Technologie-Hubs, vereinfachte IP-Regelungen und frühe Ankerkunden aus Staat und Industrie, drittens die gezielte Sicherung global relevanter Enabler-Technologien, um internationale Wettbewerbsfähigkeit gegenüber kapitalstarken Full-Stack-Ansätzen aus den USA und China langfristig abzusichern (vgl. Abb. 3 Beispiel Quantencomputer).

⁸ BCG Robotics Market Model 2025; IFR 2024; Interact Analysis, Industriereports; Experteninterviews.

ABBILDUNG 3 | Führungspotenzial durch Kontrolle strategischer Schlüsselpositionen – Deutschlands und Europas Erfolgsmodell, auch im Bereich Deep Tech



1. Aufbau von Full-Stack-Quantencomputing-Lösungen auch avisiert in Hightech Agenda Deutschland

mRNA-Medikamente sowie Gen- und Zelltherapien: Wettbewerbsfähigkeit durch Translation und Skalierung sichern

mRNA-Medikamente sowie Gen- und Zelltherapien markieren einen Paradigmenwechsel in der Medizin. Sie eröffnen die Möglichkeit, Krankheitsursachen gezielt und teils kurativ zu adressieren – mit weitreichenden Folgen für das Gesundheitssystem und erheblichem Wertschöpfungspotenzial. Bis 2030 dürfte sich der Markt für diese Biotechnologien vervierfachen, mit jährlichen Wachstumsraten von teils über 40 %.⁹ Für Deutschland ergibt sich daraus eine doppelte Chance: die medizinische Versorgung grundlegend zu transformieren und sich im globalen Wettbewerb um Deep-Tech-Biotechnologie als Standort von Weltrang zu positionieren.

Dank führender Unternehmen und exzellenter Forschung besitzt Deutschland eine starke Ausgangssituation. Gleichzeitig bestehen zentrale

Herausforderungen, die entschlossen und konsequent angegangen werden müssen. Dazu zählen Unsicherheiten bei Markteintritt und Preisfindung, eingeschränkter Zugang zu Infrastruktur, Engpässe bei Schlüsselkomponenten sowie fehlende Fachkräftekapazitäten, die derzeit die Skalierung innovativer Medikamente bremsen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit schwächen.

Um die Chancen dieser Biotechnologien zu nutzen und Weltmarktführer zu werden, sind drei strategische Prioritäten für Deutschland entscheidend. Erstens muss das Gesundheitssystem mit neuen Erstattungsmodellen, adaptiven Zulassungsverfahren und neuen Finanzierungslogiken auf Deep-Tech-Medikamente ausgerichtet werden. Zweitens gilt es, die Standortattraktivität in den späteren Entwicklungsphasen zu erhöhen, um Investitionen international führender Unternehmen anzuziehen. Drittens braucht es ein leistungsfähiges Translationsökosystem, das Ausgründungen erleichtert, Good-Manufacturing-Practice (GMP)-nahe Infrastruktur bereitstellt sowie den Transfer zwischen Forschung und Anwendung beschleunigt.

⁹ EvaluatePharma (Februar 2025); Experteninterview; BCG-Analyse.

Vom Einzelerfolg zur Gesamtstrategie: Sechs Prioritäten für ein starkes Deep-Tech-Ökosystem

Aus den technologiespezifischen Empfehlungen ergeben sich übergreifende Maßnahmen (vgl. Abb. 4), die das gesamte Deep-Tech-Ökosystem in Deutschland stärken. Diese Empfehlungen sind entscheidend für eine kohärente Weiterentwicklung der deutschen Deep-Tech-Strategie – auch im Rahmen der Hightech Agenda – und richten sich primär an Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, die den übergreifenden Rahmen gestalten.

ABBILDUNG 4 | Sechs Prioritäten für Deutschlands Deep-Tech-Erfolg



Quelle: BCG-Analyse

1. Ziele definieren, rückwärts planen, konsequent umsetzen

Für den Erfolg von Deep Tech braucht es Verbindlichkeit. Dazu gehören klar messbare und zeitlich festgelegte Ziele, mit direktem Bezug zur Wertschöpfung. Nur so lassen sich politische, wirtschaftliche und wissenschaftliche Kräfte langfristig bündeln und mobilisieren. Erste Schritte, etwa durch konkrete Zielmarken im Quantencomputing in der Hightech Agenda, sind vielversprechend. In den kommenden Monaten sollte dieser Ansatz systematisch auf alle Schlüsseltechnologien ausgeweitet werden. Die Ziele sind durch strategische Rückwärtsplanung in Roadmaps mit zeitkritischen Pfaden und relevanten Meilensteinen zu übersetzen. Eine zentrale Koordinierungsstelle sollte Fortschritte überwachen und Anpassungen ermöglichen – und damit einen kohärenten Rahmen für konsequente Umsetzung und internationale Wettbewerbsfähigkeit schaffen.

2. Innovationskraft in ausgewählten Technologie-Hubs konzentrieren

Deutschland verfügt über mehr als 120 Innovationscluster¹⁰ – ein Zeichen von Engagement, zugleich aber Ausdruck von Fragmentierung, Doppelstrukturen und begrenzter Wirkung. Diese Zersplitterung schwächt Exzellenz, verhindert Skaleneffekte und mindert die Wettbewerbsfähigkeit, insbesondere bei kapitalintensiven Technologien.

Um im Deep Tech global bestehen zu können, sollten die Strukturen zu wenigen, leistungsfähigen Technologie-Hubs konsolidiert werden. Diese Hubs müssen regional verankert und international sichtbar sein, sich auf prioritäre Felder wie KI, (KI-basierte) Robotik, Quantentechnologien oder Biotechnologie konzentrieren und kritische Massen an Know-how, Talenten und Kapital bündeln.

Erfolgsentscheidend ist, dass sie als Brücken zwischen Forschung und Wirtschaft fungieren: Sie vernetzen Wissenschaft, Industrie, Start-ups und Investoren, beschleunigen den Transfer und fördern die Erprobung sowie die Skalierung industrieller Anwendungen. Dafür braucht es kapitalintensive Infrastruktur wie Rechenzentren und Validierungsplattformen, die weit über die Möglichkeiten vieler kleiner Cluster hinausgeht. So können Hubs zu zentralen Knotenpunkten werden, die Deep Tech in Deutschland vom Forschungserfolg zur Wettbewerbsfähigkeit führen – flankiert von abgestimmter Förderung, langfristiger Finanzierung und sektorübergreifender Vernetzung.

3. Förderungen schlagkräftig bündeln statt zerstreuen

Um Deep Tech erfolgreich zu skalieren, ist eine langfristig koordinierte Förderstrategie auf nationaler und europäischer Ebene erforderlich. Notwendig sind großvolumige, risikotragfähige Fonds, die den hohen Kapitalbedarf in kritischen Wachstumsphasen abdecken und privates Kapital durch Co-Investitionen mobilisieren. Statt kleinteiliger und fragmentierter Maßnahmen gilt es, bestehende Programme in wenige schlagkräftige Instrumente zu bündeln und mutige Einföhrungen zu ermöglichen. Ergänzend sollten staatliche Aufträge, Nachfragesignale und Infrastruktursicherungen (z. B. durch Auslastungsgarantien) den Markt stimulieren. Damit dies gelingt, ist eine enge Abstimmung zwischen Länderförderungen, nationalen Initiativen und EU-Programmen erforderlich. Industrie und Forschung sollten dabei aktiv eingebunden werden, um Bedarf zu definieren und Input für die praxisnahe Gestaltung der Förderstrukturen zu liefern.

4. Industrie als Wachstumsmotor für Deep-Tech-Startups etablieren

Um Deep-Tech-Innovationen schnell von der Forschung in die Anwendung zu bringen, benötigt Deutschland den Zusammenschluss von Industrie und Start-ups. Etablierte Unternehmen bieten Marktzugang, Infrastruktur, regulatorische Erfahrung und reale Anwendungsfelder, während Start-ups Innovationskraft, Flexibilität und technologische Pionierarbeit einbringen. Politik und Wirtschaft sollten risikoteilende Pilotprojekte, Corporate-Venture-Fonds und Co-Creation-Modelle fördern, um Unsicherheiten zu verringern und frühzeitige Kooperationen attraktiv zu machen. Entscheidend ist, dass die Zusammenarbeit kontinuierlich über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg erfolgt – von der Grundlagenforschung bis zur Markteinführung – und so die Industrie als zentralen Wachstumsmotor im Deep-Tech-Ökosystem etabliert.

5. Forschungserfolge in wirtschaftlichen Erfolg übersetzen

Deutschland investiert jährlich Milliarden in exzellente Forschung: Allein die vier großen Wissenschaftsorganisationen – Fraunhofer, Helmholtz, Max Planck und Leibniz – erhielten im Jahr 2023 Forschungsförderung von Bund und Ländern in Höhe von über 8,5 Mrd. €¹¹. Diese Stärke wird bislang jedoch nicht systematisch in wirtschaftliche und gesellschaftliche Wirkung übersetzt. Um dies zu ändern, sollten die bestehenden Forschungsstrukturen stärker auf Technologietransfer, Anwendung und Ausgründungen ausgerichtet und in

¹⁰ BCG (2023b).

¹¹ BMBF (2024).

diesem Bereich gezielt gefördert werden. Dazu gehören professionell ausgestattete, langfristig finanzierte Transferstellen, die Gründungsteams beraten, Netzwerke zu Industrie und Investoren öffnen sowie Kooperationen systematisch begleiten. Ergänzend ist eine gezielte Anpassung wissenschaftlicher Karrierepfade notwendig: Neben Publikationen sollten auch Patente, Lizenzen und Spin-offs als gleichwertige Erfolgsgrößen gelten – denn Wirkung entsteht nur dort, wo Forschung, Transfer und Karrieren strategisch verzahnt sind. Die Politik ist gefordert, den passenden Rahmen zu setzen, etwa durch gezielte Förderprogramme und eine bundesweit einheitliche, praxisnahe Ausgestaltung der IP-Regelungen, um Ausgründungen zu erleichtern. So können exzellente Forschungsergebnisse schneller in marktfähige Produkte, Unternehmen und internationale Wettbewerbsfähigkeit überführt werden.

6. Mit industrieller Stärke Schlüsselpositionen in Wertschöpfung sichern

Deutschland verfügt über eine international einzigartige industrielle Basis mit Technologieführerschaft in Bereichen wie Maschinenbau, Mikroelektronik und Photonik. Europas Wertschöpfungsmodell hat gezeigt, dass Exzellenz in spezialisierten Schlüsseltechnologien internationale Wettbewerbsstärke ermöglicht. Diese Stärken müssen nun systematisch mit Deep-Tech-Innovationen verknüpft und ausgebaut werden. Entscheidend ist, strategische Positionen in global relevanten Enabler- und Schlüsseltechnologien einzunehmen und damit unverzichtbarer Produzent in kritischen Wertschöpfungsketten zu bleiben. Zugleich gilt es, durch solche Schlüsselpositionen Technologien, Anwendungen und Standards aktiv mitzugestalten. In Verbindung mit ausgewählten Full-Stack- und Plattformlösungen eröffnet dieser Ansatz die Chance, gegenüber den kapitalintensiven Plattformökosystemen und Full-Stack-Strategien aus den USA und China dauerhaft wettbewerbsfähig zu sein (vgl. Abb. 3).

1.1. Kontext und Motivation: Deep Tech als wirtschaftlicher Schlüssel- und Standortfaktor

Deep Tech bezeichnet eine neue Klasse potenzieller Schlüsseltechnologien, die grundlegende technologische Durchbrüche ermöglichen und maßgeblich zur Lösung zentraler wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und ökologischer Herausforderungen unserer Zeit beitragen können. Um die Marktreife zu erlangen und das volle Potenzial von Deep-Tech-Innovationen auszuschöpfen, sind jedoch erhebliche Fortschritte in Forschung und Entwicklung

erforderlich – bei gleichzeitigen hohen technologischen und marktwirtschaftlichen Unsicherheiten, langen Entwicklungszyklen und beträchtlichem Investitionsbedarf.¹²

Angesichts dieser Herausforderungen ist es einzelnen Akteuren kaum möglich, Deep-Tech-Technologien eigenständig bis zur Marktreife zu bringen. Vielmehr bedarf es eines koordinierten und strategischen Zusammenwirkens von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft – getragen von einer politischen Agenda, die die notwendigen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen schafft sowie Innovationen gezielt fördert und deren Umsetzung unterstützt. Nur so kann sich Deutschland im europäischen und globalen Kontext langfristig eine Führungsrolle sichern und seine Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig stärken.

Länder weltweit erkennen, dass gezielte Investitionen in Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz (KI), Quantentechnologien, Biotechnologie oder (KI-basierte) Robotik mittelfristig bedeutenden Einfluss auf technologische Entwicklungen und zukünftige Wertschöpfungsketten haben werden. Der plattformorientierte Charakter vieler Deep-Tech-Technologien führt außerdem dazu, dass sie eine breite Anwendung ermöglichen und so die Entwicklung gleich mehrerer Industrien vorantreiben können.

Deep-Tech-Technologien sind somit strategisch entscheidend für die künftige wirtschaftliche Stärke und technologische Souveränität Deutschlands. Aktuell befindet sich das Land in einem Spannungsfeld zwischen Potenzialen und Herausforderungen. Einerseits bestehen hervorragende Voraussetzungen und ausgeprägte Stärken in zentralen Deep-Tech-Bereichen. Insbesondere profitiert Deutschland von einer guten Ausgangslage bei spezifischen Enabler-Technologien sowie von einem international anerkannten Forschungs- und Ausbildungssystem. Diese Stärken eröffnen die Chance, eine führende Rolle sowohl auf europäischer als auch internationaler Ebene einzunehmen – vorausgesetzt, die Potenziale werden konsequent aktiviert und strategisch genutzt.

Andererseits bestehen in mehreren Schlüsselbereichen erhebliche Defizite, insbesondere hinsichtlich der digitalen Infrastruktur, des Zugangs zu Risikokapital sowie der Geschwindigkeit von Innovations- und Entwicklungsprozessen. Diese Schwachstellen müssen gezielt und systematisch angegangen werden, um im globalen Wettbewerb bestehen zu können.

Die politische Bedeutung von Deep Tech wurde in Deutschland bereits erkannt: Sie spiegelt sich im aktuellen Koalitionsvertrag der Bundesregierung wider, in

¹² MÜNCHNER KREIS (2024).

dem sechs Schlüsseltechnologien explizit priorisiert werden: KI, Quantentechnologien, Biotechnologie, Mikroelektronik, Fusion und klimaneutrale Energieerzeugung, und klimaneutrale Mobilität. Nach der politischen Willensbildung und der jüngsten Veröffentlichung der Hightech Agenda beginnt nun die entscheidende Phase der Weichenstellung und Umsetzung.

Zentrale Befunde in Zahlen verdeutlichen die Dringlichkeit für Deutschland:

1. **> 8 Billionen €:**¹⁴ Geschätzter globaler Wertschöpfungsbeitrag von Deep Tech in 2030 – ein enormes wirtschaftliches Potenzial, an dem sich Deutschland und Europa durch heutige Weichenstellungen einen signifikanten Anteil sichern können.
2. **< 10 %:**¹⁵ Nur rund 10 % der 427 Deep-Tech-Unicorns weltweit stammen aus Europa – ein klares Missverhältnis zur wirtschaftlichen Bedeutung der Region (ca. 20 % der globalen Wertschöpfung)¹⁶ und ein deutlicher Weckruf, aufzuholen.
3. **~ 50 %:**¹⁷ Außenabhängigkeit bei Kapital: Rund die Hälfte der Spätphasenfinanzierung für europäische Deep-Tech-Start-ups kommt von Investoren außerhalb der EU. Europa – und damit auch Deutschland – ist in der Skalierungsphase seiner Technologieunternehmen aktuell stark auf ausländisches Kapital angewiesen, was Abhängigkeiten schafft und zur Abwanderung von Start-ups und Scale-ups führt.

Für Deutschland sollten diese Zahlen zugleich Warnsignal und Ansporn sein, jetzt entschlossen und konsequent zu handeln, um die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern. Dabei geht es um mehr als nur Wirtschaftswachstum: Deep Tech entscheidet maßgeblich darüber, wo künftige Wertschöpfung entsteht und wer globale technologische Standards setzt. Verliert Deutschland den Anschluss, droht eine weiterwachsende Abhängigkeit bei essenziellen Technologien von Ländern und Unternehmen außerhalb Europas. Umgekehrt bietet eine erfolgreiche Deep-Tech-Strategie die Chance, wichtige Kontrollpunkte in den Wertschöpfungsketten strategischer Technologien zu sichern und technologische Unabhängigkeit zu stärken.

1.2 Ziel der Studie: Eine strategische Deep-Tech-Roadmap für Deutschland, um im europäischen Kontext international an die Spitze zu gelangen

Angesichts der wachsenden Bedeutung von Technologien mit disruptivem Potenzial wird es eine koordinierte Herangehensweise und eine strategisch abgestimmte Positionierung brauchen, um die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Dafür ist eine übergreifende und kohärente Deep-Tech-Roadmap – innerhalb der Hightech Agenda – erforderlich, die Deutschland international an die Spitze führt. Ziel dieser Studie ist es, die Grundlage für eine solche strategische Deep-Tech-Roadmap für Deutschland zu schaffen – inklusive konkreter Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Die übergreifende Ambition dabei ist eine Positionierung Deutschlands „vor der Welle“, um technologische Schlüsselentwicklungen frühzeitig zu erkennen und aktiv mitzugestalten.

Die Untersuchung umfasst folgende Kernaspekte:

- Strategische Relevanz von Deep Tech
- Aktuelle Positionierung Deutschlands im internationalen Vergleich
- Analyse von vier ausgewählten Schlüsseltechnologien
- Handlungsempfehlungen für eine strategische Positionierung.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden vier ausgewählte Deep-Tech-Schlüsseltechnologien detailliert beleuchtet: **KI, KI-basierte Robotik, Quantentechnologien sowie mRNA-Medikamente und Gen- und Zelltherapien (als spezialisierter Teilbereich der Biotechnologie)**. Die Auswahl der Technologien ist unter anderem durch die im Koalitionsvertrag der Bundesregierung priorisierten Schlüsseltechnologien motiviert.¹⁸ Zusätzlich unterstreichen weitere Faktoren die strategische Relevanz der vier Technologien für Deutschland, die in Kapitel 3 bis 6 detailliert dargestellt werden.

Die untersuchten Technologiefelder befinden sich aktuell in entscheidenden Entwicklungsphasen mit dem Potenzial, in den kommenden Jahren tiefgrei-

¹³ Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt, BMFTR (2025).

¹⁴ BCG (2024b).

¹⁵ BCG (2024b).

¹⁶ Bundeszentrale für politische Bildung (2024).

¹⁷ Lakestar (2025).

fende wirtschaftliche und gesellschaftliche Veränderungen anzustoßen. Dadurch ist für Deutschland ein Zeitfenster entstanden, in dem es sich durch gezielte Maßnahmen wichtige Wettbewerbsvorteile bei diesen Technologien aufbauen und sichern kann. Zudem verfügt Deutschland in diesen Technologiefeldern bereits über etablierte Forschungskapazitäten und industrielle Kompetenz – eine solide Ausgangsbasis, um eine starke internationale Wettbewerbsposition einzunehmen und diese weiter auszubauen.

Der Fokus auf eine Teilmenge der im Koalitionsvertrag genannten Schlüsseltechnologien schmälert nicht die Relevanz der Übrigen. Vielmehr schafft die gezielte Auswahl die Grundlage für eine vertiefte Analyse und passgenaue Handlungsempfehlungen.

1.3 Dringlichkeit und strategischer Handlungsbedarf: Warum Deep Tech? Warum jetzt?

Deep Tech umfasst Technologien mit weitreichenden Auswirkungen auf die künftige Gesellschaft, Wirtschaft und Sicherheit Deutschlands. Die Dringlichkeit zu handeln, ist hoch: Ohne zügige politische Weichenstellungen wird sich das Zeitfenster für eine erfolgreiche Positionierung Deutschlands im globalen Deep-Tech-Wettbewerb schnell wieder schließen. Fünf zentrale Aspekte verdeutlichen den akuten Handlungsbedarf.

¹⁸ Bundesregierung (2025a) (Abschnitt „Forschungs- und Innovationsförderung“, S. 77/78.).

ABBILDUNG 5 | Fünf Gründe, warum Deutschland jetzt im Bereich Deep Tech handeln muss



1. BCG (2024) *From Lab to Leader: Unlocking Europe's €8 Trillion Deep Tech Opportunity*

1. Geopolitische Spannungen erhöhen die Dringlichkeit. Spannungen zwischen den führenden Wirtschaftsmächten USA, China und Europa erzeugen eine akute Notwendigkeit zur Sicherung technologischer Autonomie. China mit seiner Initiative „Made in China 2025“ und die USA mit dem „CHIPS and Science Act“¹⁹ verfolgen umfassende strategische Programme, um technologische Dominanz zu erreichen und ihre eigene Unabhängigkeit zu gewährleisten. Europa dagegen befindet sich in einer kritischen Aufholphase. Der European Deep Tech Report 2025 betont ausdrücklich, dass die Region dringend handeln müsse, um ihre technologische Souveränität zu stärken²⁰ – andernfalls drohe eine Wiederholung der problematischen Abhängigkeiten, wie sie bereits heute bei Halbleitern und generativer KI bestehen. Angesichts einer zunehmend volatilen geopolitischen Lage würde eine weitere technologische Abhängigkeit Europa in eine strategisch prekäre Situation versetzen und den zukünftigen Handlungsspielraum signifikant einschränken.

2. Technologische Kompetenz wird zum Thema nationaler Sicherheit. Technologische Kompetenz, insbesondere in Schlüsseltechnologien wie KI, (KI-basierter) Robotik und Quantentechnologie, gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Gewährleistung der nationalen Sicherheit. Die Technologien leisten nicht nur einen Beitrag zur Innovation in der zivilen Wirtschaft, sondern auch zur Weiterentwicklung von Verteidigungstechnologie und kritischen Infrastrukturen. Deutschland und Europa geraten dabei unter strategischen Zugzwang, um technologisch mithalten und die eigene nationale Sicherheit langfristig gewährleisten zu können.²¹

3. Ein 8-Billionen-Euro-Potenzial steht auf dem Spiel. Neben den genannten geoökonomischen und geopolitischen Handlungsgründen liegen auch gewichtige wirtschaftliche Motive vor: Bei anhaltend erfolgreicher Entwicklung und Skalierung von Deep-Tech-Technologien ist im Jahr 2030 mit einem weltweiten Wertschöpfungspotenzial von rund 8 Billionen € zu rechnen. Dieses enorme Potenzial ergibt sich aus der Fähigkeit der Technologien, bestehende Märkte grundlegend zu transformieren sowie völlig neue Märkte und Geschäftsmodelle zu schaffen. Deutschland und Europa haben heute die historische Gelegenheit, von diesen Potenzialen zu profitieren und sich durch gezieltes und entschlossenes Handeln eine starke Wettbewerbsposition in zentralen Zukunftstechnologien zu sichern.

Insbesondere die USA und China haben diese Potenziale bereits erkannt und investieren umfassend. Der internationale Wettbewerb um technologische Marktführerschaft und den damit verbundenen Wertschöpfungszuwachs hat daher bereits deutlich an Dynamik gewonnen, was die Notwendigkeit Deutschlands und Europas, rasch und effektiv zu handeln, zusätzlich verstärkt.

4. Deutschlands Zukunft als Industriestandort hängt von den heutigen Weichenstellungen ab. Deutschlands Wirtschaftskraft und Wohlstand basieren wesentlich auf seiner starken industriellen Basis. Die dringende Notwendigkeit, industrielle Stärke nicht nur zu bewahren, sondern gezielt auszubauen und zukunftsfähig weiterzuentwickeln, ist unbestritten – wie auch im aktuellen Koalitionsvertrag erkannt und betont.²³ Um international wettbewerbsfähig zu bleiben, ist es essenziell, dass sich Deutschland rechtzeitig auf aktuelle Zukunftstechnologien einstellt und erneut eine führende Rolle einnimmt – vergleichbar mit seiner heutigen Stärke bei zentralen Technologien und Komponenten entlang der industriellen Wertschöpfungsketten. Schlüsseltechnologien wie KI, (KI-basierte) Robotik und Quantentechnologie werden entscheidend sein, um die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern und weiter auszubauen.²⁴ Durch eine entschlossene Integration dieser Technologien in Kernindustrien kann sichergestellt werden, dass die damit verbundenen Wertschöpfungspotenziale in Deutschland und Europa realisiert und Zukunftsmärkte von der deutschen und europäischen Wirtschaft offensiv besetzt werden.

5. Technologisches Know-how führt in Deutschland bislang nur begrenzt zu marktwirksamer Wertschöpfung. Deutschland hat starke Voraussetzungen für eine technologische Führungsrolle im Bereich Deep Tech: Die umfassende Grundlagenforschung, eine international anerkannte Wissenschaftslandschaft sowie etablierte Forschungsinfrastrukturen bieten ausgezeichnete Bedingungen, um innovative Ideen zu entwickeln und entscheidende technologische Durchbrüche zu erzielen. Allerdings scheitert Deutschland bislang häufig daran, diese wissenschaftlichen Erkenntnisse in nachhaltige, wirtschaftliche Wertschöpfung zu übersetzen.

¹⁹ United States Congress (2022).²⁰ BCG (2024b).

²⁰ BCG (2024b).

²¹ Bundesregierung (2025a).

²² BCG (2024b).

²³ Bundesregierung (2025a).

²⁴ BDI (2024c).

Unzureichendes Risikokapital und ineffiziente Transferstrukturen wie langwierige Genehmigungsprozesse²⁵ behindern die Übersetzung innovativer Ideen in marktführende Technologien. Im internationalen Vergleich, vor allem gegenüber den USA und China, verfügt Europa über deutlich weniger leistungsfähige Risikokapitalmärkte zur Finanzierung der entscheidenden Wachstumsphasen technologischer Innovationen – in späten Finanzierungsrunden stammt etwa die Hälfte der Investitionen von Geldgebern außerhalb der EU.²⁶ Die Folge ist, dass vielversprechende Entwicklungen entweder ins Ausland abwandern oder gar nicht erst bis zur kritischen Marktreife gelangen. Ohne signifikante Verbesserung von Risikokapitalverfügbarkeit und Investitionsbereitschaft wird Deutschland nicht in der Lage sein, die angestrebte Wertschöpfung durch Deep Tech zu realisieren.

Diese Aspekte verdeutlichen, warum jetzt gehandelt werden muss: Das laufende Jahrzehnt wird maßgeblich darüber entscheiden, ob Deutschland im Deep-Tech-Bereich eine führende Rolle einnimmt oder den Anschluss verliert. Jede Verzögerung würde seine Fähigkeit, Stärken strategisch zu nutzen und Rückstände aufzuholen, erheblich einschränken.

Die aktuelle Situation verlangt nicht nur entschlossenes Handeln – sie bietet auch die Chance, nachhaltige Erfolge zu erzielen: Im Koalitionsvertrag 2025 und der Hightech Agenda Deutschland wurden bereits wichtige Maßnahmen wie der Zukunftsfonds II und die Förderung technologieorientierter Ausgründungen festgeschrieben.²⁷ Darüber hinaus steht das Thema Deep Tech im Fokus breiter gesellschaftlicher Aufmerksamkeit. Es gilt nun, dieses Momentum zu nutzen und Deutschlands Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit nachhaltig zu sichern.

²⁵ BDI (2024d). In einer Umfrage des BDI geben 64 % der Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitenden an: „Ausländische Wettbewerber haben es in der Regel leichter, neue Ideen und Technologien umzusetzen.“ Als größtes Hindernis für den Technologietransfer werden strenge gesetzliche Vorgaben und Regulierungen (76 %) sowie langwierige Genehmigungsverfahren (62 %) genannt.

²⁶ Lakestar (2025).

²⁷ Bundesregierung (2025a).

2. Der globale Wettlauf um Deep Tech: Wo steht Deutschland heute?

2.1. Analyseansatz: Eine ganzheitliche Betrachtung des Deep-Tech-Ökosystems entlang von sechs Dimensionen

Der globale Wettbewerb im Bereich Deep Tech verläuft entlang unterschiedlicher strategischer Logiken: In Asien dominieren staatlich koordinierte Investitions- und Förderprogramme als zentrale Hebel für den Technologieaufbau. Die USA verfügen derzeit über ein hochentwickeltes, primär marktgetriebenes Technologie-Ökosystem, geprägt durch große Tech-Konzerne, agile Start-ups sowie finanzstarke und risikofreudige Venture-Capital-Firmen – ergänzt durch gezielte staatliche Förderung strategisch relevanter Technologien. Europa verfolgt dagegen ein stark forschungsorientiertes Innovationsmodell, das sich durch hohe wissenschaftliche Qualität und industrielle Kompetenz auszeichnet.

Unabhängig von den unterschiedlichen Ansätzen zeigt sich zunehmend: Nachhaltiger Erfolg im Bereich Deep Tech beruht vor allem auf einem – einer ganzheitlichen Betrachtung und Förderung des Innovations-ökosystems. Nur durch eine integrative Vorgehensweise, die relevante Akteure, Rahmenbedingungen, Strukturen und Ressourcen einbezieht, lassen sich Innovationshemmnisse überwinden, Synergien schaffen und die Potenziale von Deep-Tech-Technologien am jeweiligen Standort entfalten. Vor diesem Hintergrund stützt sich die folgende Bestandsaufnahme auf die Analyse von sechs zentralen Handlungsfeldern, die im Rahmen der vorliegenden Studie identifiziert wurden – und die maßgeblich dafür sind, ob ein Land seine Deep-Tech-Potenziale ausschöpfen kann (vgl. Abb. 6).



Quelle: BCG-Analyse

- 1. Strategie und Zielsetzung** – Festlegung klarer Zielbilder, Roadmaps und politischer Agenden zur strategischen Positionierung von Schlüsseltechnologien und zur industriegetriebenen Transformation,
- 2. Ökosystem-Infrastruktur** – gezielter Aufbau sowie nachhaltige Entwicklung von Rahmenbedingungen, Netzwerken und Ressourcen, die die Entwicklung eines leistungsfähigen Technologie-Ökosystems fördern,
- 3. Bildung und Fachkräfte** – Maßnahmen zur gezielten Anwerbung, Bildung und Qualifizierung von Talenten und Experten, um Kompetenzen und Know-how im Bereich von Schlüsseltechnologien langfristig aufzubauen und zu sichern,
- 4. Technologietransfer und -skalierung** – Initiativen, die Austausch und Transfer von Wissen, Technologien und Forschungsergebnissen zwischen Wissenschaft, Industrie und öffentlichem Sektor (sowie innerhalb dieser Gruppen) unterstützen, um sie in praktische Anwendungen und kommerzielle Lösungen zu überführen,
- 5. Kooperation** – Maßnahmen, die Partnerschaften, Allianzen und internationale Vernetzung zwischen Akteuren fördern, um Ressourcen zu bündeln, Standards zu etablieren und eine gemeinsame Agenda für Schlüsseltechnologien zu verfolgen,
- 6. Innovation, Forschung und Entwicklung** – gezielte Unterstützung und Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsprojekte, um neue Schlüsseltechnologien, Anwendungen und Geschäftsmodelle zu ermöglichen.

Diese Handlungsfelder bilden die zentralen Dimensionen, die über Erfolg oder Misserfolg von Deep Tech – auch in Deutschland – entscheiden. Gleichzeitig dienen sie als strukturgebender Rahmen für die technologischen Deep Dives (Kapitel 3 bis 6) und die darauf aufbauenden Handlungsempfehlungen.

2.2. Wo Deutschland steht: Deep Tech im internationalen Spannungsfeld

1. Strategie und Zielsetzung. Eine klare strategische Ambition ist zentrale Voraussetzung für den Erfolg von Deep-Tech-Innovationen. Länder, die international führend sind, formulieren ehrgeizige und explizite Deep-Tech-Ziele und investieren konsequent und langfristig in deren Umsetzung.

So setzen die USA gezielt auf ambitionierte Missionen und großangelegte technologische Innovationsprogramme. Der 2022 verabschiedete „CHIPS and Science Act“ stellt rund 180 Mrd. €²⁸ bereit, um Zukunftstechnologien wie Halbleiter, KI und Quantencomputing zu fördern.²⁹ Institutionen wie DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) sind seit Jahrzehnten international bekannt und anerkannt für die systematische Förderung risikoreicher, visionärer Innovationsprojekte, die sich langfristig und tiefgreifend auf Wirtschaft und Gesellschaft auswirken.³⁰

China wiederum verfolgt in seinen nationalen Fünf-Jahres-Plänen bereits seit Langem explizit das Ziel der globalen Technologieführerschaft in entscheidenden Feldern wie KI und Quantencomputing sowie im Bereich der erneuerbaren Energien.³¹ Diese klaren und ambitionierten Ziele werden durch massive staatliche Investitionen (beispielsweise Investitionen in Höhe von 125 Mrd. €³² für Robotik und Hightech über den National Venture Capital Guidance Fund), zentral koordinierte Innovationsprogramme sowie strategisch ausgerichtete Forschungs- und Entwicklungsinitiativen untermauert und konsequent umgesetzt.

Europa hingegen besitzt zwar ein erhebliches Deep-Tech-Potenzial, jedoch fehlt bislang eine vergleichbar konsequente Umsetzung wie in den USA oder China. Europäische Initiativen wie die European Innovation Agenda (EIA)³³, der European Innovation Act, die European Strategy on Research and Technology Infrastructures (ESFRI), Important Projects of Common European Interest (IPCEI), der European Innovation Council (EIC) sowie technologiespezifische

Strategien (z. B. Quantum Strategy) sind wichtig – in ihrer finanziellen und strategischen Ausgestaltung aber weniger ambitioniert und koordiniert (dem EIC stehen beispielsweise im Rahmen von Horizon Europe [2021 – 2027] 10 Mrd. € für die Unterstützung disruptiver Innovationen zur Verfügung).³⁴

Die Situation in Deutschland weist viele Parallelen zur europäischen Gesamtsituation auf: Deutschlands strategische Ziele im Bereich Deep Tech sind fragmentiert in verschiedenen Strategiepapieren verankert und nicht explizit als „Deep-Tech“-Vision formuliert. Stattdessen sind sie in unterschiedlichen Sektor- oder Technologiefeld-Strategien definiert (z. B. KI-Strategie,³⁵ Forschungsprogramm Quantensysteme³⁶). Auch im Koalitionsvertrag hat die Bundesregierung kein eigenständiges Deep-Tech-Konzept vorgelegt, aber ambitionierte Vorhaben in Schlüsselbereichen benannt. So soll sich Deutschland beispielsweise als weltweit führender Standort für Mikroelektronik etablieren (im Rahmen des European Chips Act)³⁷ und „zum weltweit innovativsten Chemie-, Pharma- und Biotechnologiestandort“ werden.³⁸

Mit Verabschiedung der Hightech Agenda am 30. Juli 2025 hat Deutschland erstmals einen übergreifenden strategischen Ansatz für die im Koalitionsvertrag festgehaltenen sechs Schlüsseltechnologien formuliert. Die Agenda legt spezifische Ziele sowie erste konkrete Maßnahmen zu deren Umsetzung fest und sieht zusätzlich die Erarbeitung technologiebezogener Roadmaps vor. Sie stellt damit einen wichtigen Schritt dar, um bestehende Einzelvorhaben stärker zu verzahnen und eine kohärente strategische Ausrichtung Deutschlands zu gewährleisten.³⁹

Ob die Hightech Agenda die gewünschte Wirkung entfaltet, hängt nun maßgeblich von ihrer Umsetzung ab. Um international führend im Deep-Tech-Bereich zu werden, muss es insbesondere gelingen, die vorgesehenen Maßnahmen effizient zu bündeln und konsequent voranzutreiben. Die angekündigte Roadmap-Erarbeitung wird zeigen, ob die ambitionierten Ziele auch nachhaltig realisiert werden können.

²⁸ Umrechnungskurs: Zur Vereinfachung wurden alle USD-Beträge mit einem gerundeten Durchschnittskurs der letzten Jahre (2020 - 2024) von 1 EUR = 1,10 USD umgerechnet. Daraus ergibt sich 1 USD ≈ 0,91 EUR.

²⁹ HAI (2022).

³⁰ Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA (2025b).

³¹ United Nations Development Programme, UNDP (2024).

³² IFR (2025).

³³ EC (2022).

³⁴ EIC (2025a).

³⁵ Bundesregierung (2025b).

³⁶ BMBF (2022a).

³⁷ Bundesregierung (2025a).

³⁸ Bundesregierung (2025a).

³⁹ BMFTR (2025a).

2. Ökosystem-Infrastruktur. Damit Deep-Tech-Innovationen ihre volle Wirkung entfalten können, brauchen sie eine Infrastruktur, die ihren hohen Anforderungen gerecht wird. Günstige politische Rahmenbedingungen sind dabei entscheidend für den Aufbau und die nachhaltige Entwicklung eines leistungsfähigen Technologie-Ökosystems. International sticht vor allem China durch eine konsequente und schnelle Infrastrukturentwicklung hervor, verbunden mit Deregulierung und gezielten industriepolitischen Maßnahmen zur Stärkung heimischer Champions.⁴⁰ Die USA investieren ebenfalls massiv in Zukunftsinfrastruktur, insbesondere durch Programme wie den CHIPS and Science Act für Halbleiterfabriken und nationale Quantenzentren.⁴¹ Relevante technologische Standards werden derzeit überwiegend außerhalb Europas gesetzt – insbesondere durch US-basierte Organisationen wie die Internet Engineering Task Force (IETF), die Object Management Group (OMG) oder das World Wide Web Consortium (W3C).⁴²

In Deutschland zeigt sich die Infrastruktur zweigeteilt: Während digitale Netze (Breitband, 5G) im europäischen Vergleich weiterhin ausbaufähig sind und insbesondere ländliche Regionen unterversorgt bleiben, besitzt das Land eine robuste physische Infrastruktur für Forschung, Entwicklung und Produktion.⁴³ Einrichtungen wie das Munich Quantum Valley,⁴⁴ das Cyber Valley Tübingen⁴⁵ und das Deutsche Zentrum Mobilität der Zukunft⁴⁶ ermöglichen praxisnahe Forschung und Tests. Die industrielle Produktionsinfrastruktur bietet ebenfalls starkes Potenzial – vor allem in Bereichen wie Maschinenbau, Automobilproduktion oder Chemie, die besonders attraktive Anknüpfungspunkte für Deep-Tech-Unternehmen darstellen. Allerdings erschweren unübersichtliche Strukturen und Redundanzen eine effektive Nutzung der vorhandenen Infrastruktur. Zudem bestehen weiterhin Lücken in strategischen Produktionsbereichen wie Halbleiterfertigung oder Batteriezellproduktion, was eine Skalierung erschwert und Unternehmen oft zur Produktion ins Ausland zwingt.

Gleichzeitig prägt der deutsche und europäische Ordnungsrahmen maßgeblich, wie wirksam technologische Infrastrukturen und Ökosysteme derzeit agieren

können. Deutschland steht international für besonders hohe regulatorische Standards – eine Stärke, da „Made in Germany“-Technologien weltweit großes Vertrauen genießen. Allerdings erschweren langwierige Genehmigungsverfahren, bürokratische Anforderungen und uneinheitliche föderale Landesregelungen den Aufbau dringend benötigter Infrastruktur wie Testzentren oder Produktionsanlagen erheblich. Positiv hervorzuheben sind aktuelle politische Initiativen, um diese regulatorischen Hürden gezielt zu adressieren – etwa das angekündigte Forschungsdatengesetz⁴⁷ oder die Förderung von Zukunftstechnologien wie der Gentherapie.⁴⁸

3. Bildung und Fachkräfte. Deep Tech erfordert hochqualifizierte Fachkräfte – von KI-Experten über Quantenphysiker bis hin zu Bioinformatikern. Deutschland sieht sich hier mit einem strukturellen Fachkräftemangel konfrontiert, welcher am Bereich IT veranschaulicht werden kann: Ende 2023 waren laut Bitkom rund 149.000 IT-Stellen unbesetzt – ein neuer Höchststand.⁴⁹ Diese Lücke hat sich in den letzten Jahren trotz höherer Absolventenzahlen vergrößert (2017 waren es rund 55.000, 2020 etwa 86.000). Prognosen zufolge könnte bis 2040 ein Fehlbestand von über 600.000 IT-Fachkräften entstehen, wenn gegensteuernde Maßnahmen ausbleiben.⁵⁰ Analog verzeichnet die Halbleiterbranche eine ebenso dramatische Lücke: Im Jahresdurchschnitt fehlten im Zeitraum 2021/22 rund 62.000 qualifizierte Fachkräfte⁵¹.

Der Fachkräftemangel betrifft ebenso Naturwissenschaftler, Ingenieure und Techniker mit Spezialisierung auf Robotik. Ein entscheidender Grund hierfür ist, dass Deutschland zwar hochqualifizierte Fachkräfte ausbildet, viele dieser Talente jedoch ins Ausland abwandern. Zudem bestehen im inländischen Ausbildungssystem strukturelle Ungleichgewichte: So sind Frauen im Tech-Sektor weiterhin deutlich unterrepräsentiert – nur rund 20 % der Studierenden und lediglich 10 % der Auszubildenden im Bereich Informatik sind weiblich.⁵² Darüber hinaus fehlt es an flächendeckenden studienbegleitenden Angeboten für eine Entrepreneurship-Ausbildung sowie an interdisziplinären Studiengängen, die für zukünftige Deep-Tech-Talente – beispielsweise im Bereich der Quantentechnologien – von zentraler Bedeutung sind.

⁴⁰ SCMP (2023).

⁴¹ United States Congress (2022).

⁴² EC (2024b).

⁴³ BDI (2024e).

⁴⁴ MQV (2025).

⁴⁵ Universität Tübingen (2025).

⁴⁶ Bundesministerium für Verkehr, BMV (2025).

⁴⁷ Bundesregierung (2025a).

⁴⁸ Bundesregierung (2025a).

⁴⁹ Bitkom (2023).

⁵⁰ Bitkom (2024).

⁵¹ ZVEI (2023c).

⁵² Bitkom (2024).

Neben der nationalen Ausbildung von Fachkräften bleibt auch das Potenzial von Zuwanderungsinitiativen bislang nur unzureichend erschlossen. Die Reform des Fachkräfteeinwanderungsgesetzes mit der Einführung einer Chancenkarte⁵³ und abgesenkten Gehaltsgrenzen bei der Blue Card EU⁵⁴ sind positive Schritte – jedoch nur ein Anfang. Vergleicht man diese Ausgangslage mit der internationalen Konkurrenz, fällt auf: in Ländern wie den USA und Kanada wird bereits seit Jahrzehnten aktiv und effektiv um hochqualifizierte Tech-Talente geworben.

Nicht nur die aktive Anwerbung sowie die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften sind zentral für den nachhaltigen Erfolg von Deep-Tech-Innovationen – auch die gesellschaftliche Akzeptanz und eine breite Aufklärung spielen dabei eine entscheidende Rolle. Der Begriff „Deep Tech“ ist in Deutschland noch neu und hauptsächlich in Fachkreisen bekannt, während in der breiten Öffentlichkeit oft ein klares Verständnis für die Chancen und Potenziale dieser Technologien fehlt. Themen wie KI, Biotechnologie oder Quantentechnologie erhalten zwar Aufmerksamkeit, doch häufig dominieren Risiken und Sorgen die Debatte. Länder wie die USA oder Südkorea zeigen hingegen, wie eine positive gesellschaftliche Haltung die technologische Innovation und Wertschöpfung entscheidend vorantreibt. Erste Schritte in Deutschland sind getan: Initiativen wie die „Deep Tech Berlin“-Kampagne und der Deep Tech Award erhöhen bereits heute die öffentliche Sichtbarkeit von Deep-Tech-Innovationen.⁵⁵

4. Technologietransfer und -skalierung. Damit ein Land nachhaltig von Deep Tech Innovationen profitieren und technologische Souveränität sichern kann, ist der Transfer von wissenschaftlichen Forschungsergebnissen in die Wirtschaft zur Umsetzung kommerzieller Anwendungen entscheidend.

Als globaler Vorreiter, setzen die USA seit Jahrzehnten auf eine erfolgreiche Transferstrategie, gestützt durch Rahmenbedingungen wie den Bayh-Dole Act, der Universitäten ermöglicht, öffentlich finanzierte Forschungsergebnisse eigenständig zu patentieren und kommerziell zu verwerten.^{56,57}

In China erfolgt der Technologietransfer top-down und ist eng mit staatlichen Science-Parks verbunden, in denen Forschung und Industrie räumlich und organisatorisch verzahnt werden. Israel ist ebenfalls erfolgreich im Technologietransfer – insbesondere durch unternehmerisch ausgerichtete Technologietransfer-Offices (TTOs), die aktiv an Spin-offs beteiligt sind, etwa durch finanzielle Beteiligungen oder durch Unterstützung bei Gründung, Geschäftsmodellierung und IP⁵⁸-Strategie.⁵⁹

Deutschland verfügt über exzellente Forschungsinstitute und Universitäten, allerdings gelingt der Transfer in wirtschaftliche Anwendungen oft nicht optimal. Das Phänomen des „German Paradox“ wird in diesem Zusammenhang häufig zitiert:⁶⁰ viel Erfindung, vergleichsweise wenig Markterfolg. Trotz zahlreicher Initiativen wie EXIST (Existenzgründungen aus der Wissenschaft) und SPRIND (Bundesagentur für Sprunginnovationen) oder regionaler Innovationscluster wie das Cyber Valley Tübingen⁶¹, das Munich Quantum Valley⁶², das Quantum Valley Lower Saxony⁶³ oder Berlin Quantum⁶⁴ scheitert der Technologietransfer in Deutschland oftmals an strukturellen und kulturellen Hürden. Dazu gehören sowohl komplexe Lizenzierungsverfahren, die es zu bewältigen gilt⁶⁵, als auch ein akademisches Anreizsystem, das bisher überwiegend auf wissenschaftliche Publikationen ausgerichtet ist und den Transfer von Forschungsergebnissen in die wirtschaftliche Praxis wenig honoriert.⁶⁶

5. Kooperation. Bei Deep-Tech-Technologien ist effektive Kooperation zwischen verschiedenen Akteuren von zentraler Bedeutung, da die typischerweise hohen Investitions- und Innovationsaufwände es einzelnen Akteuren kaum ermöglichen, diese Technologien eigenständig bis zur Marktreife zu führen und das damit verbundene Risiko allein zu tragen. Daher ist die Zusammenarbeit sowohl zwischen Akteuren innerhalb eines Landes als auch international von Bedeutung.

Innerhalb Deutschlands ist eine enge Vernetzung von Wissenschaft, Industrie und öffentlichem Sektor essenziell, um Synergien zu nutzen und Forschungsergebnisse effektiv umzusetzen. Beispiele hierfür sind die bereits genannten Innovationscluster, in denen Hoch-

⁵³ Bundesministerium für Arbeit und Soziales, BMAS (2023).

⁵⁴ Bundesregierung (2023).

⁵⁵ Deep Tech Berlin (2025).

⁵⁶ United States Patent and Trademark Office, USPTO (2025).

⁵⁷ Harvard Gazette (2025).

⁵⁸ IP (Intellectual Property / Geistiges Eigentum)

⁵⁹ YEDA TTO (2025).

⁶⁰ AA/Fazit GmbH (2025).

⁶¹ Universität Tübingen (2025).

⁶² MQV (2025).

⁶³ QVLS (2025).

⁶⁴ Berlin Quantum (2025).

⁶⁵ MÜNCHNER KREIS (2024).

⁶⁶ Fraunhofer ISI (2025).

schulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen eng kooperieren. Weiterhin besteht erhebliches Potenzial, die fragmentierten Cluster stärker strategisch zu koordinieren und über Bundesländergrenzen hinweg zu konsolidieren. Dadurch könnten Investitionen gezielter kanalisiert, strukturelle Redundanzen abgebaut und gemeinsame Infrastrukturen sowie Talente effizienter genutzt werden.

Auf europäischer Ebene wird verstärkt auf transnationale Innovationsnetzwerke wie die Knowledge and Innovation Communities (KICs)⁶⁷ des European Institute of Innovation & Technology (EIT) gesetzt, um eine bessere Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Industrie zu ermöglichen. Ein weiteres erfolgreiches Beispiel ist die DeepTech Alliance – eine Plattform, die europaweit Unternehmer, Investoren und Märkte miteinander vernetzt und gezielt Deep-Tech-Innovationen fördert.⁶⁸ Solche Allianzen tragen maßgeblich dazu bei, technologische Innovationen schneller marktfähig zu machen und die Wettbewerbsfähigkeit Europas im globalen Kontext nachhaltig zu stärken.

6. Innovation, Forschung und Entwicklung.

Deep-Tech-Technologien benötigen per Definition langfristige und gezielte Unterstützung inklusive umfangreicher Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsprojekte, um ihre Potenziale voll entfalten zu können. Um dies zu ermöglichen, existieren international unterschiedliche Ansätze: In den USA dominieren Investitionen privater Risikokapitalgeber die Finanzierung des Innovationsgeschehens. Ergänzt werden diese durch umfangreiche staatliche Forschungs- und Entwicklungsaufträge, etwa durch Programme wie SBIR (Small Business Innovation Research)/STTR (Small Business Technology Transfer) oder spezialisierte Einrichtungen im Sicherheitsbereich wie In-Q-Tel.⁶⁹ Zudem werden Innovationen durch flexible und pragmatische Regulierungspolitik mit Regulatory Sandboxes (regulatorische Experimentierräume) und durch beschleunigte Zulassungsverfahren gefördert.

China verfolgt einen anderen Ansatz und setzt auf massive staatliche Förderprogramme wie strategische Leitfonds (z. B. 44 Mrd. € für Halbleiter), um gezielt

Schlüsselindustrien zu stärken.⁷⁰ Israel wiederum hat mit seinem Yozma-Programm erfolgreich staatliche und private Venture-Capital-Mittel kombiniert.⁷¹

Europa verfolgt mit Programmen wie der European Tech Champions Initiative (ETCI)⁷², dem European Innovation Council⁷³ und der TechEU-Initiative⁷⁴ eine integrierte Förderpolitik, die paneuropäische Wachstumsfonds stärken soll, um die europäische Innovationskraft gegenüber den USA und Asien zu erhöhen. Zudem wird derzeit eine ausgewogenere und innovationsfreundlichere Regulierungspolitik vorangetrieben – beispielsweise durch die Better Regulation Agenda oder die EU-weite Verpflichtung zu Regulatory Sandboxes im Bereich KI gemäß EU AI Act.^{75,76} Allerdings erschweren regulatorische Fragmentierung und das Fehlen einer vollständig integrierten Kapitalmarktunion die Entwicklung sehr kapitalintensiver Forschungs- und Innovationsverfahren, wie sie bei Deep-Tech-Technologien benötigt werden, erheblich.⁷⁷

Mit Blick auf die monetäre Förderung von Forschungsprojekten zeigt sich in Deutschland eine vielschichtige Förderlandschaft, die von der Frühphase bis zur Skalierungsphase reicht. Erfolgreiche Programme wie das EXIST-Gründerstipendium oder der High-Tech Gründerfonds (HTGF) sichern wichtige Frühphasenfinanzierungen.⁷⁸ Für die Wachstumsphase wurde mit dem Zukunftsfonds – insbesondere dem Zukunftsfonds I (ERP/Zukunftsfonds-Wachstumsfazilität) – ein weiteres Instrument geschaffen, das speziell Wachstumsfinanzierungen ermöglichen und bestehende Finanzierungslücken adressieren soll.⁷⁹ Allerdings bleibt die Spitze des Funding-Funnels verbesserungswürdig: Bei Spätphasenfinanzierungen (> 50 Mio. €) sind deutsche Start-ups weiterhin stark auf ausländische Investoren angewiesen; im Scale-up-Bereich war der US-VC-Markt zwischen 2019 und 2023 gemessen am Bruttoinlandsprodukt 3,7-mal so groß wie der deutsche.⁸⁰ Der Zukunftsfonds adressiert dieses Problem, befindet sich jedoch erst im Aufbau – ob er die Lücke schließen kann, muss sich zeigen.⁸¹ Zudem sorgen Komplexität und Fragmentierung der Programme regelmäßig für Kritik, da sie insbesondere kleinere Unternehmen vor bürokratische Herausforderungen stellen.

⁶⁷ EIT (2025).

⁶⁸ Deep Tech Alliance (2025).

⁶⁹ Organisation for Economic Co-operation and Development, Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, OECD (2025).

⁷⁰ Wall Street Journal (2024).

⁷¹ OECD (2025).

⁷² OECD (2025).

⁷³ EIC (2025b).

⁷⁴ EIB (2025).

⁷⁵ Die Verpflichtung zu Regulatory Sandboxes wird grundlegend als innovationsfördernd wahrgenommen. Es sollte jedoch insbesondere bei anderen Bestimmungen des EU AI Act auf eine innovationsfreundliche und praxisnahe Auslegung des Rechtstextes geachtet werden, um eine übermäßige Belastung der Kapazitäten, vor allem kleiner und mittlerer Unternehmen (KMUs), zu vermeiden. Zur vertiefenden Einschätzung des BDI bezüglich des EU AI Act siehe auch: *Simplifying the EU's Digital Rulebook* (15.07.2025).

⁷⁶ FLI (2025).

⁷⁷ MÜNCHNER KREIS (2024).

⁷⁸ OECD (2022).

2.3. Technologische Fokusfelder

Im Folgenden werden die vier ausgewählten Technologiefelder – KI, (KI-basierte) Robotik, Quantentechnologien sowie mRNA-Medikamente und Gen- und Zelltherapien – vertiefend behandelt. Jedes Kapitel beginnt mit einer Einführung in das jeweilige Themenfeld, bietet anschließend eine fundierte Bestandsaufnahme zur aktuellen Position Deutschlands im internationalen Wettbewerb und leitet daraus konkrete Handlungsempfehlungen ab, die für eine führende technologische Positionierung Deutschlands erforderlich sind.

Unsere Handlungsempfehlungen adressieren drei zentrale Akteursgruppen, deren enge Zusammenarbeit essenziell ist, um die vorgeschlagenen Maßnahmen erfolgreich umzusetzen.

- **Politik:** Konkret spricht die vorliegende Studie vor allem die aktuelle Bundesregierung und Koalition an. Daneben sind auch föderale und europäische Akteure angesprochen, da Abstimmung und Kooperation auf mehreren politischen Ebenen erforderlich sind.
- **Unternehmen und Verbände:** Diese Gruppe umfasst wirtschaftliche Akteure, insbesondere Industrieunternehmen, kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs), Start-ups sowie Branchen- und Wirtschaftsverbände.
- **Wissenschaft und Innovationsakteure:** Gemeint sind hier primär Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Der Begriff „Innovationsakteure“ bezeichnet dabei konkret jene Einrichtungen, deren Kernaufgabe die Generierung und Förderung neuer technologischer Innovationen ist. Dies schließt keineswegs aus, dass etablierte Unternehmen ebenfalls Innovationen vorantreiben können – vielmehr beschreibt es gezielt Organisationen, deren primärer Zweck Forschung und Innovationsentwicklung ist.

Je nach Handlungsempfehlung können die Akteursgruppen – Politik, Unternehmen und Verbände sowie Wissenschaft und Innovationsakteure – unterschiedliche Rollen einnehmen und einzeln oder gemeinsam auftreten. Beispielsweise kann die Politik durch strategische Zielsetzungen und regulatorische Rahmenbedingungen entscheidende Impulse geben. Für deren konkrete Umsetzung und erfolgreiche Skalierung ist jedoch oftmals die wirtschaftliche Zugkraft von Unternehmen und Verbänden erforderlich.

⁷⁹ Zukunftsfonds (2025).

⁸⁰ KfW (2024).

⁸¹ Bundesfinanzministerium, BMF (2025).



3. Künstliche Intelligenz: Wertschöpfung durch konse- quente Anwendung in Politik und Wirtschaft erzeugen

3.1. Executive Summary und Kernbotschaften für Künstliche Intelligenz (KI)

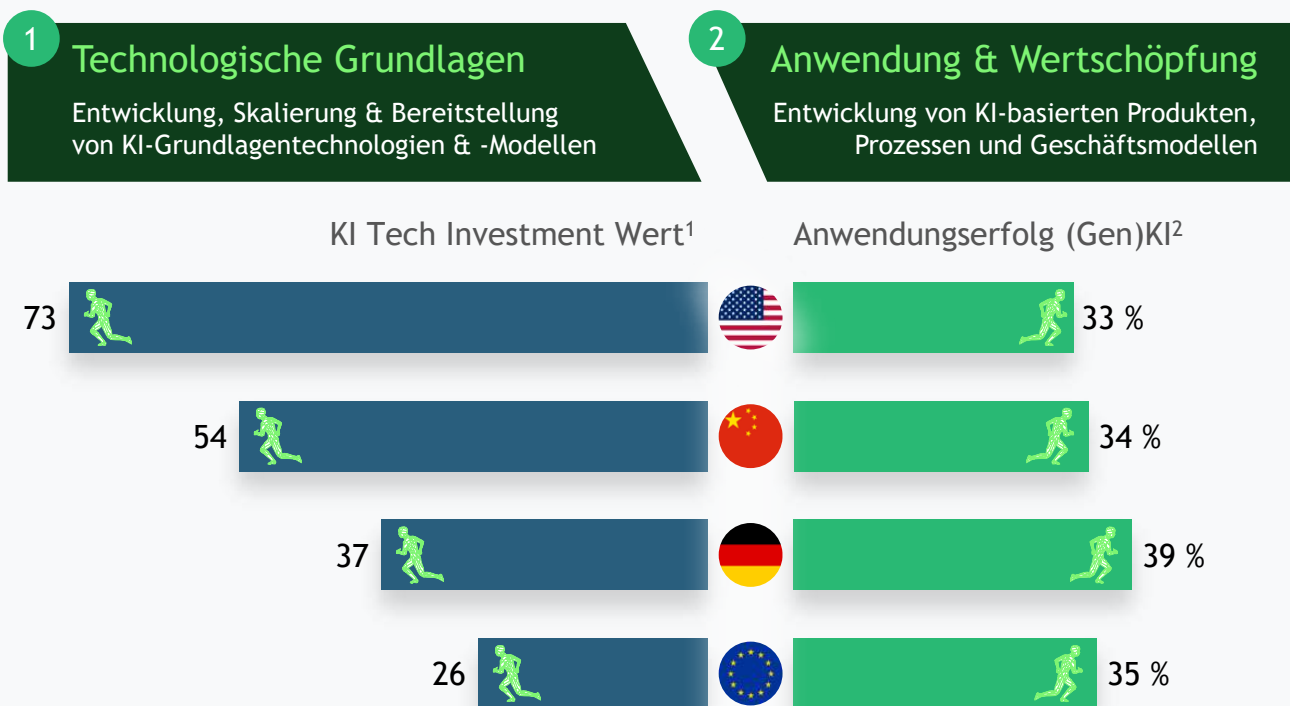
Künstliche Intelligenz (KI) ist seit Jahrzehnten nicht mehr nur Deep Tech in einer frühen Forschungsphase, sondern längst fester Bestandteil des Alltags. Zahlreiche Teilgebiete – etwa Maschinelles Lernen (ML), Deep Learning (DL) und Generative KI (GenKI) – haben weit verbreitete und wertschöpfende Anwendungen, die sowohl das tägliche Leben als auch zentrale Unternehmensprozesse prägen: von der optimierten Produktionslinie über das hochautomatisierte Fahrerassistenzsystem bis hin zum GenKI-Chatbot auf mobilen Endgeräten.

Zugleich bleibt die KI Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung. Entscheidende Meilensteine wie Artificial General Intelligence (AGI) und Artificial Super Intelligence (ASI) sind weiterhin mit erheblicher technologischer Unsicherheit und voraussichtlich langen Entwicklungszeiten verbunden und daher klar als Deep Tech zu verstehen. Der Übergang zwischen solcher Deep-Tech-KI und marktreifen KI-Technologien ist fließend – und die Fähigkeiten marktreifer Systeme entwickeln sich in hohem Tempo weiter.

Aus dieser Dynamik ergeben sich zwei parallele Rennen im internationalen Wettbewerb, in die Deutschland eingebunden ist (vgl. Abb. 7). Das erste betrifft die Entwicklung, Skalierung und Bereitstellung grundlegender KI-Technologien und -Modelle. Hier haben Deutschland und die EU einen deutlichen Rückstand gegenüber Hyperscalern und anderen KI-Pionieren aus den USA und China.

Das zweite Rennen betrifft die Entwicklung und Umsetzung von Produkten, Prozessen und Geschäftsmodellen auf Basis bestehender KI-Spitzen-technologien. In diesem auf Anwendung und Wertschöpfung ausgerichteten Wettbewerb liegt Deutschland international auf Augenhöhe mit führenden Nationen – und ist in einzelnen Bereichen sogar Vorreiter.

ABBILDUNG 7 | Zwei KI-Rennen, zwei Ergebnisse – mit strategischen Konsequenzen für Deutschland



1. Setzt sich zusammen aus gewichteten nationalen Werten zu AI-Unicorns, Marktkapitalisierung von IT-/Tech-Unternehmen im Verhältnis zum BIP, Finanzierung von KI-Firmen, Wert des Handels mit ICT-Gütern und -Dienstleistungen (pro Kopf), Softwareausgaben, Vorhandensein von Venture-Capital. Skala von 0 bis 100 (Quelle: BCG AI Maturity Matrix, Nov. 2024) 2. Zufriedenheit von Organisationen mit dem ROI von KI-/GenKI-Initiativen. Grundlage ist eine Befragung von n ≥ 1.800 C-Level Executives zur Frage „Satisfaction with returns from (Gen)AI?“ Als "zufrieden" gewertet wurden die Antworten "completely satisfied" und "mostly satisfied" (Quelle: BCG AI Radar, Jan. 2025)

Aus dieser Ausgangslage ergibt sich eine klare Strategie: Im ersten Rennen ist ein generelles Aufholen kaum realistisch. Deutschland sollte sich in der Technologieentwicklung auf strategisch relevante Felder wie „Industrielle KI“ konzentrieren, in denen der Wettbewerb noch offen ist – etwa bei der Entwicklung von „Large Industry Models“ mit spezifischen industriellen Anwendungsfällen. Das deutlich größere wirtschaftliche Potenzial liegt jedoch im zweiten Rennen. Hier bietet sich die einzigartige Chance, bestehende Stärken auszubauen und neue Kompetenzen zu entwickeln – und so eine langfristig führende Position zu sichern.

Unternehmen, die frühzeitig in die Entwicklung und Umsetzung KI-basierter Anwendungen und Prozesse investieren sowie zugleich deren konsequente Integration im gesamten Unternehmen sicherstellen, können den Wert ihrer Investitionen erheblich steigern. Denn nur wenn KI sowohl technisch sinnvoll implementiert als auch organisatorisch fest verankert wird, lässt sich das volle wirtschaftliche Potenzial ausschöpfen.

Die Bundesregierung hat das strategische Potenzial von KI erkannt und mit der im Juli 2025 verabschiedeten Hightech Agenda Deutschland erste wichtige Schritte definiert. Sie verfolgt das Ziel, bis 2030 10 % der deutschen Wirtschaftsleistung KI-basiert zu erwirtschaften⁸² und Deutschland international als führenden KI-Standort zu etablieren.

Dieser Auftakt sollte Ausgangspunkt für weitere gezielte Maßnahmen sein. Nur durch konsequentes Handeln lassen sich die erheblichen Wertpotenziale der KI realisieren und Deutschlands Position im globalen Wettbewerb dauerhaft stärken.

Die vorliegende Studie erarbeitet für diese nächste Phase eine Reihe technologiespezifischer Handlungsempfehlungen (vgl. Abb. 14). Aus diesen detaillierten Empfehlungen ergeben sich **vier strategische Prioritäten für Deutschland**.

⁸² BMFTR (2025a).

ABBILDUNG 8 | Vier Kernprioritäten für Deutschlands Zukunft im Bereich KI



Quelle: BCG-Analyse

1. Breite Anwendung von KI in staatlichen Stellen vorantreiben: Die Integration von KI-Technologien in Behörden und öffentliche Dienstleistungen sollte aktiv auf Basis eines „AI-First“-Ansatzes vorangetrieben werden. Gezielte Initiativen und umfassende Pilotprojekte sind notwendig, um Verwaltungsprozesse effizienter zu gestalten und Bürokratie abzubauen.

2. Wirtschaft konsequent KI-zentriert neugestalten: Unternehmen sollten Produkte, Services und Prozesse nicht nur durch punktuellen KI-Einsatz optimieren, sondern konsequent KI-basiert neu gestalten – unter anderem mit dem Ziel, Effizienz deutlich zu steigern und neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten zu erschließen.

3. KI-Kompetenz- und -Akzeptanz durch nationale Bildungsinitiative stärken: KI-Kompetenzen sollten in Wirtschaft und Gesellschaft weiter verbreitet werden, etwa durch praxisnahe Programme in Schulen und Weiterbildungseinrichtungen. Ergänzend kann die Kommunikation verständlicher und überzeugender Zielbilder (z. B. bis 2030) dazu beitragen, Orientierung zu bieten und gesellschaftliche Ängste abzubauen.

4. Ausbau souveräner KI-Infrastrukturen: Mit Investitionen in Rechenzentren und Hochleistungsrechner, KI-Gigafabriken, Energieinfrastruktur, Open-Source-Lösungen und die europäische Produktion kritischer Komponenten sollten Deutschland und die EU strategische Abhängigkeiten verringern und langfristig ihre technologische Unabhängigkeit stärken.

3.2. Definition, Reifegrad und strategische Relevanz

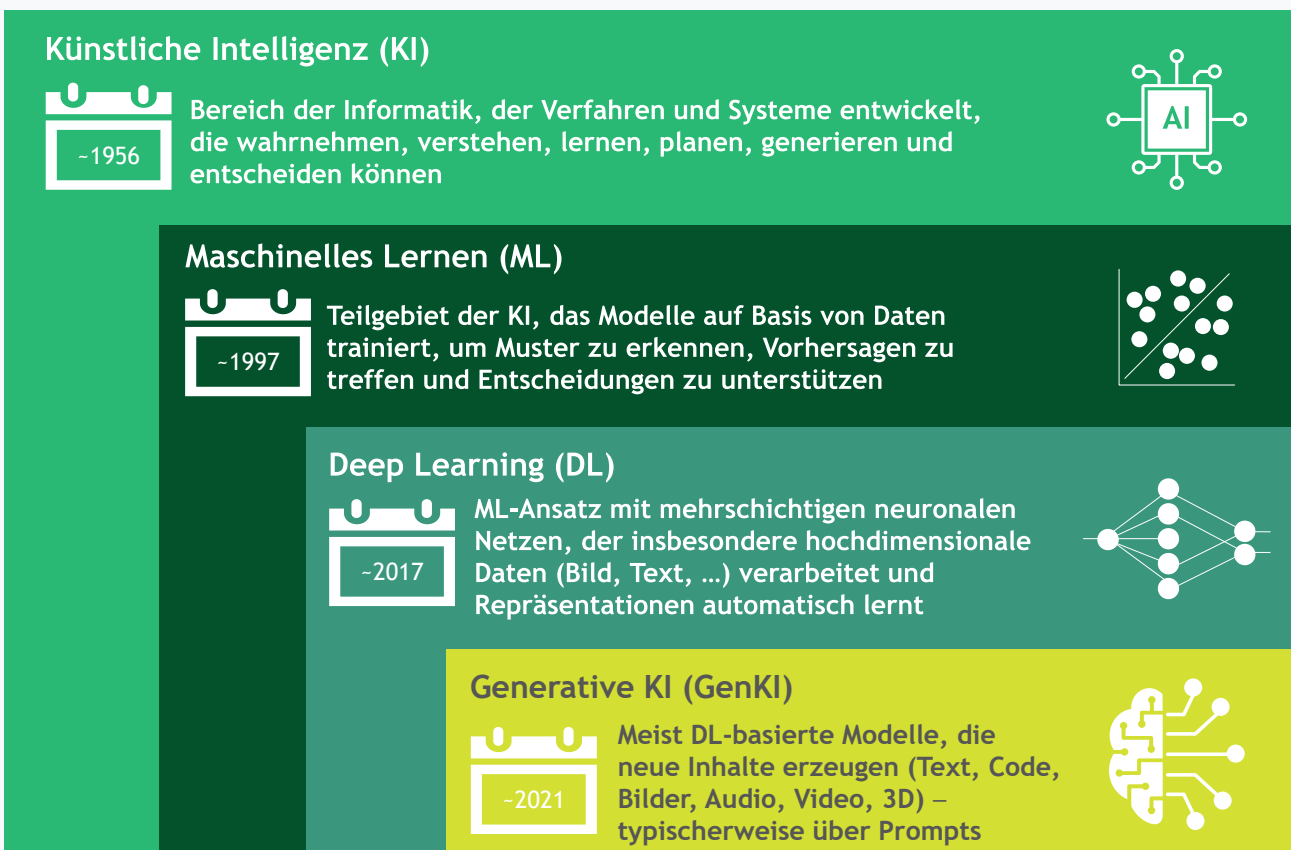
Definition und Reifegrad

Künstliche Intelligenz (KI) ist der Bereich der Informatik, der Verfahren und Systeme entwickelt, die wahrnehmen, verstehen, lernen, planen, generieren und entscheiden können. Historisch betrachtet war dabei generell das Ziel, menschliche Intelligenz in eng umrissenen Aufgaben zu imitieren oder zu übertreffen.

KI ist dabei ein Oberbegriff für alle Methoden zur Realisierung intelligenter Funktionen, der eine Vielzahl von Teilgebieten für spezialisierte Anwendungen umfasst (vgl. Abb. 9). Dazu gehören unter anderem:

- **Maschinelles Lernen (ML):** Teilgebiet der KI, das Modelle auf Basis von Daten trainiert, um Muster zu erkennen, Vorhersagen zu treffen und Entscheidungen zu unterstützen.
- **Deep Learning (DL):** ML-Ansatz mit mehrschichtigen neuronalen Netzen, der insbesondere hochdimensionale Daten (Bild, Text, Audio, Zeitreihen, Sensordaten) verarbeitet und Repräsentationen automatisch lernt.
- **Generative KI (GenKI):** Meist DL-basierte Modelle, die neue Inhalte erzeugen (Text, Code, Bilder, Audio, Video, 3D) – typischerweise über Prompts und häufig als vortrainierte Grundmodelle („Foundation Models“).

ABBILDUNG 9 | Teilbereiche der künstlichen Intelligenz im Überblick

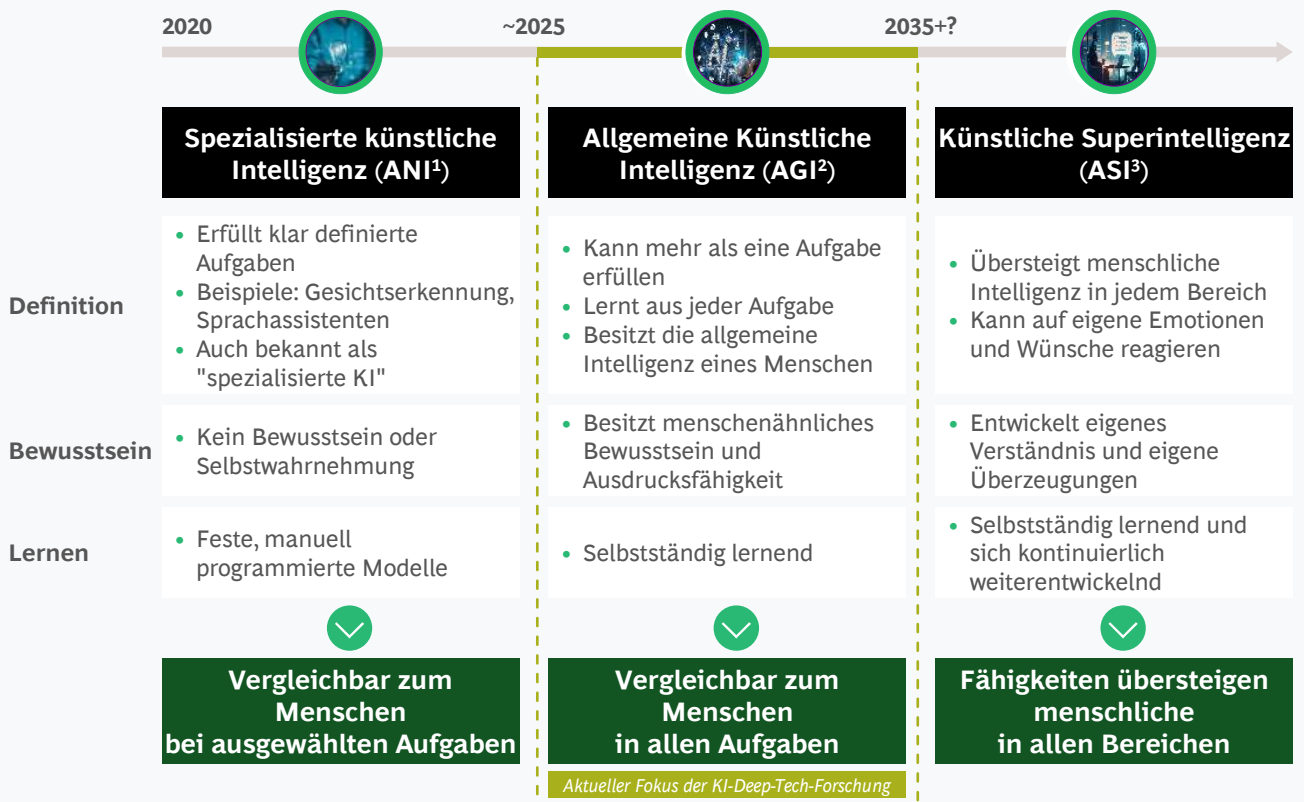


Quelle: MÜNCHNER KREIS (2024); BCG-Analyse

KI und die genannten Teilgebiete sind dabei schon seit Jahren (bzw. Jahrzehnten – vgl. Abb. 9) nicht mehr nur Deep-Tech-Forschung, sondern fester Bestandteil unseres Alltags und der Unternehmenspraxis, mit zahlreichen marktreifen und etablierten Anwendungen in Industrie und Gesellschaft.

Trotz hoher Marktreife vieler KI-Anwendungen und -Methoden bleibt KI gleichzeitig ein dynamisches Forschungsfeld. Meilensteine wie Artificial General Intelligence (AGI) – Systeme mit breiter, domänenübergreifender Problemlösefähigkeit – und Artificial Super Intelligence (ASI) – Systeme, die den Menschen in fast allen kognitiven Dimensionen übertreffen – sind weiterhin mit erheblicher technologischer Unsicherheit und (voraussichtlich) langen Entwicklungszeiten verbunden und daher klar als Deep Tech zu verstehen (vgl. Abb. 10).

ABBILDUNG 10 | Allgemeine Künstliche Intelligenz (AGI) – der nächste große Meilenstein der KI-Deep-Tech-Forschung



1. Artificial Narrow Intelligence (ANI) 2. Artificial General Intelligence (AGI) 3. Artificial Super Intelligence (ASI)
Quelle: BCG

Der Übergang zwischen Grundlagenforschung und Marktanwendung ist dabei fließend. Ergebnisse aus der Forschung finden kontinuierlich ihren Weg in marktreife Modelle. Umgekehrt liefern produktive Systeme Daten, Anforderungen sowie Betriebserfahrungen, die neue Initiativen für Forschung und Entwicklung anstoßen.

Wichtig ist, dass sich diese Weiterentwicklung über das gesamte Spektrum der KI erstreckt – einschließlich Maschinellem Lernen (ML), Deep Learning (DL) und Generativer KI (GenKI). Derzeit liegen Fokus und Dynamik der Forschung jedoch besonders auf der GenKI. Das hat mehrere, miteinander verknüpfte Gründe:

- Große vortrainierte Modelle folgen beobachtbaren Skalierungseffekten, sodass zusätzliche Daten, Parameter und Rechenleistung häufig verlässlich zu Leistungsgewinnen über viele Aufgaben führen.
- Die Interaktion über Sprache, Code und zunehmend multimodale Prompts wirkt als universelle, niedrighschwellige Schnittstelle. Forschungsergebnisse sind dadurch schnell experimentier- und produktisierbar, ohne dass spezielle Benutzerschnittstellen erforderlich sind.
- GenKI erzeugt verwertbare Artefakte – Texte, Bilder, Code, Videos – und adressiert horizontale Produktivitätsfälle in nahezu allen Funktionen eines Unternehmens, was Finanzierung, Adaption und die Lernschleife zwischen Labor und Markt stark beschleunigt.
- Ein dynamisches und zugängliches Ökosystem mit einer wachsenden Anzahl an offenen und proprietären Modellen senkt die Eintrittsbarrieren, während Effizienztechniken die Kosten der Inferenz kontinuierlich reduzieren.

- Durch „Retrieval-Augmented Generation“ (RAG)⁸³ und Werkzeugnutzung verschiebt sich GenKI zudem vom reinen „Erzeugen“ in Richtung Planen und Handeln („Agentisierung“), was ihren praktischen Nutzen und wirtschaftlichen Hebel nochmals steigert.

Diese Dynamik schwächt die Bedeutung der „klassischen“ Pfeiler ML und DL nicht, vielmehr ergänzen sie GenKI. Prädiktive ML-Modelle auf strukturierten Daten bleiben in vielen gesellschaftlichen und industriellen Anwendungen hochrelevant und entwickeln sich kontinuierlich weiter. DL-basierte Perzeption ist zugleich unerlässlich, um robuste Signale aus der physischen Welt zu gewinnen. GenKI verbindet, erklärt und operationalisiert diese ML- und DL-Fähigkeiten. Insgesamt entsteht eine eng verzahnte Entwicklungslinie der Teilgebiete, in der Fortschritte in einem Bereich den anderen zugutekommen.

An der Forschungsfront der Deep-Tech-KI zeichnet sich eine Vielzahl aktueller Schwerpunkte ab, in denen in den kommenden fünf Jahren signifikante Fortschritte erwartet werden. Diese lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien einteilen: Zum einen die anwendungsorientierte Forschung, die neue Produkte, Services und Geschäftsmodelle auf Basis von KI erforscht. Zum anderen die grundlagenorientierte Forschung, die die Basistechnologien – etwa Algorithmen, Modelle und Rechenarchitekturen – weiterentwickelt und damit die Voraussetzung für künftige Sprünge in Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit schafft (vgl. Abb. 11 und 12).

⁸³ Retrieval Augmentation Generation bezeichnet einen Ansatz, der Large Language Models (LLMs) Zugriff auf zusätzliches Wissen – etwa organisatorische Daten – ermöglicht.

ABBILDUNG 11 | Fokusbereiche in der anwendungsorientierten KI-Forschung und -Entwicklung

Bereich	Details	Exemplarisch
Agentische ("AI-First") Unternehmensprozesse	KI plant mehrstufige Aufgaben, ruft Tools/APIs auf und arbeitet mit Menschen im Loop; KI koordiniert Aufgaben über ERP/CRM/PLM/ITSM hinweg (z. B. automatische Monatsabschlüsse, Materialumplanung, Patch-Management)	
Wissensintensive Domänen	Spezialisierte KI in Recht, Medizin, Life Sciences (inkl. Erklärbarkeit, Haftung, Auditierbarkeit)	
Large Industry Models (LIMs)	Spezialisierte Modelle mit neuen Input-/Output-Modalitäten für industrielle KI-Anwendungen (z.B. Robotiksteuerung – vgl. auch Kapitel Robotik)	
Multimodale Assistenten	Recherche-, Compliance-, Vertriebs- und Service-Co-Piloten, die Text, Tabellen, Bild, Audio und Video nativ verarbeiten	
Edge-/On-Device-KI	Sprach- und Vision-Modelle in Fahrzeugen, Maschinen, Wearables und medizinischen Geräten – für Latenz, Verfügbarkeit und Datenschutz	
KI-gestützte Kreativ- und Engineering-Workflows	Co-Design in CAD/EDA, Varianten-Generierung, automatische Tests/Spezifikationen	
Verlässliche KI	Robuste Sicherheit & Governance, Fairness, Beseitigung von Bias, Guardrails, Vertrauensschaffung und Interpretierbarkeit	
Autonomes Fahren	Fahrzeuge, die mittels Sensoren und KI-gestützter Entscheidungsfindung eigenständig ohne menschliche Steuerung fahren (L5)	

Quelle: Gartner Hype Cycle for AI 2024/2025; BCG-Analyse

ABBILDUNG 12 | Ausgewählte Fokusbereiche in der KI-Grundlagenforschung

Bereich	Details	Exemplarisch
Richtung AGI/ASI	Fortschritte beim Schlussfolgern ("Reasoning"), in der Planung, beim Gedächtnis, bei Tool-Use und in Multi-Agenten-Systemen	
Neuro-Symbolic AI	Hybride KI-Systeme, die neuronale Netze mit symbolischer Logik kombinieren, um Lernen mit regelbasiertem Schlussfolgern zu vereinen	
Multimodalität & Weltmodelle	Gemeinsames Lernen über Text, Bild, Audio, Video, Sensorik; Entwicklung von Modellen, die eine konsistente interne Repräsentation der Realität ermöglichen	
First Principles AI	KI-Systeme, die physikalische Gesetze und wissenschaftliche Grundprinzipien zur Modellierung und Vorhersage nutzen	
Neuromorphic Computing	Vom Gehirn inspirierte Rechnerarchitekturen, mit impulsbasierten neuronalen Netzwerken, für effiziente, stromsparende Berechnungen	
Kontexte & Speichermechanismen	Längere Kontexte, Langzeit-Gedächtnis ("Persistent Memory"), Segment-Attention, vektorbasierte Gedächtnisschichten	
Quantum Machine Learning	Einsatz von Quantencomputing zur Entwicklung neuer KI-Algorithmen (vgl. auch Kapitel Quantentechnologien)	
Selbstüberwachtes & effizientes Lernen	Entwicklung neuer Lernparadigmen, die mit weniger annotierten Daten, geringerer Rechenleistung und höherer Dateneffizienz auskommen (z.B. Self-Supervised Learning, Few-/Zero-Shot-Lernen, kontinuierliches & lebenslanges Lernen)	

Quelle: Gartner Hype Cycle for AI 2024/2025; BCG-Analyse

Strategische Relevanz

Die strategische Bedeutung von KI lässt sich entlang zweier paralleler, eng miteinander verknüpfter „Rennen“ im internationalen Wettbewerb fassen (vgl. Abb. 7)⁸⁴.

Das erste Rennen betrifft die Entwicklung, Skalierung und Bereitstellung grundlegender KI-Technologien und -Modelle – von Trainingskorpora über Grundlagenmodelle bis hin zu Spezialhardware, Tool-Ökosystemen und Betriebsverfahren. Plattformkontrolle und Skalenvorteile sind hier entscheidend für Technologieführerschaft: Wer leistungsfähige Grundmodelle, effiziente Trainings- und Inferenzverfahren, robuste Sicherheits- und Governance-Schichten sowie die zugehörige Infrastruktur bereitstellt, setzt de facto Standards und gestaltet nachgelagerte Märkte. Der ökonomische Wert entsteht über Lizenzen, API-Ökosysteme, vertikale Toolchains und die Möglichkeit, Feedbackschleifen aus Nutzungsdaten über viele Anwendungsfelder hinweg zu bündeln. Führung in diesem Rennen ist kapital-, talent- und infrastrukturintensiv und verlangt eine enge Verzahnung von Forschung, Datenzugang und Rechenressourcen.

Das zweite Rennen, auf das der größere kurzfristige wirtschaftliche Hebel entfällt, wird auf der Ebene der Anwendung entschieden. Hier geht es darum, Spitzentechnologien in marktwirksame Lösungen zu übersetzen, entlang realer Wertströme zu skalieren und gleichzeitig Qualität, Sicherheit und Compliance zu gewährleisten. Der direkte Nutzen zeigt sich in Produktivitätsgewinnen, Qualitäts- und Durchsatzsteigerungen sowie in neuen Produkten, Services und Geschäftsmodellen. Ein anschauliches Beispiel ist ein agentischer GenKI-Copilot, der Beschaffung, Produktion und Service verbindet: Er liest Zeichnungen und Spezifikationen, befragt Wissensbasen über Retrieval, simuliert Alternativen, stößt Bestellungen an, dokumentiert Entscheidungen revisionssicher und unterstützt den Außendienst vor Ort. Messbarer Wert entsteht in kürzeren Durchlaufzeiten, geringeren Fehlerquoten und höherer Kundenzufriedenheit. Anders als im Grundlagenrennen sind hier Domänenwissen, Prozessintegration, Datenqualität, Veränderungsfähigkeit und Governance die entscheidenden Faktoren – nicht allein der Besitz des „stärksten“ Modells. Dieses zweite Rennen gewinnt in vielen Ländern, auch in Deutschland, zusätzlich an Bedeutung angesichts des demografischen Wandels, zunehmender Fachkräftengpässe sowie wachsender Anforderungen an Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit der Industrie.^{85,86}

⁸⁴ BDI, BCG und IW (2024).

⁸⁵ MÜNCHNER KREIS (2025).

⁸⁶ BCG (2024b).

⁸⁷ BDI, BCG und IW (2024).

⁸⁸ BCG (2024b).

⁸⁹ Lakestar (2025).

In beiden Rennen lässt sich substanzielle Wertschöpfung erzielen, jedoch auf unterschiedliche Weise: Das Grundlagenrennen monetarisiert über Plattformen, IP und Standardsetzung; das Anwendungsrennen über operative Exzellenz, differenzierte Kundenerlebnisse und neue, KI-getriebene Angebote. Beide Dynamiken sind wechselseitig verbunden: Fortschritte in den Grundlagentechnologien senken Eintrittsbarrieren und beschleunigen das Anwendungsgeschäft; erfolgreiche Anwendungen finanzieren Forschung, liefern Evaluationsdaten und schärfen Anforderungen an die KI-Weiterentwicklung.

Sowohl die Entwicklung wie auch die Anwendung von KI haben zudem eine souveränitäts- und sicherheitsrelevante Dimension. KI ist von zentraler Bedeutung für Cyber- und Informationssicherheit, den Schutz kritischer Infrastrukturen, die Resilienz von Lieferketten, Analysefähigkeiten und weitere sicherheitskritische Felder. Abhängigkeiten von ausländischen Modellen, Datenräumen und Recheninfrastrukturen bergen daher sowohl technische als auch geopolitische Risiken. Um dem zu begegnen, sind wohldefinierte Kontrollpunkte in der Wertschöpfungskette essenziell – etwa verlässliche Zugänge zu Rechenleistung, kuratierte Datenräume mit klaren Nutzungsrechten, auditierbare Modelle und austauschbare Betriebsstacks, die auch in sicherheitskritischen Umgebungen tragfähig sind. Dies macht die Entwicklung eigener Kapazitäten von hoher strategischer Relevanz.^{87,88,89}

3.3. Anwendungsfelder und Marktpotenzial

Wie zuvor dargelegt, haben viele KI-Technologien den Übergang in die Breite längst vollzogen: Produktionsreife Modelle und verfügbare Plattformen ermöglichen stabile, skalierbare Anwendungen über Funktionen und Branchen hinweg. Unternehmen erzielen dabei unter anderem Nutzen durch Effizienz (Automatisierung, Kostensenkung) und Effektivität (Qualität, Geschwindigkeit, Personalisierung). Strategisch ist KI damit sowohl eine Querschnittstechnologie – in nahezu allen Geschäftsprozessen anwendbar – als auch ein Innovationsmotor für neue Produkte, Services und Geschäftsmodelle über Branchen hinweg.

Exemplarisch verdeutlichen folgende Anwendungen die Breite der Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Domänen:

- **Gesundheitswesen:** KI-Triagesysteme für Bildgebung; Spracherfassung und klinische Dokumentation; Assistenz bei Therapiepfaden.
- **Finanzdienstleistungen:** Betrugs- und Geldwäscheerkennung; Kreditrisiko-Scoring; Reconciliations; generative Kundenkommunikation und Recherche-Co-Piloten.
- **Industrie:** Zustandsüberwachung und Wartungsprognosen; adaptive Qualitätskontrolle; Auslastungsoptimierung von Produktionslinien.
- **Handel & Konsumgüter:** Nachfrage-Forecasting; Preis- und Promotion-Optimierung; automatisierte Content-Produktion (Produkttexte, Bilder).
- **IT:** Anomalieerkennung in Logs; GenKI-gestützte Incident-Analyse; Code-Assistenten für Entwicklung und Tests.
- **Öffentlicher Sektor & Bildung:** Aktenklassifikation; personalisierte Lernpfade; automatische Übersetzung; Verbesserung von Barrierefreiheit; Prozessautomatisierung und Bürokratieabbau.
- **Videospielindustrie:** NPC-Verhaltensmodelle und adaptive Schwierigkeitsanpassung; prozedurale Content-Generierung; realistische Sprach- und Bewegungs-Synthese für Charaktere; Automatisierte Qualitätssicherung und Testsimulationen.⁹⁰

Marktpotenzial

Das Marktpotenzial von KI-Technologien variiert je nach Einsatzbereich, etwa nach Funktion oder Branche in der Wirtschaft, und lässt sich aufgrund der hohen Dynamik bei der Entwicklung und Anwendung neuer KI-basierter Lösungen nur mit erheblicher Unsicherheit vorhersagen. Der Markt für die Technologieentwicklung, Skalierung und Bereitstellung wird weltweit bis 2030 auf rund 660 Mrd. € geschätzt^{91,92}. Das eigentliche Wertschöpfungspotenzial durch die

Anwendung und Integration dieser Technologien in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft, etwa durch Produktivitäts- und Umsatzsteigerungen sowie Kostensenkungen, dürfte jedoch ein Vielfaches höher liegen.

Aktuelle Zielsetzungen geben eine Indikation der erwarteten Potenziale in den kommenden Jahren. So verfolgt die Bundesregierung mit der 2025 verabschiedeten Hightech Agenda Deutschland das Ziel, bis 2030 rund 10 % der deutschen Wirtschaftsleistung durch KI-Technologien zu generieren⁹³. Dies entspräche einem Potenzial von mindestens 400 Mrd. € für Deutschland und, hochgerechnet auf die OECD-Staaten, einem Wert im mittleren einstelligen Billionen-Euro-Bereich.

Das relative Nutzenpotenzial von KI – insbesondere generativer KI – unterscheidet sich dabei zwischen Staaten und hängt stark vom Branchenmix der jeweiligen Wirtschaft ab, da die Einsatzmöglichkeiten je nach Tätigkeit und Sektor variieren (z. B. typische Aufgaben von Angestellten im Vergleich zu denen von Arbeitern). Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Vakanzquote als Maß für den Arbeitskräftemangel. Länder mit einer hohen Vakanzquote können diesen Mangel durch den Einsatz von KI-Technologien potenziell verringern und damit ein akutes wirtschaftliches Problem adressieren, das in anderen Staaten in dieser Form nicht besteht. Eine Analyse des Branchenmixes und der Vakanzquoten verschiedener Länder zeigt, dass das Nutzenpotenzial von KI-Anwendungen in Deutschland, Europa und Nordamerika besonders hoch ist (vgl. Abb. 13).

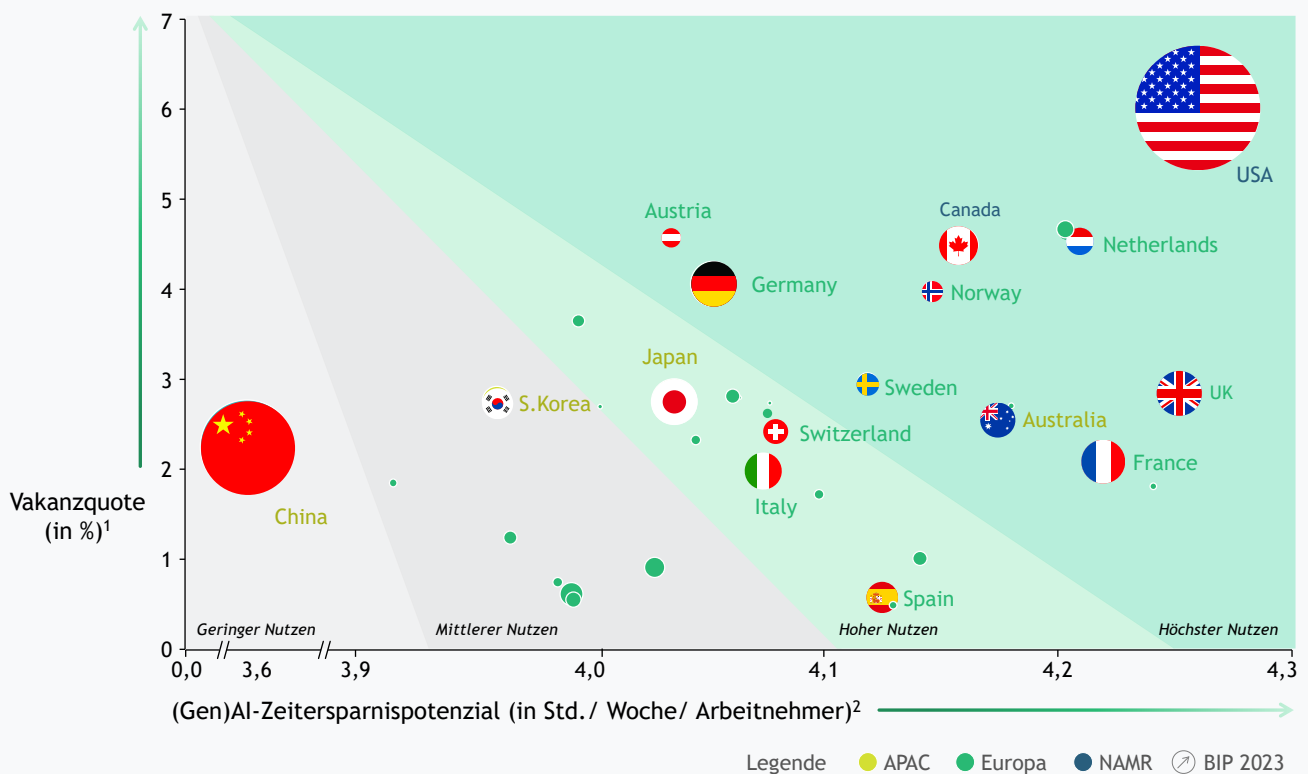
⁹⁰ Die Spieleindustrie hat darüber hinaus eine zentrale Rolle als Impulsgeber für KI-Technologien eingenommen. Innovationen, die ursprünglich für die Spieleentwicklung entstanden sind – etwa im Bereich der GPU-Technologie (Grafikprozessor-Technologie), der virtuellen und erweiterten Realität (VR/AR) oder der GenKI-Verfahren –, finden inzwischen breite industrielle Anwendung, beispielsweise in Simulationen oder immersiven Trainingsumgebungen.

⁹¹ BDI, BCG und IW (2025).

⁹² Marktpotenzial in Höhe von 660 Mrd. € in 2030 durch KI-Software und KI-Services (inklusive GenKI, exklusive KI-Servern).

⁹³ BMFTR (2025a).

ABBILDUNG 13 | Hohes Potenzial in Europa und Nordamerika, von (Gen)KI-Nutzung zu profitieren



1. Definiert als Anzahl der offenen Stellen / (Anzahl der besetzten Stellen + Anzahl der offenen Stellen). Quelle: Eurostat ergänzt mit Daten von nationalen Statistikämtern; für China, Korea und Japan abgeleitet durch Korrelation zwischen Vakanzrate und Arbeitslosenquote
 2. (Gen)AI-Zeiterparnispotenzial für Länder basierend auf ihrem BIP-bezogenen Branchenmix. Quelle: BCG Bionic Workforce Diagnostics, OECD, Weltbank

3.4. Globale Wettbewerbslandschaft und Position Deutschlands

Aufgrund der Breite von KI-Technologien und der unterschiedlichen Dynamiken in den beiden „Rennen“ (Technologiegrundlagenentwicklung und -anwendung) ist die globale Wettbewerbslandschaft hochkomplex. Erfolg entsteht dort, wo Länder ihre Kräfte klar auf Felder fokussieren, in denen realistische Wettbewerbsvorteile bestehen und die zum wirtschaftlichen wie regulatorischen Kontext passen. Entsprechend setzen Staaten unterschiedliche Schwerpunkte: einige stärker im Grundlagenrennen (Skalierung von Modellen, Chips, Cloud), andere primär im Anwendungsrennen (Domänenintegration, industrielle Skalierung).

Für Deutschland und die EU stellt sich die Ausgangs-

lage differenziert dar. Insgesamt zeigt sich im Grundlagenrennen⁹⁴ ein deutlicher Rückstand gegenüber Hyperscalern und Pionieren aus den USA und China. Während diese Nationen das technologische Feld dominieren und gemeinsam den Großteil des weltweiten KI-Entwicklungsmarktes⁹⁵ kontrollieren, liegt Deutschlands Anteil bei lediglich rund 2 %.^{96,97,98} Ein generelles Aufholen über das gesamte Spektrum erscheint kurzfristig wenig realistisch. Punktuelle Führungsrollen sind jedoch erreichbar, wenn die Technologieentwicklung gezielt auf strategische Schlüsselpositionen mit offenem Wettbewerb ausgerichtet wird.

Das deutlich größere Potenzial für Deutschland liegt im Anwendungsrennen⁹⁹, in dem Deutschland international in vielen Feldern auf Augenhöhe konkurrieren kann. Bestandsaufnahmen zeigen so zum Beispiel, dass deutsche Unternehmen ihre Zufriedenheit mit den bisher erzielten Gewinnen aus generativer KI

⁹⁴ Vgl. Abb. 7.

⁹⁵ Vgl. Abb. 7.

⁹⁶ BDI, BCG und IW (2024).

⁹⁷ IMF (2025).

⁹⁸ BCG (2024f).

⁹⁹ Vgl. Abb. 7.

höher bewerten (39 %) als ihre amerikanischen (33 %) oder chinesischen Wettbewerber (34 %, vgl. Abb. 7)¹⁰⁰. Zudem verfügt Deutschland über ein hohes Nutzen-Potenzial durch die Anwendung von (Gen)KI (vgl. Abb. 13). Hier gilt es, bestehende industrielle Stärken – wie die tiefe Domänenexpertise in Maschinen- und Anlagenbau, Automotive, Chemie, Medizintechnik und Energie, eine ausgeprägte Prozess- und Qualitätskultur, leistungsfähige Mittelständler mit Nähe zum Shopfloor sowie ein dichtes Netz aus Forschungseinrichtungen und Berufsbildung¹⁰¹ – gezielt zu nutzen. Gleichzeitig muss die wertschöpfende Anwendung von KI über alle Domänen hinweg vorangetrieben werden.

Nach der allgemeinen Betrachtung folgt nun eine detaillierte Analyse der Wettbewerbslandschaft und Deutschlands Ausgangsposition zur KI entlang der sechs zentralen Deep-Tech-Ökosystem-Handlungsfelder, um vorhandene Stärken herauszuarbeiten und bestehende Herausforderungen aufzuzeigen.

Strategie und Zielsetzung. Weltweit verfolgen führende Staaten unterschiedliche KI-Strategien. Die USA setzen stark auf „Frontier-Projekte“ und investieren Milliarden in bahnbrechende Modelle mit dem Ziel einer „Artificial General Intelligence“ (AGI).¹⁰² Zwar gibt es keinen einheitlichen Masterplan, doch das Zusammenspiel von Big Tech, Spitzenuniversitäten und staatlicher Grundfinanzierung (z. B. DARPA, NSF) sichert die US-Führungsrolle.

China verfolgt seit 2017 mit seinem „New Generation AI Development Plan“ das Ziel, bis 2030 die weltweite Führungsrolle zu übernehmen.¹⁰³ Die Strategie ist zentral koordiniert, massiv finanziert und setzt primär auf pragmatische, kostengünstige Anwendungen, die schnell in Industrie und Alltag skalieren. Parallel beteiligen sich Player wie DeepSeek¹⁰⁴ oder Alibaba am Rennen um AGI¹⁰⁵. Auffällig ist Chinas gezielter Einsatz von Open-Source-Modellen, um Kosten zu senken und die internationale Verbreitung eigener Technologien zu fördern.

Beide Länder hinterlegen ihre Strategien mit erheblichen Ressourcen: US-Tech-Giganten wie Google, Meta oder OpenAI treiben mit enormem Kapital die Ent-

wicklung großer Modelle¹⁰⁶, während China einen staatlichen KI-Fonds über umgerechnet 7,5 Mrd. € aufgelegt hat und mit der Kampagne „AI+ Action Plan“ (2025) bis 2030 KI in allen Sektoren verankern will.¹⁰⁷

Die Bundesregierung verfolgt seit 2018 eine nationale KI-Strategie mit dem klaren Ziel, Deutschland und Europa bis 2030 in eine internationale Spitzenposition bei KI-Technologien zu führen.¹⁰⁸ Die Strategie ist aktuell mit 5 Mrd. € bis 2025 ausgestattet¹⁰⁹ und wurde 2023 durch den KI-Aktionsplan (BMFTR) um 12 konkrete Handlungsfelder erweitert.¹¹⁰ Mit der im Juli 2025 verabschiedeten Hightech Agenda wurde die deutsche Zielsetzung weiter geschärft und durch erste Maßnahmen unterlegt. Zentrale Ziele sind unter anderem: Bis 2030 sollen 10 % der deutschen Wirtschaftsleistung KI-basiert erwirtschaftet werden, die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit von KI-Kapazitäten sollen messbar verbessert werden und Deutschland soll zu einem führenden internationalen Akteur im Bereich der KI entwickelt werden (vgl. Kapitel 3.5). Dabei setzen Deutschland und die EU auf einen menschenzentrierten, verantwortungsvollen Ansatz, der technische Exzellenz stark mit Ethik und Regulierung verbindet.

Die Umsetzung der Strategien in Deutschland und Europa leidet jedoch unter mangelnder Koordination. Bundesländer wie Bayern (Hightech Agenda, ca. 3,5 Mrd. €) verfolgen eigene KI-Strategien, während auf Bundesebene parallele Zuständigkeiten zahlreicher Ministerien zu Doppelstrukturen und Inkonsistenzen führen.¹¹¹ Es fehlt zudem an einer systematischen Bewertung und Priorisierung der Maßnahmen sowie an einer klaren Abstimmung zwischen Bund, Ländern und EU. Vor dem Hintergrund des wachsenden internationalen Wettbewerbsdrucks ist es daher für Deutschland und Europa strategisch entscheidend, die Koordination zu verbessern und klare Prioritäten bei der Entwicklung und Anwendung von KI zu setzen.

Ökosystem-Infrastruktur. Rechen- und Dateninfrastruktur bilden das Rückgrat des globalen KI-Wettbewerbs. Die USA verfügen derzeit über einen klaren Vorsprung: High-End-Chips und Supercomputer stammen überproportional aus den Vereinigten Staaten. Vor allem Nvidia dominiert den Markt für KI-Beschleu-

¹⁰⁰ Zufriedenheit von Organisationen mit dem ROI von KI-/GenKI-Initiativen. Grundlage ist eine Befragung von n ≥ 1.800 C-Level Executives zur Frage „Satisfaction with returns from (Gen)AI?“ Als „zufrieden“ gewertet wurden die Antworten „completely satisfied“ und „mostly satisfied“ (Quelle: BCG AI Radar, Jan. 2025).

¹⁰¹ BCG (2024f).

¹⁰² RAND (2025).

¹⁰³ China Curated (2017).

¹⁰⁴ Reuters (2025a).

¹⁰⁵ The Wall Street Journal (2025).

¹⁰⁶ Forbes (2025).

¹⁰⁷ Tech in Asia (2025).

¹⁰⁸ OECD (2024).

¹⁰⁹ OECD (2023a).

¹¹⁰ BMBF (2023a).

¹¹¹ StMWK (2022).

niger. Zudem stellten die USA 2022 mit „Frontier“ den ersten offiziellen Exascale-Rechner.¹¹² Auch im internationalen Vergleich führen die USA mit 161 Supercomputern. China folgt auf Platz 2 mit 63 Systemen und baut seine Rechenkapazitäten kontinuierlich weiter aus.¹¹³

Europa zieht nach: 2025 ging mit JUPITER in Jülich der erste europäische Exascale-Supercomputer in Betrieb, der über eine Trillion Rechenoperationen pro Sekunde schafft und insbesondere KI- und Simulationsanwendungen in Wissenschaft und Industrie beschleunigen soll.¹¹⁴ Deutschland verfügt mit dem Forschungszentrum Jülich¹¹⁵ und dem Leibniz-Rechenzentrum in München¹¹⁶ über ein starkes wissenschaftliches Fundament im Hochleistungsrechnen und investiert gezielt in den Ausbau. Ergänzend wurde die europäische KI-Cloud von Nvidia angekündigt, die Europas KI-Rechenleistung verzehnfachen soll.¹¹⁷

Im internationalen Vergleich liegt Deutschland bei der akademischen Supercomputing-Leistung unter den Top 5, dank öffentlich finanzierter Spitzenrechner. Auffällig ist jedoch, dass deutsche Industrieunternehmen kaum eigene Systeme betreiben, während in den USA und China zahlreiche industrielle und behördliche Supercomputer vertreten sind.¹¹⁸ Dies verdeutlicht: In Deutschland ist fortgeschrittene KI-Infrastruktur primär in der Wissenschaft angesiedelt, während US- und chinesische Konzerne massiv in eigene Rechenzentren investieren.

Die Halbleiter-Wertschöpfungskette ist ebenfalls ein strategisch wichtiger Teil der Ökosystem-Infrastruktur. Modernste KI-Chips erfordern eine globale Zulieferkette mit Schlüsselfirmen wie TSMC (Fertigung, Taiwan) und ASML (Lithografie, Niederlande), die klare Marktführerpositionen in ihren Segmenten innehaben.¹¹⁹ Während die USA das Chip-Design und viele Spezialanlagen kontrollieren, konzentriert sich die Fertigung in Ostasien. Europa verfügt mit ASML über einen „Hidden Champion“, bleibt jedoch insgesamt von Importen abhängig.¹²⁰ Um diese Abhängigkeiten

zu reduzieren, fördern Regierungen weltweit ihre Halbleiterindustrie: die USA mit dem CHIPS Act (47 Mrd. €)¹²¹, die EU mit dem European Chips Act (43 Mrd. €)¹²².

Auch in der Cloud- und Daten-Infrastruktur dominieren die USA: Amazon Web Services, Microsoft Azure und Google Cloud stellen weltweit die zentralen Plattformen für KI-Services und verfügen über riesige Datenmengen für das Training.¹²³ China hat mit Alibaba und Tencent eigene Anbieter, die den Binnenmarkt versorgen. Europa hingegen nutzt bislang überwiegend fremde Dienste. Initiativen wie Gaia-X zielen auf eine souveräne, interoperable Cloud-Architektur, befinden sich aber noch im Aufbau. Deutschland adressiert die industrielle Datenbasis zusätzlich unter anderem über Manufacturing-X (BMW), um offene, interoperable Datenräume, Standards und Schnittstellen zu schaffen und so KI-getriebene, resiliente Wertschöpfung zu ermöglichen.¹²⁴

Bei Regulierung und Datenzugang setzt die EU-Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) weltweit Maßstäbe für den Schutz personenbezogener Daten. Das stärkt ethische Standards, begrenzt aber zugleich die verfügbare Datenmenge im Vergleich zu den USA oder China. Der risikobasierte EU AI Act schreibt zudem umfangreiche Prüf- und Nachweispflichten für Hochrisiko-Anwendungen vor.^{125,126} Zusammen mit nationalen Regelungen – etwa dem Autonome-Fahren-Gesetz – erhöht dies die regulatorische Komplexität. Entscheidend ist daher, dass Vorschriften innovationsfreundlich ausgelegt werden, um Vertrauen und Sicherheit zu gewährleisten, ohne Entwicklungen zu hemmen.¹²⁷

Positiv ist, dass Europa mit Instrumenten wie dem geplanten Data Act und der Förderung vertrauenswürdiger Datenräume neue Stärken aufbauen möchte, auch wenn diese Ansätze noch nicht ausgereift sind. Parallel nehmen Deutschland und Europa in der internationalen Normungsarbeit (DIN, ISO, CEN/CENELEC) eine führende Rolle ein.^{128,129}

¹¹² U.S. Department of Energy (2022).

¹¹³ Quartz Media (2025).

¹¹⁴ EuroHPC JU (2023).

¹¹⁵ Forschungszentrum Jülich (2025).

¹¹⁶ Leibniz-Rechenzentrum (2025).

¹¹⁷ Manager Magazin (2025).

¹¹⁸ Quartz Media (2025).

¹¹⁹ Nasdaq (2025).

¹²⁰ BCG (2024d).

¹²¹ HAI (2022).

¹²² EC (2025b).

¹²³ CIO Dive (2025).

¹²⁴ Factory-X (o. J.).

¹²⁵ DIN, DKE (2022).

¹²⁶ OECD (2024).

¹²⁷ OECD (2024).

¹²⁸ CEN & CENELEC (2025).

¹²⁹ OECD (2024).

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass zentrale Bestandteile der Infrastruktur für ein leistungsfähiges KI-Ökosystem aktuell außerhalb deutscher und europäischer Kontrolle liegen, mit Schwerpunkten in den USA und Ostasien. Dieser Umstand könnte bei Lieferengpässen, Exportbeschränkungen oder geopolitischen Spannungen erhebliche Risiken bergen.¹³⁰ Die zentrale Herausforderung besteht daher darin, parallel zum Ausbau der Hochleistungsinfrastruktur auch die technologische Souveränität langfristig zu sichern – etwa durch eigene Hardware-Entwicklung (Chips), Open-Source-KI-Initiativen und unabhängige Cloud-Plattformen. Verbundprojekte wie beispielsweise HealthTrack-X sind erste Ansätze, wie solche vertrauenswürdige Datenräume sich in spezifischen Branchen – hier im Gesundheitswesen – konkretisieren lassen. Politische Initiativen wie EuroHPC, Cloud-Projekte und Halbleiterförderung (EU Chips Act) sollen zusätzlich die Abhängigkeiten reduzieren, ihre Wirkung wird jedoch erst mittelfristig sichtbar werden. Bis dahin positioniert sich Deutschland über Regulierung, Normung und wissenschaftliche Exzellenz, bleibt jedoch im globalen Wettbewerb um KI-Infrastruktur stark auf andere Regionen angewiesen.

Bildung und Fachkräfte. Talent ist eine der härtesten Währungen im KI-Wettbewerb. Die USA ziehen dabei die meisten hochqualifizierten KI-Fachkräfte an und verfügen mit rund 500.000 KI-Fachkräften und fast 60 % der weltweit führenden KI-Forscher über den größten Talentpool im KI-Bereich^{131,132}. Dies liegt nicht nur an den exzellenten Universitäten (MIT, Stanford, etc.), sondern auch an den führenden Tech-Unternehmen, die Spitzengehälter und attraktive Forschungslabore bieten. Zudem wechseln global viele Talente aus der Wissenschaft in die US-Industrie, da dort große KI-Projekte locken. Seit 2017 hat der Anteil der in der Industrie tätigen KI-Forscher stark zugenommen und in den meisten Ländern arbeiten inzwischen über 50 % der KI-Wissenschaftler außerhalb von Hochschulen.¹³³ China baut sein Talentreservoir ebenfalls massiv aus: Das Land bildet jährlich Tausende Absolventen in KI-nahen Fächern aus und holt mit Programmen wie dem „Thousand Talents“-Programm Rückkehrer aus dem Ausland zurück. Quantitativ hat China inzwischen die meisten STEM-Absolventen weltweit¹³⁴.

Die EU und insbesondere Deutschland verfügen über exzellente KI-Forschungseinrichtungen (z. B. Max-Planck-Institut, Fraunhofer, Cyber Valley) und einen traditionell starken MINT-Bildungssektor, kämpfen aber mit einem Nachwuchs- und Fachkräftemangel in KI. Laut einem OECD-Review gilt der Mangel an qualifizierten KI-Fachkräften in Deutschland als eines der Haupthindernisse für die Umsetzung von KI-Lösungen. Prognosen zufolge könnte bis 2040 ein Fehlbestand von mehr als 600.000 IT-Fachkräften – darunter viele im KI-Bereich – entstehen¹³⁵. Trotz erfolgreicher Initiativen wie 150 neuen KI-Professuren, Nachwuchsgruppen und digitalen Weiterbildungsangeboten (z. B. KI-Campus) bleiben fehlende KI-Kompetenzen ein zentrales Hindernis für Unternehmen¹³⁶. Neben klassischen KI-Spezialisten steigt zudem der Bedarf an interdisziplinären Profilen – etwa KI-Experten mit biowissenschaftlichem Hintergrund in der Pharmaindustrie¹³⁷. Obwohl Deutschland netto einen Zugewinn an KI-Talenten aus dem Ausland verzeichnet, wandern Spitzenkräfte weiterhin häufig an US-Universitäten oder in die Tech-Industrie ab.¹³⁸

Deutschlands Versuch, dem entgegenzuwirken, zeigt sich in Programmen wie „KI-Newcomer“ (Forschungspreise für junge Talente) oder in der Visa-Politik. Das Fachkräfteeinwanderungsgesetz (FEG) vereinfacht seit 2023 die Verfahren und senkt Hürden, was als positiver Schritt gilt¹³⁹, um im globalen Rennen um KI-Talente konkurrenzfähig zu sein. Doch in der Praxis werden die positiven Effekte durch Bürokratie und lange Bearbeitungszeiten gebremst. Im Vergleich zu den USA oder Kanada hat Deutschland noch Nachholbedarf in der Attraktivität als Arbeitsort. China versucht gleichzeitig, mit hohen Gehältern eigene Talente zu halten bzw. aus dem Ausland zurückzuholen.

Neben Ausbildung und Zuwanderung von Fachkräften ist auch der gesellschaftliche Bildungs- und Aufklärungsstand im Bereich KI noch ausbaufähig. In Deutschland ist die Haltung gegenüber KI ambivalent: Zwar sehen 74 %¹⁴⁰ der Bürger grundsätzlich Chancen in der Technologie, gleichzeitig überwiegen konkrete Ängste – etwa vor dem Wegfall von Arbeitsplätzen (62 %), Überwachung (62 %) oder sogar existenziellen Bedrohungen (34 %).¹⁴¹ Bisherige Aufklärungsinitiativen wie das Wissenschaftsjahr KI, die Plattform Ler-

¹³⁰ INSIDE Industry Association (2025).

¹³¹ BCG (2024d).

¹³² MacroPolo (2024).

¹³³ MIT Sloan (2024).

¹³⁴ Georgetown University (2023).

¹³⁵ Bitkom (2024).

¹³⁶ OECD (2024).

¹³⁷ Vfa und BCG (2024).

¹³⁸ OECD (2024).

¹³⁹ OECD (2024).

¹⁴⁰ Bitkom Research (2024).

¹⁴¹ Frankfurter Allgemeine Zeitung, FAZ (2023).

nende Systeme, Bürgerdialoge oder mediale Formate erzielen zwar eine gewisse Reichweite, erreichen jedoch häufig nur ein Fachpublikum. Vor allem ältere sowie bildungsfernere Bevölkerungsgruppen bleiben skeptisch und schwer zugänglich.¹⁴² Chancen bestehen darin, durch verstärkte Aufklärungskampagnen, die stärkere Integration von KI in Bildungsprozesse sowie breite Beteiligungsformate die gesellschaftliche Akzeptanz zu erhöhen.

Technologietransfer und -skalierung. Die Überführung von KI-Innovationen aus der Forschung in die breite wirtschaftliche Anwendung entscheidet maßgeblich darüber, wer Nutzen aus KI zieht. Hier sind klare Unterschiede sichtbar: Die USA verfügen über ein außergewöhnlich agiles Innovationsökosystem, in dem neue KI-Ergebnisse schnell in Start-ups oder neuen Produkten münden. Beispielsweise entstand aus OpenAIs Forschung zu Large Language Models binnen kurzer Zeit ein kommerzielles Ökosystem (etwa durch die Integration von ChatGPT in Microsoft Office oder durch hunderte Start-ups, die auf GPT-APIs aufbauen). Risikokapitalgeber in den USA finanzieren aggressiv junge KI-Firmen, so dass diese rasch skalieren können. So flossen 2022 trotz eines leichten Rückgangs immer noch rund 43 Mrd. € privates Kapital in den USA in KI-Investments, fast doppelt so viel wie in ganz Europa.¹⁴³ China setzt beim Technologietransfer auf Top-down-Skalierung: Wenn neue KI-Lösungen bereitstehen, werden sie häufig durch staatliche Programme landesweit ausgerollt. Beispiele sind KI-gestützte Videoüberwachung oder Diagnose-Systeme in Krankenhäusern. Dabei kooperieren chinesische Tech-Konzerne eng mit Regierungsstellen, um Pilotprojekte schnell in den Regelbetrieb zu überführen. Im europäischen Kontext verfügt insbesondere das Vereinigte Königreich über ein dynamisches KI-Ökosystem, das gezielt auf schnelle Markteinführung von KI-Innovationen ausgerichtet ist.

Deutschland zählt zu den führenden Nationen in der KI-Forschung (Platz 2 mit rund 17 % der globalen KI-Patentanmeldungen), doch die Überführung in industrielle Anwendungen bleibt unzureichend.¹⁴⁴ Trotz Erfolgen wie DFKI-Spin-offs (> 100 Stück; Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH), Fraunhofer-Ausgründungen (z. B. DeepL, Ada Health) und regionaler Zentren wie Cyber Valley liegt die Zahl wirtschaftlich erfolgreicher Verwertungen deutlich

unter dem vorhandenen Potenzial.¹⁴⁵ Hemmnisse sind komplexe bürokratische Regelungen zum Erfindereigentum bei Arbeitnehmern (Arbeitnehmererfindungsgesetz, ArbNErfG), eine unzureichende Harmonisierung von IP-Regelungen sowie langwierige Patentierungsverfahren an Hochschulen. Viele deutsche KI-Start-ups bleiben zudem klein oder werden im Frühstadium übernommen (häufig von US-Unternehmen), weil Wachstumskapital und Skalierungserfahrung fehlen. Neue Förderprogramme (EXIST, SPRIND), Validierungsinitiativen (VIP+) sowie Public-Private-Partnerships bieten die Chance, Technologietransfer und Skalierung zu beschleunigen. Ohne einen konsequenten Abbau administrativer Hürden, den Ausbau industrieller Kooperationsmodelle und die verstärkte Bereitstellung von Wachstumskapital droht Deutschland jedoch im internationalen Wettbewerb weiter zurückzufallen und das wirtschaftliche Potenzial seiner eigenen KI-Forschung nicht voll auszuschöpfen.

Um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben, braucht es in Deutschland zukünftig Maßnahmen zum Abbau administrativer Hürden, zur stärkeren Verzahnung von Forschung und Industrie sowie zur besseren Skalierung erfolgreicher Transfermodelle.

Kooperation. Die Gestaltung internationaler Kooperation im KI-Bereich wird immer wichtiger, da KI als Querschnittstechnologie globale Regeln und gemeinsame Anstrengungen erfordert. In den letzten Jahren hat insbesondere die Entwicklung einer globalen Governance von KI Fahrt aufgenommen: Von der OECD über die EU bis zur UNO werden Rahmenwerke für vertrauenswürdige KI entwickelt. So veröffentlichte die UNESCO ethische KI-Empfehlungen¹⁴⁶, die OECD betreibt ein KI-Observatorium¹⁴⁷, die G7 gründeten die Initiative „Hiroshima AI Process“¹⁴⁸, und im November 2023 fand der erste Welt-KI-Sicherheitsgipfel in Großbritannien statt.¹⁴⁹ Diese Formate zeigen, dass viele Staaten kooperieren möchten, um Grundprinzipien wie Transparenz, Rechenschaftspflicht und Menschenrechte sicherzustellen sowie Standards abzustimmen.¹⁵⁰

Deutschland und die EU spielen in internationalen Foren meist eine aktive Rolle als Verfechter hoher ethischer Maßstäbe im Umgang mit KI. Neben der EU-Ebene pflegt Deutschland gezielt bilaterale Partnerschaften, etwa mit Ländern wie Singapur¹⁵¹, die

¹⁴² FAZ (2023).

¹⁴³ Reuters (2023).

¹⁴⁴ VDI (2024).

¹⁴⁵ DFKI (2025).

¹⁴⁶ UNESCO (2022).

¹⁴⁷ OECD (2024).

¹⁴⁸ G7/Japan (2023).

¹⁴⁹ UK Government (2023).

¹⁵⁰ HAI (2025).

durch gemeinsame Forschungsinitiativen und Austauschprogramme gestärkt werden. Die USA und die EU haben zudem einen Trade and Technology Council (TTC) eingerichtet, der unter anderem beim Thema KI (Standards, Monitoring von KI-Risiken) zusammenarbeitet.¹⁵² Weitere Partnerschaften bestehen mit Israel (Hightech-Forum)¹⁵³ und Japan (Abkommen zur KI-Forschung 2023)¹⁵⁴, um Zugang zu Know-how zu sichern. Darüber hinaus engagiert sich Deutschland in globalen Plattformen wie dem Global Partnership on AI (GPAI)¹⁵⁵, den AI-Safety- und AI-Innovation-Summits¹⁵⁶, um den internationalen Dialog zu fördern, Wissen auszutauschen und gemeinsame Standards sowie ethische Leitlinien für den verantwortungsvollen Einsatz von KI zu entwickeln.

Zusätzlich setzt Deutschland stark auf europäische Kooperation und beteiligt sich an der Koordination von KI-Forschungsmitteln (Horizon Europe, gemeinsame Ausschreibungen)¹⁵⁷ und an Netzwerken von KI-Exzellenzzentren (z. B. CLAIRE¹⁵⁸, ELLIS¹⁵⁹). Besonders eng arbeitet Deutschland dabei mit Frankreich zusammen. Beide Länder haben 2019 einen bilateralen KI-Forschungskooperations-Vertrag geschlossen und finanzieren gemeinsame KI-Zentren, um Synergien zu erzielen.¹⁶⁰

Die sektorübergreifende Kooperation im KI-Bereich ist in Deutschland und Europa bislang deutlich ausbaufähig. Zwar gibt es in regionalen und europäischen Zentren bereits einen regen Austausch zwischen Wissenschaft, Privatwirtschaft und öffentlichem Sektor – etwa durch öffentlich-private Konsortien wie das CERN openlab, in dem Tech-Konzerne und EU-Forschung Rechenressourcen teilen, oder durch Initiativen wie „Lernende Systeme“ in Deutschland, die Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft vernetzen. Außerhalb dieser Cluster bleibt die Zusammenarbeit jedoch häufig eingeschränkt, was unter anderem auf historisch gewachsene Trennlinien zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, fehlende Netzwerke sowie administrative Hürden zurückzuführen ist.¹⁶¹

Innovation, Forschung und Entwicklung. Aktuell liegen die USA bei der KI-Grundlagenforschung deutlich vorne: 2024 stammten 40 von 58 bedeutenden neuen KI-Modellen aus US-Institutionen, während aus China 15 und aus ganz Europa nur 3 kamen.¹⁶² Dies zeigt eine klare Konzentration von Spitzeninnovationen (wie GPT-5) in den USA. Allerdings holen andere auf – insbesondere China: Bei vielen Benchmark-Tests nähern sich chinesische Modelle inzwischen der Performance der besten US-Modelle an. Insbesondere das Open-Source-Modell DeepSeek-R1 hat die technologischen Unterschiede zu US-amerikanischen Modellen deutlich verringert, bei gleichzeitig extrem niedrigen Entwicklungs- und Nutzkosten.

Was die Investitionen in F&E angeht, fließen in den USA nicht nur immense Unternehmensmittel (Alphabet, Microsoft und Meta geben jeweils jährlich zweistellige Milliardenbeträge für Forschung und Produktentwicklung aus, wobei KI ein Kernbestandteil ist), sondern auch staatliche Gelder: Das Weiße Haus kündigte 2023 weitere Milliardenförderungen für KI-Sicherheit und -Forschung an, und DARPA startete neue Programme wie „AI Next“. China wiederum baut in zahlreichen Provinzen spezialisierte Forschungszentren auf. Zudem unterhalten chinesische Unternehmen wie Huawei und Baidu eigene grundlagenorientierte Labore.

Deutschland und die EU investieren ebenfalls mehr: Deutschland hat seine öffentlichen KI-Investitionen deutlich ausgebaut (Bundesmittel 5 Mrd. € bis 2025, ergänzt durch Länderprogramme wie Bayerns Hightech Agenda mit 3,5 Mrd. €).^{163,164} Zahlreiche Programme auf verschiedenen politischen Ebenen (z. B. EXIST, HTGF, Zukunftsfonds mit 10 Mrd. €¹⁶⁵, DeepTech & Climate Fonds [DTCF] mit 1 Mrd. €¹⁶⁶, Horizon Europe) adressieren insbesondere Forschung und frühe Start-up-Phasen, sind jedoch oftmals technologieübergreifend angelegt und nicht spezifisch auf KI oder Deep Tech zugeschnitten. Außerdem bleiben diese Investitionen trotz Aufstockungen im internationalen Vergleich deutlich hinter den Spitzenreitern zurück.

¹⁵¹ Bundesregierung (2024).

¹⁵² EC (2021e).

¹⁵³ EC (2021d).

¹⁵⁴ EC (2023b).

¹⁵⁵ BMAS (2020).

¹⁵⁶ UK Government (2023).

¹⁵⁷ EC (2024c).

¹⁵⁸ DFKI (2020).

¹⁵⁹ ELLIS (o. J.).

¹⁶⁰ Deutscher Bundestag (2020).

¹⁶¹ Rothgang et al. (2022).

¹⁶² HAI (2025).

¹⁶³ OECD (2024).

¹⁶⁴ StMWK (2022).

¹⁶⁵ Zukunftsfonds (2025).

¹⁶⁶ BMWK (2024).

Allerdings kommt es nicht nur auf Quantität an: Die Qualität der europäischen Forschung ist beachtlich. In Rankings nach Zitierungen liegt Deutschland auf Platz 4 (hinter USA, China, UK)¹⁶⁷, was zeigt, dass pro Euro durchaus Wirkung erzielt wird. Außerdem fördern EU-Staaten oft spezialisierte Bereiche (z.B. neuromorphe KI-Chips in Dresden¹⁶⁸, symbolische KI in Frankreich¹⁶⁹, hybride KI-Systeme im DFKI¹⁷⁰ etc.), während sich die USA und China auf Mainstream-Deep-Learning-Ansätze fokussieren.

3.5. Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken

Bezug zur Hightech Agenda Deutschland

Die Bundesregierung hat mit der Hightech Agenda Deutschland die strategische Bedeutung der KI erkannt und einen wichtigen Schritt unternommen, um KI als strategische Schlüsseltechnologie zu stärken. Sie hat dabei bewusst einen Ansatz gewählt, der darauf abzielt, technologische Souveränität und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit mit europäischen Werten wie Rechtsstaatlichkeit und gesellschaftlicher Verantwortung zu verbinden.

Konkret formuliert die Bundesregierung drei Zielsetzungen:

1. Mit einer KI-Offensive wollen wir bis 2030 10 % unserer Wirtschaftsleistung KI-basiert erwirtschaften, die Arbeitsproduktivität erhöhen und KI zu einem wichtigen Werkzeug in zentralen Forschungs- und Anwendungsfeldern machen.
2. Wir verbessern die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit von KI-Kapazitäten (Algorithmen, Daten, Rechner, Softwaretools, KI-Chips) für Wissenschaft, Forschung, Wirtschaft, Verwaltung und Gesellschaft messbar.
3. Wir werden ein zentraler Player für die nächste KI-Generation und im weltweiten Wettbewerb.¹⁷¹

Die zugehörigen Maßnahmen der Hightech Agenda setzen wichtige Impulse – etwa durch die Förderung von Grundlagenmodellen, den geplanten Ausbau der KI-Recheninfrastruktur und die Stärkung von KI-Anwendungen in strategischen Branchen wie Maschinenbau, Medizin und Cleantech.

Zugleich werden in der aktuellen Ausgestaltung der Hightech Agenda zentrale Handlungsfelder, die für eine nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit entscheidend sind, bislang nicht hinreichend adressiert. So fehlt es zum Beispiel an einer integrierten Strategie, um KI-Talente entlang der gesamten Bildungskette gezielt und umfassend zu fördern und internationale Spitzenkräfte dauerhaft zu gewinnen.

Die vorliegende Studie ergänzt die Hightech Agenda gezielt um konkrete, praxistaugliche Handlungsempfehlungen. Damit unterstützt sie aktiv den geplanten Roadmapping-Prozess und hilft Deutschland, vorhandene Chancen für eine Spitzenposition im globalen KI-Wettbewerb entschlossen und zielgerichtet zu nutzen.

¹⁶⁷ OECD (2024).

¹⁶⁸ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf / Silicon Saxony (2024–25).

¹⁶⁹ EC (2023a).

¹⁷⁰ DFKI (2024).

¹⁷¹ BMFTR (2025).

Handlungsfeld	Empfehlung
Strategie und Zielsetzung 	<p>KI1 - Breite und koordinierte Einführung von KI in der Verwaltung zur Effizienzsteigerung und Bürokratieentlastung</p> <p>KI2 - Verankerung von KI-basierter Wertschöpfung in organisatorischen Zielen, Governance und Anreizsystemen in der Wirtschaft</p>
Ökosystem-Infrastruktur 	<p>KI3 - Gestaltung und Etablierung zugänglicher, wirksamer und investitionsfähiger Förderinstrumente für KI-Projekte</p> <p>KI4 - Verbesserung der technischen Souveränität durch gezielten KI-Infrastrukturausbau</p> <p>KI5 - Ausbau von offenen Datenplattformen und Industriedatenräumen</p>
Bildung und Fachkräfte 	<p>KI6 - Förderung breit angelegter gesellschaftlicher KI-Bildung und gezielter Kampagnen zur Akzeptanzschaffung</p> <p>KI7 - Verbesserung der deutschen Standortattraktivität für KI-Experten</p>
Technologie-transfer und -skalierung 	<p>KI8 - Vereinfachung des Technologietransfers für KI durch Harmonisierung und Beseitigung rechtlicher und administrativer Hürden</p>
Kooperation 	<p>KI9 - Ausbau der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Deep-Tech-KI Start-ups</p> <p>KI10 - Aufbau von Technologie-Hubs zur Skalierung und Integration von KI-Forschungsclustern</p> <p>KI11 - Intensivierung der Kooperation zwischen Industrie und Wissenschaft zur Entwicklung anwendungsbezogener KI-Lösungen</p>
Innovation, Forschung und Entwicklung 	<p>KI12 - Etablierung regulatorischer Experimentierräume für die Anwendung künstlicher Intelligenz</p>

Quelle: BCG-Analyse

KI1 - Strategie und Zielsetzung: Breite und koordinierte Einführung von KI in der Verwaltung zur Effizienzsteigerung und Bürokratieentlastung.

Um das Potenzial von KI auch über die Wirtschaft hinaus zu realisieren, sollte die Politik die konsequente Anwendung von KI in staatlichen Stellen als strategisches Ziel definieren. Dabei gilt es, klare Effizienzziele zu definieren und Verwaltungsprozesse konsequent nach dem Prinzip „AI-First“ neu zu gestalten.

Zur Steuerung und Umsetzung empfiehlt sich die Einrichtung einer zentralen KI-Steuerungsstelle, die in enger Abstimmung von BMFTR und BMDS (primäre Zuständigkeit beim BMDS) die Implementierung von KI in staatlichen Prozessen koordiniert. Ihre Aufgaben umfassen insbesondere die Festlegung verbindlicher Ziele und Leitlinien, die Definition und Priorisierung konkreter Maßnahmen, die Vergabe entsprechender Finanzmittel sowie die ressortübergreifende Abstimmung mit den Bundesländern.

Bei der Auswahl und Priorisierung geeigneter Verwaltungsprozesse sollte nicht allein die Automatisierbarkeit berücksichtigt werden. Erforderlich ist vielmehr eine ganzheitliche Bewertung, die Wirtschaftlichkeit,

Nutzerfreundlichkeit sowie Risiken und Abhängigkeiten über den gesamten Lebenszyklus der KI-Lösungen einbezieht. Zusätzlich sollte die Technologieoffenheit der KI-Lösungen bedacht werden.

Unterstützt wird die Steuerungsstelle durch Fachbehörden wie das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) oder das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI).

Für die Umsetzung ist zunächst sicherzustellen, dass grundlegende Herausforderungen der Verwaltungsdigitalisierung, beispielsweise im Hinblick auf Schnittstellen, Datenverfügbarkeit und Systemkomplexität, gelöst werden. Darauf aufbauend können Verwaltungsabläufe konsequent neu gestaltet werden, wobei KI als zentrales Gestaltungselement fungiert. Praktische Anwendungsbeispiele sind etwa intelligente Chatbots, die Bürgerinnen und Bürger bei der Erstanfrage unterstützen, Anliegen strukturieren und eine Weiterleitung an die zuständigen Stellen ermöglichen.

Zusätzlich sollte die Steuerungsstelle ein transparentes Monitoring- und Evaluierungssystem mit verbindlichen KPIs etablieren, das den Fortschritt ressortübergreifend misst und regelmäßig kommuniziert.

ziert. Eine jährliche Berichterstattung, beispielsweise im Rahmen einer Bund-Länder-Konferenz, sowie ein offizieller KI-Fortschrittsbericht stärken Transparenz, Verbindlichkeit und das Vertrauen von Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit.

Je nach Ausgestaltung kann die Steuerungsstelle auch mit der übergeordneten Koordination von KI-Anwendungen außerhalb der Verwaltung betraut werden. Dazu zählt unter anderem das Tracking der Ziele der Hightech Agenda Deutschland („10 Prozent KI-basierte Wertschöpfung bis 2030“) sowie die bessere Abstimmung der KI-Strategie zwischen Bund, Ländern und EU-Ebene. Ein besonderer Fokus sollte dabei auf der Förderung einer europaweit harmonisierten Förder- und Regulierungslandschaft liegen, um nationale Initiativen eng mit europäischen Vorhaben zu verzahnen und internationale Synergien optimal zu nutzen.

KI2 - Strategie und Zielsetzung: Verankerung von KI-basierter Wertschöpfung in organisatorischen Zielen, Governance und Anreizsystemen in der Wirtschaft.

Um das volle wirtschaftliche Potenzial von KI in der Wirtschaft auszuschöpfen, reicht es nicht aus, KI-Anwendungen technisch umzusetzen. Entscheidend ist die konsequente organisatorische Verankerung: Nur wenn KI in den strategischen Unternehmenszielen, den Governance-Strukturen und den Anreizsystemen fest verankert ist, können Unternehmen den Wert ihrer Investitionen maximieren.

Zunächst gilt es, KI als strategische Querschnittstechnologie in den langfristigen Geschäftsstrategien zu etablieren. Dies erfordert die Definition klarer, messbarer und verbindlicher Ziele – etwa in Bezug auf Effizienzsteigerungen, Qualitätsverbesserungen oder die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle. Dabei sollte der Einsatz von KI, insbesondere generativer KI, bereichsübergreifend gedacht werden, um Wertschöpfung entlang ganzer Wertschöpfungsketten zu ermöglichen.

Die Umsetzung kann von der Unterstützung bestehender Prozesse bis hin zu einem konsequenten „AI-First“-Ansatz reichen, bei dem Produkte, Services und Geschäftsmodelle grundlegend neu gestaltet werden. Auch wenn Ambitionsniveaus je nach Branche und Bereich variieren werden, ist es entscheidend, KI nicht nur punktuell, sondern strategisch und ganzheitlich einzusetzen.

Ein weiterer Erfolgsfaktor liegt in der Anpassung der Anreiz- und Steuerungssysteme. Relevante KPIs zur

KI-basierten Wertschöpfung sollten dort integriert werden, wo es sinnvoll ist – um Mitarbeiter zu motivieren, Innovation zu fördern und die Umsetzung regulatorischer wie auch ethischer Anforderungen zu sichern.

Bei der Auswahl und Priorisierung von KI-Anwendungen ist eine ganzheitliche Bewertung erforderlich. Diese sollte neben Automatisierungspotenzialen auch Wirtschaftlichkeit, Nutzerfreundlichkeit, Risiken und Abhängigkeiten über den gesamten Lebenszyklus hinweg berücksichtigen. Technologieoffenheit ist dabei ebenso wichtig wie die Einhaltung regulatorischer Vorgaben, etwa des EU AI Act, der bereits heute klare Anforderungen an die Industrie formuliert.

KI3 - Ökosystem-Infrastruktur: Gestaltung und Etablierung zugänglicher, wirksamer und investitionsfähiger Förderinstrumente für KI-Projekte.

Um Innovationen im Bereich Künstliche Intelligenz zu fördern und die Marktreife neuer Lösungen zu beschleunigen, sollte die Politik bestehende Förder- und Finanzierungsansätze gezielt weiterentwickeln. Drei zentrale Hebel stehen dabei im Vordergrund – steuerliche Anreize, spezialisierte Wagniskapitalstrukturen und die Rolle des Staates als Nachfrager. Sie sind nicht die einzigen Stellschrauben, aber besonders wirksam, um die Finanzierung von KI-Start-ups und Scale-ups zu stärken.

Erstens können steuerliche Anreize nach bewährten internationalen Vorbildern, etwa dem Enterprise Investment Scheme des Vereinigten Königreichs (EIS)¹⁷² oder dem französischen Crédit d'Impôt Recherche¹⁷³, eingeführt werden, um privates Kapital stärker zu mobilisieren. Ein steuerliches Fördermodell für Business-Angel-Investitionen, ergänzt durch Steuerfreiheit auf langfristige Gewinne, könnte private Investitionen in KI-Start-ups deutlich attraktiver machen.

Zweitens ist der gezielte Ausbau von Wagniskapitalstrukturen notwendig. Der Zukunftsfonds sollte durch spezialisierte Instrumente – insbesondere einen auf Deep Tech fokussierten Wachstumsfonds – weiterentwickelt werden, um die kritische Finanzierungsphase („Valley of Death“) für KI-Start-ups und Scale-ups zu überbrücken. Auf diese Weise ließe sich die Lücke zwischen frühem Seed-Kapital und großvolumigen internationalen Investoren schließen.

Drittens sollte der Staat eine aktivere Rolle als strategischer Nachfrager übernehmen. Durch gezielte Pilotprojekte in öffentlichen Einrichtungen, etwa in Verwaltung oder Gesundheitswesen, können Märkte für

¹⁷² UK Parliament (2023).

¹⁷³ RSM (2025).

Deep-Tech-KI-Lösungen frühzeitig geöffnet und Referenzprojekte geschaffen werden. Dies würde jungen Unternehmen zu früherem Cashflow verhelfen, Unsicherheiten bei Investoren reduzieren und die Skalierung erleichtern.

Die Industrie sollte diese Maßnahmen durch eigene Finanzierungsmodelle flankieren, um Projekte mit hohem Innovationspotenzial nachhaltig zu unterstützen und damit die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland im Bereich KI zu stärken.

KI4 - Ökosystem-Infrastruktur: Verbesserung der technischen Souveränität durch gezielten KI-Infrastrukturausbau.

Die Bundesregierung sollte gezielt in strategische KI-Infrastrukturen investieren, um technologische Abhängigkeiten zu reduzieren und die Unabhängigkeit Deutschlands und Europas nachhaltig zu stärken. Insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen ist der Bedarf an unabhängigen europäischen Lösungen groß. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, lassen sich mehrere zentrale Schwerpunkte benennen:

Ausbau der Recheninfrastruktur: Deutschland und Europa benötigen leistungsfähige Kapazitäten für das Training und den Betrieb großer KI-Modelle. Dazu zählen sowohl der weitere Ausbau europäischer Hochleistungsrechner als auch die Einrichtung spezialisierter KI-Rechenzentren („KI-Gigafabriken“). Während Hochleistungsrechner für wissenschaftliche Forschung unverzichtbar sind, bieten KI-Gigafabriken skalierte Rechenkapazitäten für kommerzielle KI-Anwendungen.

Förderung der Chip- und Hardwareproduktion: Um strategische Abhängigkeiten von globalen Marktführern zu reduzieren, ist die gezielte Förderung einer eigenständigen europäischen Chip- und Hardwareproduktion notwendig. Im Fokus stehen spezialisierte Prozessoren, Grafikchips und andere Schlüsselkomponenten, die für KI-Anwendungen essenziell sind.

Aufbau souveräner Netze und Energieinfrastruktur: Für die sichere Nutzung und Vernetzung von KI-Anwendungen bedarf es speziell konzipierter, souveräner Kommunikationsnetze. Ebenso entscheidend ist der Ausbau einer belastbaren Energieinfrastruktur, die wettbewerbsfähige und stabile Preise sicherstellt und zugleich das stark wachsende Energiebedürfnis energieintensiver KI-Anwendungen langfristig abdeckt.

Förderung von Open Source und algorithmischer Weiterentwicklung: Neben der Hardware ist auch die Softwarebasis entscheidend. Die Förderung offener, europäischer Open-Source-Lösungen schafft eine

unabhängige technologische Grundlage. Gleichzeitig sollte Deutschland gezielt in die Entwicklung neuer Algorithmen und Applikationen investieren, die auf bestehenden Open-Source-Modellen aufbauen.

KI5 - Ökosystem-Infrastruktur: Ausbau von offenen Datenplattformen und Industriedatenräumen.

Offene Datenplattformen stellen öffentlich zugängliche, maschinenlesbare Daten bereit und fördern Transparenz, Innovation und neue Geschäftsmodelle. Industriedatenräume hingegen ermöglichen den kontrollierten und souveränen Datenaustausch zwischen Unternehmen, um gemeinsame Wertschöpfung und Wettbewerbsvorteile zu schaffen. Beide Konzepte sind komplementär und können entscheidend dazu beitragen, die Entwicklung wettbewerbsfähiger KI-Modelle und KI-basierter Geschäftsmodelle in Europa voranzubringen.

Um dies zu erreichen, sollte Deutschland gezielt den Ausbau offener Datenplattformen fördern, nach internationalen Erfolgsmodellen ausgestalten und durch den Staat aktiv unterstützen. Beispiele wie Großbritanniens Open-Data-Portal oder Open Banking zeigen, dass einheitliche Standards, maschinenlesbare Formate und klare regulatorische Rahmenbedingungen die Grundlage für leistungsfähige offene Datenökosysteme bilden. Bestehende nationale Initiativen wie das GovData-Portal¹⁷⁴ sind dabei ein wichtiger erster Schritt, müssen jedoch konsequent weiterentwickelt werden. Ziel ist es, dass Behörden und Kommunen hochwertige Daten in nutzerfreundlicher und einheitlicher Form bereitstellen.

Gleichzeitig sollte ein Schwerpunkt auf dem Ausbau und der Vernetzung von Industriedatenräumen liegen. Gerade für das Training spezialisierter KI-Modelle für industrielle Anwendungen („Large Industry Models“) werden große Mengen an Produktions-, F&E- und Prozessdaten benötigt. Der Aufbau vertrauenswürdiger und interoperabler Datenräume kann diese Daten gezielt verfügbar machen und so einen strategischen Vorteil gegenüber globalen Wettbewerbern schaffen. Entscheidend ist, dass Datenhoheit und Souveränität der beteiligten Akteure gewahrt bleiben, um eine vertrauensvolle Zusammenarbeit zu ermöglichen. Hierfür gilt es, bestehende Initiativen – etwa innerhalb von Manufacturing-X – konsequent weiterzuentwickeln und ihre Anwendungsbreite zu vergrößern. Dabei sollte der tatsächliche Nutzen dieser Plattformen kontinuierlich evaluiert werden, um sicherzustellen, dass Fördermittel effizient eingesetzt werden und Strukturen nicht ohne ausreichende Wirkung langfristig bestehen bleiben.

¹⁷⁴ GovData (2025).

Damit diese Initiativen erfolgreich sind, ist auch die aktive Beteiligung von Industrie und Wissenschaft erforderlich. Unternehmen sollten relevante Daten beisteuern und die Ausgestaltung der Datenräume unterstützen, während Forschungseinrichtungen durch methodische Innovationen und technologische Expertise zur Weiterentwicklung beitragen.

Übergreifend gilt: Sowohl bei offenen Datenplattformen als auch bei Industriedatenräumen müssen Sicherheits- und Datenschutzaspekte von Anfang an berücksichtigt werden. Notwendig sind zudem einheitliche Standards, Interoperabilität, hohe Datenqualität sowie klare regulatorische Rahmenbedingungen, damit Daten zuverlässig und über Akteure hinweg nutzbar werden.

KI6 - Bildung und Fachkräfte: Förderung breit angelegter gesellschaftlicher KI-Bildung und gezielter Kampagnen zur Akzeptanzschaffung.

Bildung und gesellschaftliche Akzeptanz sind entscheidende Erfolgsfaktoren für den Einsatz von KI-Technologien, werden jedoch häufig unterschätzt. Deutschland sollte daher nicht nur in die Ausbildung von Fachkräften investieren, sondern auch den Mehrwert von KI für die gesamte Gesellschaft verständlich machen.

Kurzfristig eignen sich niedrigschwellige, breit zugängliche Online-Weiterbildungsangebote – etwa nach dem Vorbild der finnischen Initiative „Elements of AI“.¹⁷⁵ Ergänzend sind öffentliche Aufklärungs- und Informationskampagnen notwendig, die ein positives Bild von KI vermitteln, Ängste adressieren und anhand konkreter Anwendungsbeispiele aus Industrie und Gesellschaft den Nutzen von KI sichtbar machen.

Langfristig sollte KI-Bildung systematisch entlang der gesamten Bildungskette gestärkt werden – von der Schule über berufliche Ausbildung und Hochschule bis hin zur Weiterbildung für Berufstätige. So lassen sich frühzeitig Interesse und Akzeptanz fördern, gleichzeitig aber auch die Verfügbarkeit qualifizierter Fachkräfte erhöhen.

Industrie und Verbände können staatliche Bildungs- und Akzeptanzformate aktiv unterstützen, indem sie ihre Reichweite verstärken, eigene Weiterbildungsangebote bereitstellen und künftige Kompetenzanforderungen benennen. Die Wissenschaft trägt dazu bei, indem sie Inhalte für KI-Bildungsprogramme entwickelt und die Politik bei der Konzeption und Evaluation begleitet. Damit diese Initiativen Wirkung entfalten, sollten politische Entscheidungsträger Industrie- und Wissenschaftsexpertise kontinuierlich einbeziehen.

KI7 - Bildung und Fachkräfte: Verbesserung der deutschen Standortattraktivität für KI-Experten.

Für ein leistungsfähiges KI-Ökosystem braucht Deutschland ausreichend hochqualifizierte Fachkräfte entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Ein koordiniertes Maßnahmenpaket kann dem aktuellen Engpass begegnen und den Standort für deutsche wie internationale Experten attraktiver machen.

Wesentlich ist die gezielte Anwerbung internationaler Talente. Dazu müssen Visa- und Anerkennungsverfahren deutlich vereinfacht und beschleunigt werden, sodass Arbeitsgenehmigungen innerhalb weniger Wochen erteilt werden können. Internationale Erfolgsmodelle wie Kanadas „Global Talent Stream“¹⁷⁶ sollten dabei als Vorbild dienen. Derzeit stellen langwierige Verfahren ein zentrales Hindernis dar, insbesondere für kleinere Unternehmen ohne große Verwaltungskapazitäten. Vereinfachte Prozesse können hier kurzfristig helfen, qualifizierte Talente nach Deutschland zu holen.

Darüber hinaus sind strukturierte Rückholprogramme notwendig, um deutsche KI-Fachkräfte aus dem Ausland zurückzugewinnen. Initiativen wie die „German AI Fellows“ der Alexander von Humboldt-Stiftung können gezielt ausgebaut werden, ergänzt durch Stipendien, Umzugspakete oder Dual-Career-Angebote, um die Verfügbarkeit deutschsprachiger Fachkräfte zu erhöhen.

Schließlich braucht es attraktive Karriere- und Arbeitsmodelle, die Flexibilität und internationale Wettbewerbsfähigkeit sicherstellen. Ein erleichterter Wechsel zwischen Hochschulen, Industrie und Start-ups – ähnlich wie im britischen Hochschulsystem – kann die Dynamik des Ökosystems steigern. Ergänzend bieten innovative Shared-IP-Modelle Forschenden stärkere wirtschaftliche Anreize und tragen dazu bei, Deutschland als Standort für KI-Expertinnen und -Experten nachhaltig zu positionieren.

KI8 - Technologietransfer und -skalierung: Vereinfachung des Technologietransfers für KI durch Harmonisierung und Beseitigung rechtlicher und administrativer Hürden.

Damit exzellente Forschungsergebnisse schnell in wirtschaftliche und gesellschaftliche Anwendungen überführt werden können, müssen rechtliche und administrative Rahmenbedingungen für den Technologietransfer erheblich vereinfacht und vereinheitlicht werden. Andernfalls drohen Potenziale ungenutzt zu bleiben und internationale Wettbewerber Deutschland abzuhängen.

¹⁷⁵ University of Helsinki (2023).

¹⁷⁶ Government of Canada (2025).

Ein wesentlicher Ansatzpunkt ist die Erleichterung und Beschleunigung von Ausgründungen aus Hochschulen und Forschungsinstituten. Dazu gehört der Abbau bürokratischer Hürden, beispielsweise durch digitale Antragsverfahren und transparente, einheitliche Vorgaben für Ausgründungsprozesse. Klare und praxistaugliche Strukturen sind notwendig, um Gründungen planbar und attraktiv zu machen.

Besonders zentral ist außerdem der Umgang mit geistigem Eigentum (IP). Uneinheitliche Regelungen und langwierige Verhandlungen stellen aktuell große Hürden für KI-Ausgründungen dar. Erforderlich ist eine bundesweit harmonisierte Ausgestaltung von IP-Regelungen, die auf die Spezifika von KI zugeschnitten ist. Ob Software, Algorithmen, Datenmodelle oder Prozessdesigns – je nach Innovationscharakter müssen unterschiedliche Schutz- und Transfermodelle Anwendung finden. Für bisher nicht patentfähige KI-Innovationen, insbesondere softwarebasierte Lösungen, sind dabei dedizierte Förder- und Verwertungsstrategien erforderlich, um deren wirtschaftliches Potenzial nicht zu vernachlässigen. Überdies muss der IP-Rechtsrahmen als Bestandteil einer übergeordneten nationalen IP-Strategie (vgl. Kapitel 7 „Übergreifende Handlungsempfehlungen“) mit den technischen Entwicklungen mitgeführt werden und auch Innovationen in neuen Technikgebieten erfassen können, beispielsweise durch eine progressive Handhabung des offenen Technikbegriffs im Patentrecht.

Schließlich ist eine stärkere Durchlässigkeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft erforderlich. Starre Karrierewege und unklare rechtliche Rahmenbedingungen erschweren heute den Wechsel von KI-Forschenden in die Industrie oder in eigene Gründungen. Politik und Institutionen sollten daher rechtliche Voraussetzungen schaffen, die flexiblere Übergänge ermöglichen und Karrieremodelle etablieren, die den Transfer in die Praxis nicht hemmen, sondern fördern.

Nur wenn rechtliche, organisatorische und institutionelle Hürden konsequent abgebaut und bundesweit vereinheitlicht werden, kann aus exzellenter KI-Forschung nachhaltige wirtschaftliche Wertschöpfung entstehen.

KI9 - Kooperation: Ausbau der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Deep-Tech-KI Start-ups.

Um die Entwicklung und Anwendung innovativer KI-Lösungen zu beschleunigen, sollte die Zusammenarbeit zwischen etablierten Industrieunternehmen und Deep-Tech-KI-Start-ups systematisch gestärkt werden. Entscheidend ist, dass Kooperationen nicht punktuell bleiben, sondern den gesamten Innovationszyklus abdecken – von Forschung und Entwicklung über Pilotprojekte bis hin zur Markteinführung. Geeignete Inst-

umente sind Corporate Venturing, Co-Creation-Modelle und strategische Partnerschaften, die einen kontinuierlichen Wissenstransfer und die gemeinsame Entwicklung praxisnaher Anwendungen ermöglichen. So können Start-ups ihre Innovationskraft einbringen, während Industrieunternehmen Skalierungserfahrung, Marktzugang, Daten und reale Anwendungsfelder bereitstellen.

Um diese Potenziale zu heben, braucht es gezielte politische Unterstützung in Form risikoteilender Förderinstrumente. Pilot- und Erprobungsprojekte sollten so ausgestaltet werden, dass sie Unsicherheiten in frühen Phasen abfedern und gleichzeitig attraktive Rahmenbedingungen für Start-ups wie auch große Industrieakteure schaffen. Besonders bei kapitalintensiven Deep-Tech-KI-Innovationen, die häufig auch Hardware-Komponenten umfassen, sind solche Formate entscheidend, um die Validierung und Skalierung neuer Lösungen zu ermöglichen (vgl. Kapitel 4 „KI-basierte Robotik“). Industrieunternehmen sind dabei gefordert, sich nicht nur finanziell, sondern auch operativ einzubringen – etwa durch strukturelle Integration in Entwicklungsprozesse, Datenbereitstellung oder gemeinsame Produktentwicklung. Forschungseinrichtungen können diese Prozesse flankieren, indem sie methodische Expertise und technologische Innovationen beisteuern.

KI10 - Kooperation: Aufbau von Technologie-Hubs zur Skalierung und Integration von KI-Forschungsclustern.

Um die internationale Wettbewerbsfähigkeit im Bereich KI zu stärken, sollte Deutschland bestehende regionale Cluster und Initiativen zu wenigen, schlagkräftigen Technologie-Hubs zusammenführen. Diese Hubs bündeln wissenschaftliche Exzellenz, industrielle Stärke, Start-ups und Investoren und überwinden damit die heutige Fragmentierung. Durch die Konzentration entstehen Skaleneffekte, eine effizientere Nutzung von Ressourcen und kritische Massen an Know-how, Talenten und Kapital, die in kleinen, isolierten Strukturen nicht erreichbar sind.

Ihre Rolle geht über die reine Vernetzung hinaus: Technologie-Hubs müssen als Brücken zwischen Forschung und Anwendung dienen. In praxisnahen Umgebungen können dort neue KI-Lösungen entwickelt, validiert und skaliert werden. Gleichzeitig schaffen sie den Rahmen, um gemeinsame Standards zu etablieren, sektorübergreifende Kooperationen zu fördern und so die Integration von KI in industrielle Prozesse zu beschleunigen.

Für die Umsetzung braucht es ein abgestimmtes Zusammenspiel von Wissenschaft, Industrie und Politik. Forschungseinrichtungen können die operative Trä-

gerschaft übernehmen und methodische Expertise einbringen, während Unternehmen konkrete Anwendungsfelder, Daten und Marktzugang beisteuern. Führende bestehende Cluster können als Grundlage genutzt und gezielt erweitert werden.

KI11 - Kooperation: Intensivierung der Kooperation zwischen Industrie und Wissenschaft zur Entwicklung anwendungsbezogener KI-Lösungen.

Deutschland sollte die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft deutlich intensivieren, um KI-Lösungen mit hohem praktischem Nutzen zu entwickeln. Entscheidend ist, dass Unternehmen frühzeitig konkrete Problemstellungen, Daten und Anwendungsfelder einbringen, während Forschungseinrichtungen methodische Expertise, neue Algorithmen und wissenschaftliche Tiefe beisteuern. So können praxisnahe Fragestellungen systematisch adressiert und innovative Lösungen geschaffen werden, die technologisch fundiert sind und gleichzeitig messbaren Mehrwert für Wirtschaft und Gesellschaft liefern.

Eine besondere Rolle spielen dabei Einrichtungen wie das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) und das Berlin Institute for the Foundations of Learning and Data (BIFOLD), die Grundlagenforschung mit Anwendungsnähe verbinden und als Brückenbauer zwischen beiden Seiten fungieren. Erfolgsentscheidend ist die enge Verzahnung bereits in frühen Forschungsphasen – etwa durch Innovationspartnerschaften, kooperative Forschungsprojekte oder staatlich kofinanzierte Pilot- und Demonstrationsvorhaben in Schlüsselbereichen wie intelligente Fertigung, Gesundheit oder Mobilität. Industriepartner bringen Marktzugang, Infrastrukturen und reale Einsatzbedingungen ein, während die Forschung sicherstellt, dass Lösungen in hoher Qualität entwickelt und weiterentwickelt werden.

Um diese Zusammenarbeit dauerhaft wirksam zu gestalten, braucht es langfristige Partnerschaften und gezielte politische Unterstützung. Förderinstrumente, die frühe Prototypenentwicklung und Demonstrationsprojekte ermöglichen, die Reduzierung administrativer Hürden sowie geeignete regulatorische Rahmenbedingungen sind entscheidend, um Forschung und Anwendung enger zu verzahnen und die Skalierung neuer KI-Lösungen in Deutschland zu beschleunigen.

KI12 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Etablierung regulatorischer Experimentierräume für die Anwendung künstlicher Intelligenz.

Deutschland sollte gezielt regulatorische Experimentierräume einrichten, um die Entwicklung und Skalierung neuer KI-Anwendungen deutlich zu beschleunigen. Durch temporäre Sonderzonen („Acceleration-Zones“) mit vereinfachten regulatorischen Anforderungen und klar definierten rechtlichen Freiräumen können Start-ups und Industrieunternehmen KI-Innovationen schneller zur Marktreife führen. Internationale Vorbilder wie Großbritannien (mit durchschnittlich 40 % schnellerer Marktreife durch Sandboxes) oder Singapur (mit sektoralen Sandboxes und KI-Testplattformen wie „AI Verify“) unterstreichen das Potenzial solcher Ansätze. Sie zeigen, dass Regulierungsbehörden produktiv und serviceorientiert mit Unternehmen zusammenarbeiten können, um die Einhaltung regulatorischer Vorgaben effizienter zu gestalten.

¹⁷⁷ OECD (2023b).

¹⁷⁸ AI Verify Foundation (2023).

4. KI-basierte Robotik: Führungsrolle durch Ausbau von Kompetenzen und Infrastruktur sichern

4.1. Executive Summary und Kernbotschaften für KI-basierte Robotik

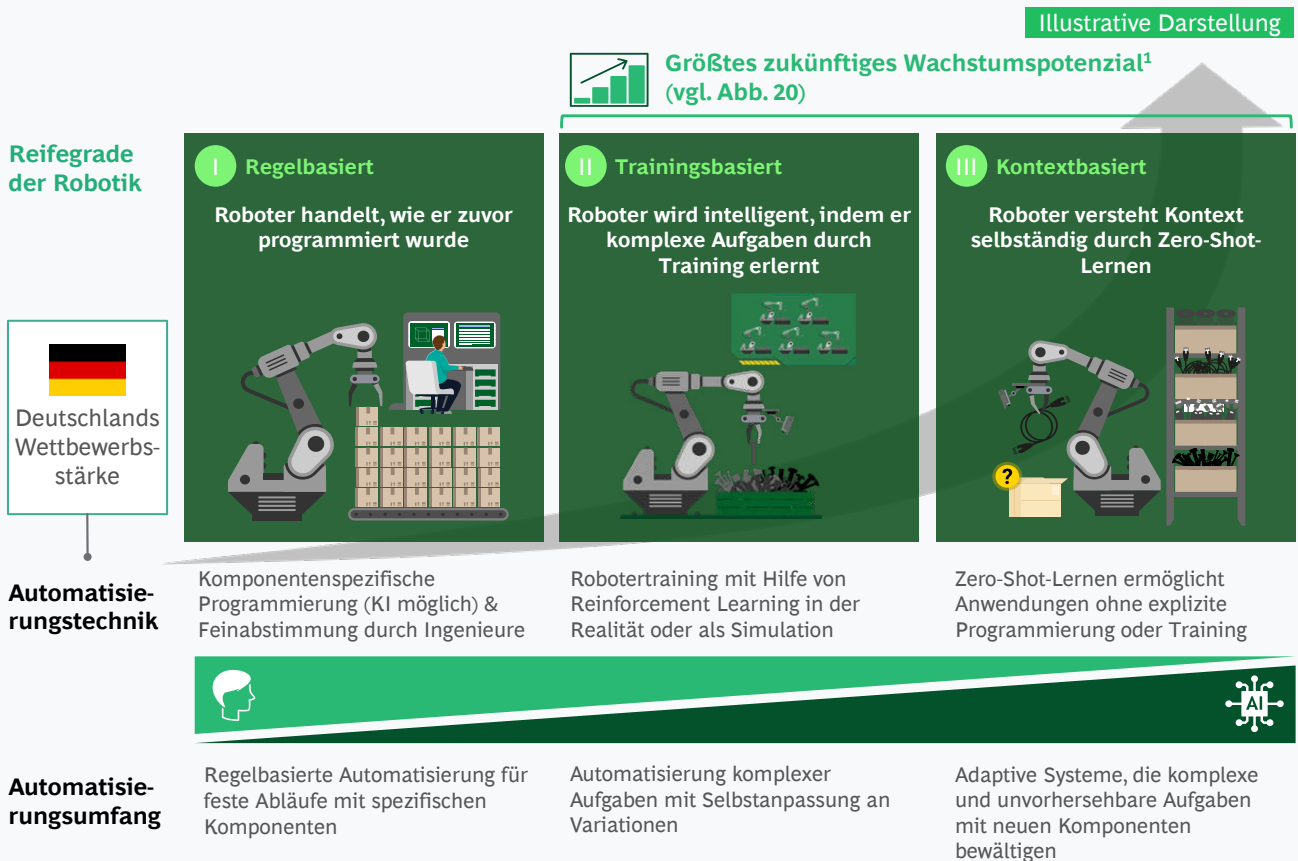
Die Entwicklung der Robotik ist eng mit dem Fortschritt der Künstlichen Intelligenz (KI) verknüpft, da diese sowohl die Intelligenz als auch die physischen Fähigkeiten von Robotern maßgeblich prägt. Viele klassische Einsatzgebiete in der Industrie – etwa das Schweißen am Fließband in der Automobilproduktion – nutzen eine **regelbasierte** Steuerung, die deterministisches Verhalten erzeugt und damit für stabile, kontrollierte Umgebungen geeignet ist (vgl. Abb. 15). Die Ergänzung **trainingsbasierter** Ansätze wie (Deep) Reinforcement Learning ([D]RL) ermöglicht probabilistisches Agieren. Dadurch können Roboter auch in dynamischen, komplexen Kontexten eingesetzt werden, die sich einer expliziten Programmierung entziehen – beispielsweise beim Bin-Picking¹⁷⁹, in flexiblen Montageprozessen oder bei der Handhabung weicher Materialien, die visuelle Wahrnehmung, Anpassungsfähigkeit sowie geschickte Manipulation erfordern.

Durch den rasanten Fortschritt der KI, insbesondere im Bereich (generativer) Grundlagenmodelle, steht auch die Robotik vor einem signifikanten Entwicklungsschub. „Robotic Foundation Models“ (RFMs) und „World Models“ könnten durch verbesserte generative Planungsfähigkeiten die Einsatzmöglichkeiten trainingsbasierter Robotik deutlich erweitern, etwa in Serviceumgebungen (z. B. Krankenhäuser) oder privaten Haushalten. Darüber hinaus eröffnen KI-getriebene Entwicklungen in der Deep-Tech-Robotikforschung neue Perspektiven für **kontextbasierte** Ansätze und könnten langfristig mit Hilfe von Zero-Shot-Lernen und logischem Schlussfolgern („Reasoning“)¹⁸⁰ den Weg zu allgemein einsetzbaren humanoiden Robotern ebnen.

¹⁷⁹ „Bin-Picking“ bezeichnet ein komplexeres Szenario, bei dem Roboter ungeordnete Objekte aus Behältern („Bins“) greifen und sortieren müssen, was fortgeschrittene Objekterkennung und flexible Bewegungsplanung erfordert.

¹⁸⁰ Die Fähigkeit eines KI-Systems, aus bekannten Informationen neue Schlüsse abzuleiten, ähnlich wie Menschen das durch Nachdenken tun.

ABBILDUNG 15 | Weiterentwicklung der KI-Robotik verringert Deutschlands Wettbewerbsvorteile



1. Marktpotenzialszenario Stand August 2025; exkl. humanoider Robotik
Quelle: Robotics Market Model 2025; IFR 2024; Interact Analysis; Industriereports; Experteninterviews

Durch die absehbaren neuen Einsatzfelder gewinnt die Robotik kontinuierlich an strategischer Bedeutung für wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Wachstum. So könnten innovative Anwendungen dazu beitragen, zentrale strukturelle Herausforderungen in Deutschland zu adressieren – etwa den Fachkräftemangel, die alternde Erwerbsbevölkerung oder den steigenden internationalen Kostendruck. Selbst ohne bahnbrechende Fortschritte in der humanoiden Robotik (einem Teilgebiet der trainings- und kontextbasierten Robotik) dürfte der weltweite Robotikmarkt von rund 30 Mrd. € im Jahr 2024 bis 2030 auf 70 Mrd. € wachsen und sich damit mehr als verdoppeln¹⁸¹ (vgl. Abb. 20). Das stärkste Wachstum von bis zu 19 % pro Jahr wird in der trainingsbasierten Robotik erwartet, vor allem getrieben durch den Einsatz flexibler Robotik in neuen Anwendungsfeldern, insbesondere im Professional-Service-Kontext und im Haushalt. Sollten zusätzliche Fortschritte in der humanoiden Robotik gelingen, könnte der Markt bis 2030 um weitere 9 bis 18 Mrd. € wachsen, ebenfalls mit dem größten Anteil im Service- und Verbrauchermarkt.

Deutschland verfügt mit weltweit führenden Unternehmen und Universitäten über eine starke Ausgangslage im Hardwarebereich und in der Automatisierungstechnik. Diese historische Stärke verliert jedoch in der Deep-Tech-Robotik an Gewicht, da die entscheidende Differenzierung zunehmend durch Software, KI und deren Integration erfolgt – Bereiche, in denen andere Länder wie die USA, China und Südkorea führend sind. Um seine Rolle in der Robotik langfristig zu sichern, muss Deutschland daher entschlossen in den Aufbau entsprechender Kompetenzen investieren.

Erfolg in der Deep-Tech-Robotik ist zudem ein Infrastrukturthema. Er erfordert eine hochspezialisierte, offene und kompatible Basis, die Spitzenforschung und Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht. Dazu gehören Testräume, Plattformen, interdisziplinäre Forschungszentren mit Transferorientierung, standardisierte Komponenten und Normen, ein leistungsfähiges Datenökosystem sowie rechtliche Rahmenbedingungen, die ethische Aspekte und menschenzentrierte Prinzipien berücksichtigen. Um dies in Deutschland zu realisieren,

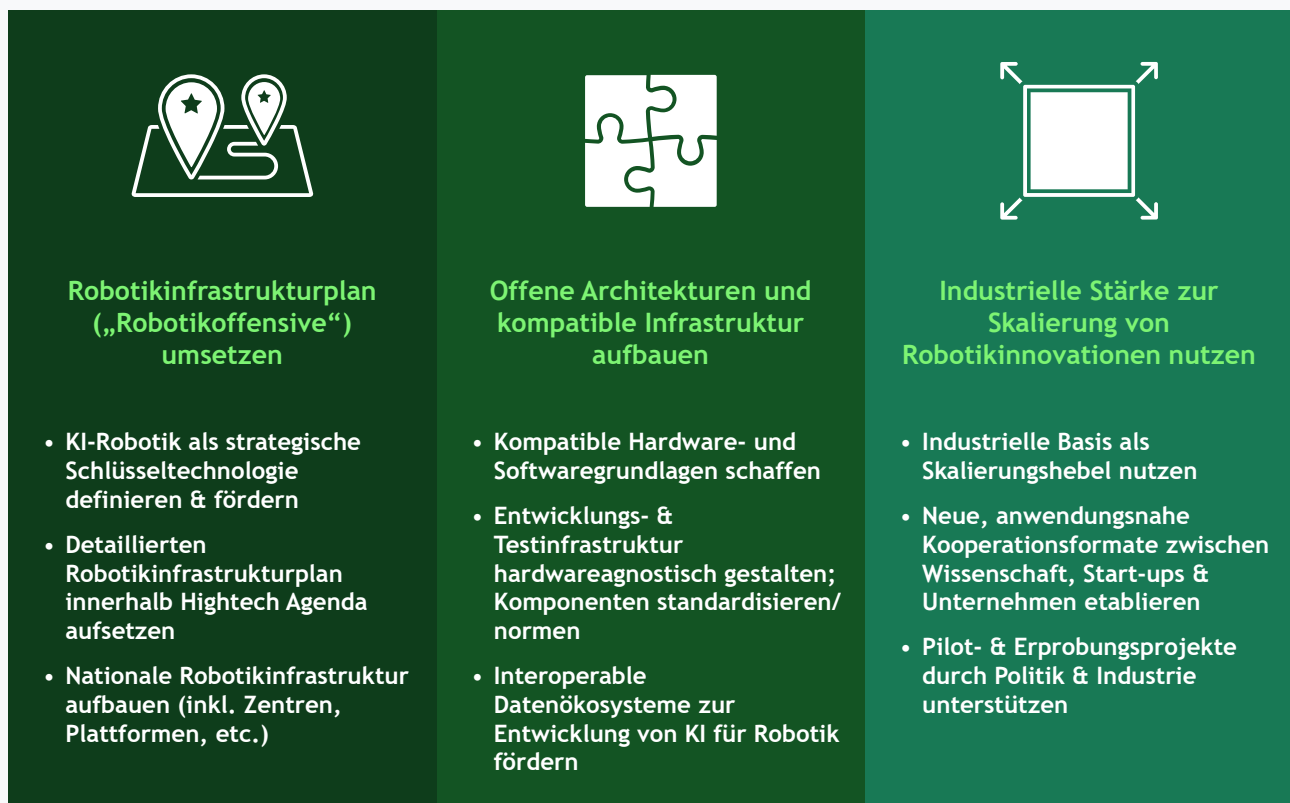
¹⁸¹ Robotics Market Model 2025; IFR 2024; Interact Analysis; Industriereports; Experteninterviews; exkl. humanoider Robotik.

braucht es Strukturen, die große, koordinierte Infrastrukturvorhaben ermöglichen – über die heutige fragmentierte Förderlandschaft hinaus.

Die Bundesregierung hat mit der im Juli 2025 verabschiedeten Hightech Agenda Deutschland erste Weichen gestellt. Sie bildet einen wichtigen Auftakt, indem sie Robotik im Rahmen einer umfassenderen KI-Strategie berücksichtigt. Um das wirtschaftliche Potenzial dieser Technologie jedoch voll auszuschöpfen, sollte der Fokus auf KI-gestützte Robotik deutlich vertieft und Robotik als eigenständiges strategisches Handlungsfeld mit einer klar definierten Umsetzungsagenda etabliert werden.

Die vorliegende Studie erarbeitet technologiespezifische Handlungsempfehlungen (vgl. Abb. 21) für eine solche Umsetzungsagenda. Aus diesen detaillierten Empfehlungen ergeben sich drei strategische Prioritäten für Deutschland:

ABBILDUNG 16 | Drei Kernprioritäten für Deutschlands Zukunft im Bereich KI-gestützte Robotik



Quelle: BCG-Analyse

1. Robotikinfrastrukturplan („Robotikoffensive“)

umsetzen: KI-gestützte Robotik sollte aufgrund ihrer zentralen Bedeutung für die künftige industrieübergreifende Wettbewerbsfähigkeit und die Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen als strategische Schlüsseltechnologie gefördert werden. Dafür braucht es einen klaren, in die Hightech Agenda eingebetteten, Infrastrukturplan, der technologiespezifische Maßnahmen, langfristige Investitionen und konkrete Umsetzungsschritte umfasst.

2. Offene Architekturen und kompatible Infrastruktur

aufbauen: Für effiziente Forschung sowie Entwicklung und Skalierung entlang der gesamten Robotikwertschöpfungskette – einschließlich der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Start-ups und Industrie – braucht es offene und kompatible Hardware- und Softwaregrundlagen. Dazu gehören eine hardwareagnostische Entwicklungs- und Testinfrastruktur, standardisierte Komponenten und Normen sowie interoperable Datenökosysteme für die Weiterentwicklung von Software und KI. Die Umsetzung erfordert gezielte politische Anreize und eine koordinierte Zusammenarbeit relevanter Akteursgruppen auf nationaler und europäischer Ebene.

3. Industrielle Stärke zur Skalierung von Robotikinnovationen nutzen:

Um Robotikinnovationen schneller in die Anwendung zu bringen, muss die starke industrielle Basis Deutschlands gezielt als Skalierungshebel eingesetzt werden. Dafür werden neue Kooperationsformate zwischen Wissenschaft, Start-ups und etablierten Unternehmen benötigt, die technologieoffen und praxisnah auf konkrete industrielle Anwendungen ausgerichtet sind. Risikoteilende Pilot- und Erprobungsprojekte sollten dabei von Politik und Industrie gefördert werden, um die frühzeitige Validierung und Skalierung neuer Lösungen zu ermöglichen. Große Industrieakteure bringen Marktzugang, Infrastrukturen und reale Anwendungsfelder ein, während Start-ups ihre Innovationskraft und Forschungseinrichtungen ihre technologische Expertise beitragen.

4.2. Definition, Reifegrad und strategische Relevanz

KI gilt als Schlüsselfaktor für die technologische und wirtschaftliche Zukunft Europas. Aufbauend darauf nimmt dieses Kapitel gezielt die KI-basierte Robotik in den Blick – ein Anwendungsfeld, das nicht nur von hoher wirtschaftlicher Relevanz ist, sondern auch erhebliche industriepolitische Hebel bietet. Die zentralen Erkenntnisse zum Thema KI aus dem vorherigen Kapitel – von Chancen über Herausforderungen bis hin zu konkreten Empfehlungen – treffen in weiten Teilen auch auf den Robotikeinsatz zu.

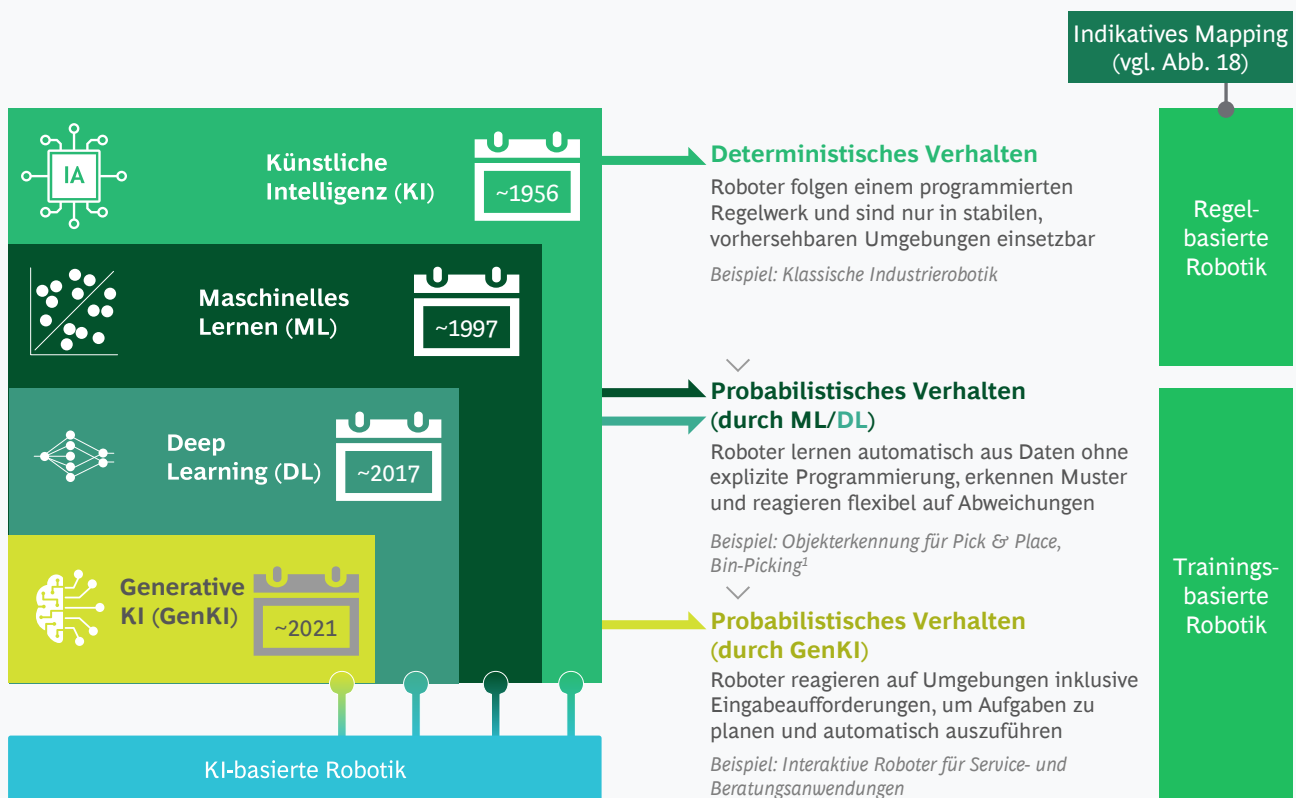
Gerade für einen hochindustrialisierten Standort wie Deutschland, dessen wirtschaftliche Stärke maßgeblich auf technologiebasierter Produktionskompetenz beruht, ist eine eigenständige Betrachtung jedoch unerlässlich. Ziel dieses Kapitels ist es daher, die robotikspezifischen Anforderungen, Handlungsempfehlungen und politischen Implikationen im Kontext der deutschen Deep-Tech-Strategie zu beleuchten.

Die Integration von KI in robotische Systeme erweitert grundlegend die Einsatzmöglichkeiten und Leistungsfähigkeit der Robotik (vgl. Abb. 17). Ursprüngliche Robotersteuerungen waren **regelbasiert** und handelten vollständig deterministisch nach fest einprogrammierten Anweisungen. Dadurch konnten sie nur in kontrollierten, stabilen Umgebungen zuverlässig eingesetzt werden – etwa in der klassischen Industrierobotik. Der Einsatz von ML und insbesondere DL erlaubt es Robotern zunehmend, **probabilistisch** zu agieren: Sie greifen auf vorab trainierte KI-Modelle zurück, die aus großen Mengen an Sensordaten gelernt haben. Dies ermöglicht es den Robotern, Muster zu erkennen, und ihr Verhalten dynamisch an komplexe und variable Situationen anzupassen, beispielsweise bei der Objekterkennung für Pick & Place¹⁸² oder Bin-Picking¹⁸³. Aktuell steht die Robotik an der Schwelle zu einer weiteren bedeutenden Evolutionsstufe: Durch GenKI und die Entwicklung neuer Grundlagenmodelle (z.B. RFMs) erweitern Roboter ihre Fähigkeit, Aufgaben eigenständig und kontextbezogen zu planen und auszuführen – auch unter unsicheren Bedingungen oder bei offenen, komplexen Problemstellungen.

¹⁸² „Pick & Place“ beschreibt Robotikanwendungen, bei denen Objekte automatisiert aufgenommen (Pick) und an einer definierten Position abgelegt (Place) werden.

¹⁸³ „Bin-Picking“ bezeichnet ein komplexeres Szenario, bei dem Roboter ungeordnete Objekte aus Behältern („Bins“) greifen und sortieren müssen, was fortgeschrittene Objekterkennung und flexible Bewegungsplanung erfordert.

ABBILDUNG 17 | Fortschritte in der KI transformieren die Möglichkeiten der Robotik



1. „Pick & Place“ beschreibt Robotikanwendungen, bei denen Objekte automatisiert aufgenommen („Pick“) und an einer definierten Position abgelegt („Place“) werden; „Bin-Picking“ bezeichnet ein komplexeres Szenario, bei dem Roboter ungeordnete Objekte aus Behältern („Bins“) greifen und sortieren müssen.
Quelle: BCG-Analyse

Damit stellt KI-basierte Robotik ein zentrales Innovationsfeld dar, das nicht nur bestehende, manuelle Industrieprozesse transformieren kann, sondern der Robotik auch völlig neue Anwendungen ermöglicht. Sie bildet eine essenzielle Brücke zwischen KI und physischem Handeln in der realen Welt – insbesondere in der Industrie, aber auch darüber hinaus.

Wie Abbildung 18 zeigt, lassen sich entlang dieser technologischen Entwicklung **drei grundlegende Kategorien von Robotersystemen** unterscheiden, die jeweils einen unterschiedlichen Reifegrad und eine spezifische Anwendbarkeit aufweisen: regelbasiert, trainingsbasiert und kontextbasiert. Während **regelbasierte Robotik** bereits vielseitige etablierte Anwendungen in der Industrie hat, befindet sich die **kontextbasierte Robotik** noch in einer frühen Entwicklungsphase und ist entsprechend dem Deep-Tech-Bereich zuzuordnen. Die **trainingsbasierte Robotik** liegt im Reifegrad dazwischen: Sie verfügt bereits über







zahlreiche erprobte, wertschöpfende Anwendungen in verschiedensten Bereichen, deren Zahl stetig zunimmt – getrieben durch Fortschritte in der KI und deren Integration in die Robotik.

- **Regelbasierte Roboter** zeichnen sich durch vollständig deterministisches, im Vorfeld programmiertes Verhalten aus und führen vorab festgelegte Aktionssequenzen mit höchster Genauigkeit und minimalen Abweichungen aus. Sie sind regelbasiert programmiert und haben traditionell den höchsten Reifegrad erreicht – mit jahrzehntelang bewährten industriellen Anwendungen in stabilen, kontrollierten Umgebungen. Dennoch gewinnt KI auch in diesem Bereich zunehmend an Bedeutung, insbesondere zur Steigerung von Energieeffizienz und Zeitersparnis bei der Optimierung komplexer Produktionsabläufe. Typische Einsatzbereiche sind die Elektronikfertigung, die pharmazeutische Produktion und Mikromontage.

- **Trainingsbasierte Roboter** nutzen verstärkt KI-Technologien, um auch Aufgaben durchführen zu können, die Anpassungsfähigkeit erfordern. Dabei erlernt der Roboter diese Aufgaben mittels **Reinforcement Learning**¹⁸⁴ entweder in der Realität oder in Simulationen und kann erlernte Abläufe an Variationen in der Umgebung selbstständig anpassen. Sein Handeln ist nicht mehr vollständig deterministisch, sondern weist probabilistische Elemente auf. Während einige dieser Robotertypen bereits weitgehend ausgereift sind, entstehen mit fortschreitender technologischer Entwicklung kontinuierlich neue Anwendungsfelder. Typische Einsatzbereiche sind komplexe und flexible Montageprozesse, Bin-Picking, adaptive Produktionslinien in der Fertigung sowie Lagermanagement in der Logistik.
- **Kontextbasierte Roboter** stellen die nächste Generation KI-basierter Robotik dar. Sie repräsentieren eine visionäre Kategorie intelligenter robotischer Systeme, die zunehmend selbstständig handeln und Entscheidungen treffen können. Neue Konzepte erlernen sie durch Beobachtung. Diese Systeme befinden sich aktuell in Test- und Demonstrationsphasen und sind in der Lage, komplexe Aufgaben kontextbezogen zu planen und auszuführen, auch in dynamischen, offenen Umgebungen. Potenzielle Einsatzbereiche sind die Pflege und medizinische Unterstützung sowie autonome Wartung und Inspektion.

¹⁸⁴ Reinforcement Learning (RL): Lernmethode, bei der durch Ausprobieren („Trial and Error“) in einer Umgebung eine Handlungsstrategie erlernt wird.

ABBILDUNG 18 | Evolutionsstufen der Robotik – Fünf Schritte zur physischen Intelligenz

	Regelbasiert	Trainingsbasiert Anwendungsspezifisch			Kontextbasiert „General purpose“	
	 Beispielhafte Abbildungen					
	Regelbasiert	Visuelle Wahrnehmung	Geschickte Manipulation	Ablaufplanung	Schlussfolgern („Reasoning“)	
Reifegrad	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	
Merkmale	<ul style="list-style-type: none">• Aufgaben werden im Voraus explizit in DSL¹ programmiert• Roboter wiederholt eine statische, vorab festgelegte Aktionssequenz	<ul style="list-style-type: none">• Aufgaben erfordern Anpassungsfähigkeit aufgrund variierender Objektlagen• KI-Vision-Modelle ermöglichen 6D-Lageerkennung beliebiger Objektgeometrien	<ul style="list-style-type: none">• Handhabungsaufgaben sind zu vielseitig und komplex für explizite Programmierung• Aufgabenspezifische Verhaltensweisen trainiert auf von Menschen erzeugten und/oder synthetischen Daten	<ul style="list-style-type: none">• Aufgaben werden dynamisch in eine Abfolge von Aktionen überführt• Ausführung spezifischer Aufgaben in unbekannten Umgebungen (innerhalb vertrauter Raumkategorien)	<ul style="list-style-type: none">• Begründet Handlungen und führt beliebige Aufgaben mit Situationsbewusstsein und Verständnis aus• Lernt neue Konzepte durch Beobachtung und autonome Ausführung von Aufgaben	
Beispielanwendungen	<ul style="list-style-type: none">• Lichtbogen-schweißen auf einer Automobilfertigungslinie• Lager-Robotiklösungen mit fest vorgegebenen Pfaden/Prozessen	<ul style="list-style-type: none">• „Bin-picking“• Flexible Montage• Flexible Ware-zu-Person-Systeme	<ul style="list-style-type: none">• Kontaktintensive Montage• Manipulation weicher Objekte (z. B. Imitation-lernen beim Falten von Stoffen)	<ul style="list-style-type: none">• Nutzer bittet den Roboter, die Spülmaschine zu beladen• Roboter liefert Essen in einer unbekannten Krankenhausumgebung	<ul style="list-style-type: none">• „General-purpose“ Haushaltsassistent• „General-purpose“ professioneller Krankenhaus-Assistent	

1. DSL = Domänenspezifische Sprache (Domain-specific language)
Quelle: Unternehmensangaben; BCG-Analyse

Humanoide Roboter – eine spezielle Ausprägung trainings- und kontextbasierter Robotik – nehmen innerhalb der Robotikentwicklung eine Sonderstellung ein. Sie profitieren nicht nur von KI, sondern treiben zugleich die KI-Entwicklung maßgeblich voran. Insbesondere im Bereich Vision-Language-Action stimulieren und validieren humanoide Systeme neue KI-Ansätze. Grund hierfür ist nicht nur ihr menschlicher Formfaktor, der es erlaubt, Roboter durch Beobachtung und Nachahmung menschlicher Aktivitäten effektiv zu trainieren – etwa mit Hilfe von Sensoranzügen oder durch die Analyse frei verfügbarer Videodaten. Entscheidend ist auch das enorme Potenzial: Humanoide Roboter könnten perspektivisch überall dort eingesetzt werden, wo heute Menschen arbeiten – ohne Anpassung der Umgebung. Die Fähigkeit in komplexen, realen Umgebungen sicher und verlässlich zu agieren, stellt jedoch derzeit noch eine zentrale Herausforderung in der Robotikforschung dar.

Exkurs: Technische Grundlagen der kontextbasierten Robotik

Die Forschung und Entwicklung in der kontextbasierten Robotik beruht im Wesentlichen auf drei unterschiedlichen Trainingsansätzen – Soft-body Simulation, RFMs und World Models:

- **Soft-body Simulation** ermöglicht es Robotern, KI-gestützt komplexe Manipulationsaufgaben mit verformbaren, weichen oder fragilen Objekten durchzuführen. Dabei simulieren die Systeme Kräfte und Momente, um menschenähnliche Geschicklichkeit bei adaptiven Handhabungen zu erlernen – Fähigkeiten, die bisherigen robotischen Systemen weitgehend verschlossen blieben.
- **RFMs** beschreiben großskalige, vortrainierte KI-Modelle, die mit umfangreichen und multimodalen Datensätzen (inklusive Text, Bildern und Videos) trainiert werden, um dynamisch Aktionen für Roboter zu generieren. Diese Modelle ermöglichen eine ausgeprägte Wahrnehmungsfähigkeit – selbst in unbekannten Umgebungen – und können die exakte Position und Orientierung (6D-Pose) beliebiger Objekte erkennen. Aktuelle, auf generativen Ansätzen basierende Modelle verfügen jedoch nur über begrenzte Planungs- und

Entscheidungsfähigkeiten. Zudem bleibt die begrenzte Existenz und Verfügbarkeit geeigneter Trainingsdaten eine zentrale Herausforderung für den Fortschritt der RFM-Entwicklung.

- **World Models** sind KI-gestützte Modelle, die physikalische Zusammenhänge, Eigenschaften sowie zeitliche Abläufe und Konsequenzen erfassen und vorhersagen können. Dadurch erhalten Roboter die Fähigkeit, autonom zu planen, zu schlussfolgern und ihre Abläufe flexibel an veränderte Umgebungen anzupassen.

Gemeinsam bilden diese drei Bausteine die Grundlage für die nächste Generation der Robotik: autonome Systeme, die sicher, flexibel und zuverlässig in komplexen realen Umgebungen agieren können. Sie sind zugleich eine Schlüsselvoraussetzung für „Industrielle KI“, verstanden als die systematische Anwendung künstlicher Intelligenz in industriellen Produktions- und Geschäftsprozessen.

Strategische Relevanz

Robotik zählt zu den strategisch bedeutendsten Schlüsseltechnologien der kommenden Dekade. Ihre strategische Bedeutung für Deutschland ergibt sich insbesondere aus ihrer Rolle als Antwort auf zentrale gesellschaftliche und wirtschaftliche Herausforderungen: **demografischer Wandel, Fachkräftemangel und technologische Souveränität.**

Angesichts einer alternden Gesellschaft und rückläufiger Geburtenraten – verbunden mit einem prognostizierten Rückgang der erwerbsfähigen Bevölkerung um fast sieben Millionen bis 2070 – wird die Automatisierung industrieller und logistischer Prozesse zunehmend unverzichtbar, um langfristig **Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.**¹⁸⁵ Bereits heute fehlen in Deutschland rund 1,7 Millionen Arbeitskräfte.^{186,187} Besonders in Branchen mit hohem Personalbedarf und anspruchsvollen Arbeitsbedingungen – etwa in der Bauwirtschaft, Intralogistik oder Landwirtschaft – bietet KI-basierte Robotik eine vielversprechende Möglichkeit, physische Arbeit zu automatisieren und menschliche Arbeitskraft gezielt zu ergänzen (z. B. durch kollaborative oder mobile Roboter). Laut aktuellen Studien lassen sich bereits heute die Betriebskosten in der Logistik durch den Einsatz von Robotik um bis zu 40 % senken und die Produktivität um 25 % bis 70 % steigern.¹⁸⁸ Geht man davon aus, dass ein Roboter in zwei täglichen Schichten eingesetzt wird, kann sich die Investition in Deutschland bei Investitionskosten von 250.000 € bereits nach 1,4 Jahren amortisieren.¹⁸⁹ Mit Blick auf die kontinuierliche Weiterentwicklung robotischer Fähigkeiten sind künftig deutlich höhere ökonomische Effekte und tendenziell weiter sinkende Investitionskosten zu erwarten.

Darüber hinaus bietet Robotik eine **industriepolitische Chance zur Stärkung technologischer Souveränität**, insbesondere in strategisch relevanten Bereichen wie Sensorik, Aktorik und Datenplattformen. Gerade im industriellen Umfeld eröffnen sich für deutsche Unternehmen bedeutende Potenziale: Sie können Schlüssel-

technologien selbst entwickeln, geopolitische Abhängigkeiten reduzieren und international eine führende Rolle einnehmen.

Der Einsatz von Robotern ermöglicht zudem die Rückverlagerung von Produktionskapazitäten nach Deutschland (Reshoring). Studien zeigen, dass jeder zusätzliche Roboter pro 1.000 Beschäftigte die Wahrscheinlichkeit für Reshoring¹⁹⁰ um etwa 3,5 % erhöht.¹⁹¹ Auch im Kontext kritischer Infrastrukturen – etwa in Logistik, Landwirtschaft, Pflege oder Verteidigung – stärkt Robotik die technologische und operative Autonomie und trägt damit zur nationalen Souveränität bei.¹⁹²

Für Unternehmen eröffnet Robotik die Möglichkeit, durch flexible, skalierbare Automatisierung nicht nur Effizienzgewinne in Bereichen wie Qualitätssicherung oder Intralogistik zu erzielen, sondern auch neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungsangebote zu entwickeln – etwa im Bereich robotergestützter Pflege oder technischer Wartung.¹⁹³ Entscheidend ist dabei, in welchen Anwendungsfeldern der Robotikeinsatz heute und in Zukunft nicht nur technisch möglich, sondern auch wirtschaftlich und strukturell sinnvoll realisierbar ist.

4.3. Anwendungsfelder und Marktpotenzial

Anwendungsfelder

Fortschritte in der KI-gestützten Robotik ermöglichen zunehmend den Einsatz robotischer Technologien in vielfältigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Anwendungsfeldern. Vier Bereiche (vgl. Abb. 19) dürften dabei in den kommenden Jahren besonders stark von der Deep-Tech-Robotikforschung profitieren.

¹⁸⁵ Destatis (2025b).

¹⁸⁶ BA-Statistik (2024).

¹⁸⁷ IW (2024).

¹⁸⁸ Dexory (2024).

¹⁸⁹ MIWI (2022).





¹⁹⁰ Die „Wahrscheinlichkeit für Reshoring“ bezeichnet die modellgestützte Einschätzung, dass ein Unternehmen bei gegebenen Lohn-, Automatisierungs- und Handelskosten seine Produktion vom Ausland ins Inland zurückverlagert, da die erwarteten Gewinne im Inland höher ausfallen als im Ausland.

¹⁹¹ Krenz et al. (2021).

¹⁹² MÜNCHNER KREIS (2024).

¹⁹³ BCG (2024c).

ABBILDUNG 19 | Bestehende Anwendungsfelder KI-gestützter Robotik

 Produktions-robotik	<ul style="list-style-type: none"> • Roboter für industrielle Fertigungsprozesse • Merkmale: Präzision, Effizienz und Wiederholgenauigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Manipulationsaufgaben bspw. in der Automobilproduktion • Material Handling in Produktionsabläufen
 Lagerlogistik-robotik	<ul style="list-style-type: none"> • Roboter für industrielle Intralogistik und Lieferlogistik • Merkmale: Mobilität, Navigationsfähigkeit, Objektidentifikation 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrerlose Transportsysteme in Lagern • Autonome Lieferroboter für Werksgelände • Sortier- und Sequenzierlösungen
 Professionelle Servicerobotik	<ul style="list-style-type: none"> • Robotik in Dienstleistungsbereichen außerhalb von Industrie/Logistik • Merkmale: Hohe Autonomie, Adaptivität, Interaktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Telemedizin und robotergestützte Pflege • Drohnen, unbemannte Fahrzeuge zur Auslieferung und für andere Anwendungen
 Haushalts-robotik	<ul style="list-style-type: none"> • Roboteranwendungen für private Haushalte • Merkmale: Bisher geringe Autonomie, einfache Aufgaben 	<ul style="list-style-type: none"> • Staubsaugerroboter • Mähroboter • Haushaltsassistenzsysteme für Senioren

Quelle: BCG-Analyse

1. Produktionsrobotik

Die Produktionsrobotik umfasst Anwendungen, die primär auf industrielle Produktionsprozesse ausgerichtet sind. Traditionell zeichnen sich diese Roboter durch Präzision, Robustheit und hohe Effizienz bei repetitiven Aufgaben aus. Typische Einsatzfelder sind etablierte Prozesse wie Schweißen, Lackieren und Montage, insbesondere in der Automobil- und Elektronikfertigung. Zunehmend erweitert KI die Einsatzmöglichkeiten von Industrierobotern, vor allem in der indirekten Produktion: Mit fortschreitender Entwicklung werden kollaborative Roboter (Cobots) künftig in der Lage sein, flexibler mit Menschen zusammenzuarbeiten. Perspektivisch können sie komplexe Manipulationsaufgaben durchführen und in herausfordernden Produktionsabläufen arbeiten.

2. Lagerlogistikrobotik

Lagerlogistikrobotik umfasst Robotikanwendungen sowohl in der industriellen Intralogistik als auch in der professionellen Lieferlogistik. In der Intralogistik etablieren sich Autonomous Mobile Robots (AMRs) und fahrerlose Transportsysteme (Automated Guided Vehicles, AGVs) zunehmend als Standardlösungen in

Lagerhäusern und Produktionsstätten. Auch autonome Lieferroboter gewinnen im Einzelhandel, Gastgewerbe und Gesundheitswesen an Bedeutung. Fortschritte in der KI-gestützten, kognitiven Robotik ermöglichen künftig deutlich autonomere Logistikroboter und eröffnen neue Anwendungsfelder, vor allem in komplexen, dynamischen Logistikumgebungen.

Gerade für KMUs, die aufgrund begrenzter Skaleneffekte auf flexible Automatisierungslösungen angewiesen sind, bieten diese Technologien erhebliche Effizienzpotenziale und neue Möglichkeiten zur Prozessautomatisierung.

3. Professionelle Servicerobotik

Professionelle Servicerobotik umfasst Anwendungen in anspruchsvollen Dienstleistungsfeldern außerhalb der industriellen Fertigung und Logistik. Charakteristisch für diesen Bereich sind hohe Anforderungen an Autonomie, Adaptivität und Interaktionsfähigkeit in komplexen, dynamischen Umgebungen: In der Landwirtschaft kommen Feldroboter zunehmend für Aufgaben wie Pflanzenschutz, Ernte oder Bodenanalyse zum Einsatz. Verteidigung und Sicherheit profitieren von autonomen Systemen wie Drohnen und unbemannten

Fahrzeugen zur Überwachung, Aufklärung und Evakuierung. Auch im Gastgewerbe und Einzelhandel etablieren sich Serviceroboter, die eigenständig mit Kunden interagieren.

Robotik im **Gesundheitssystem** ist ein weiteres zentrales Anwendungsfeld der professionellen Servicerobotik. KI-gestützte Systeme leisten bereits heute einen wichtigen Beitrag zur Gesundheitsversorgung, und ihr strategischer Stellenwert wird künftig weiter zunehmen. Wesentliche Treiber sind der demografische Wandel, steigende Versorgungsansprüche sowie technologische Fortschritte bei robotischen KI-Systemen. Die Einsatzgebiete reichen von der Chirurgie über Pflege und Rehabilitation bis hin zur Diagnostik und Logistik im Klinikbetrieb. In der Chirurgie etablieren sich robotergestützte Systeme wie DaVinci, die minimalinvasive Eingriffe mit hoher Präzision ermöglichen, Operationszeiten verkürzen und sowohl Patienten als auch dem medizinischen Personal spürbare Vorteile bieten. In der Rehabilitation unterstützen Therapieroboter Patienten bei Übungen und ermöglichen eine effiziente Dokumentation der Fortschritte, was die Wirksamkeit der Therapie deutlich erhöhen kann. Auch in der Krankenhauslogistik spielen autonome Roboter eine zunehmende Rolle, indem sie beispielsweise Medikamente und medizinisches Material innerhalb von Kliniken transportieren und so Arbeitsabläufe entlasten. Ergänzend hierzu entstehen neue Anwendungsfelder – etwa die robotergestützte Versorgung im Bereich Telemedizin oder innovative Konzepte zur medizinischen Versorgung im ländlichen Raum.

4. Haushaltsrobotik

Haushaltsrobotik beschreibt robotische Anwendungen im privaten Umfeld. Derzeit dominieren einfache Tätigkeiten wie etwa das Staubsaugen. Mit den erwarteten Fortschritten in der KI-basierten Robotik eröffnen sich jedoch neue Potenziale: Haushaltsroboter könnten künftig auch komplexere Aufgaben eigenständig übernehmen, flexibel und autonom auf unterschiedliche Umgebungen und Bedürfnisse reagieren und dadurch den Alltag ihrer Nutzer spürbar erleichtern.

Marktpotenzial

Prognosen zufolge wird sich der Markt für KI-gestützte Robotik von rund 30 Mrd. € im Jahr 2024 bis 2030 mehr als verdoppeln und etwa 70 Mrd. €¹⁹⁴ erreichen. Besonders dynamisch entwickeln sich dabei **trainings- und kontextbasierte Systeme**, die perspektivisch ein breiteres Spektrum komplexer Anwendungsfelder erschließen werden (vgl. Abb. 20).

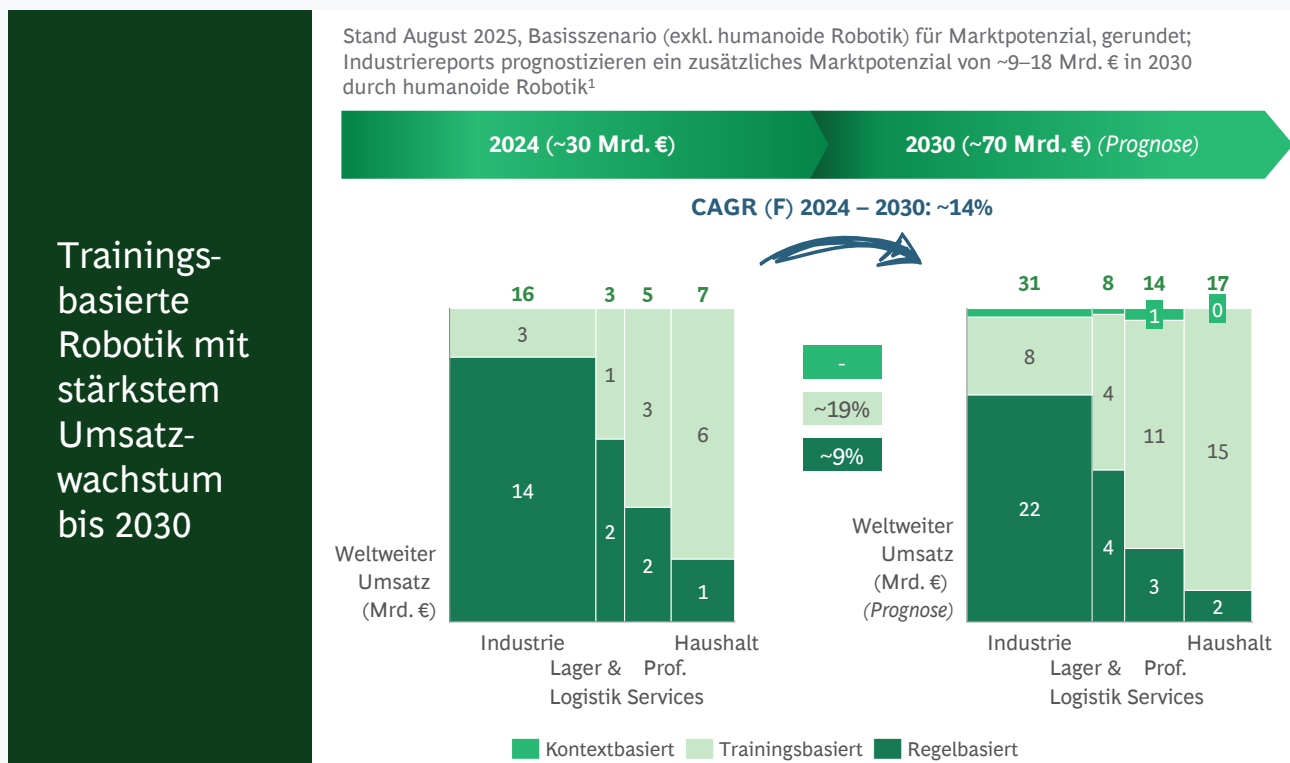
Ein zusätzliches Wachstumsfeld stellen humanoide Roboter dar, deren globaler Markt bis 2030 auf weitere 9–18 Mrd. € geschätzt wird.^{195,196}

Langfristig wird erwartet, dass KI-gestützte Robotik zu einer zentralen Querschnittstechnologie wird, die weit über das reine Marktvolumen hinaus Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit prägt.

¹⁹⁴ BCG robotics market model 2025, IFR 2024, Interact Analysis, Industriereports, Experten-Interviews

¹⁹⁵ Goldman Sachs (2024).

¹⁹⁶ Morgan Stanley (2025).



1. Humanoide Roboter können der kontext- und trainingsbasierten Robotik zugeordnet werden und sind industrieübergreifend einsetzbar; Marktpotenzial auf Basis prognostizierter Umsätze, Absätze und BOM-bzw. Unit-Kosten berechnet; Prognosen nach Morgan Stanley (18 Mrd. EUR Umsatz 2030, Unit Costs ~ 22.200 USD) und Goldman Sachs (0,26 Mio. Einheiten in 2030, Unit Costs 37.000 USD)
Quelle: BCG robotics market model 2025, IFR 2024, Interact Analysis, Industriereports, Experten-Interviews

4.4. Globale Wettbewerbslandschaft und Deutschlands Position

Globale Wettbewerbslandschaft

Die globale Wettbewerbslandschaft in der Robotik ist seit Jahren von einem intensiven Wettlauf um technologische Führungspositionen geprägt – von der Industrierobotik über die autonome Servicerobotik bis hin zur Haushaltsrobotik. Die USA, China sowie Japan und Südkorea zählen global zu den zentralen Akteuren, die jeweils in unterschiedlichen Teilbereichen führend sind. Gemeinsam verantworten sie 78 % der weltweiten Installationen im Bereich der Industrierobotik.¹⁹⁷ Europa – und insbesondere Deutschland – spielt weiterhin eine relevante Rolle, droht jedoch in strategisch wichtigen Segmenten an Einfluss zu verlieren.¹⁹⁸ Während die Qualität der Hard-

ware, traditionell eine Stärke Deutschlands, auch künftig von Bedeutung bleibt, rückt zunehmend die Fähigkeit in den Vordergrund, Robotik mit KI, Dateninfrastrukturen und autonomen Entscheidungssystemen zu integrieren. Dies zeigt sich unter anderem im aktuellen Fokus auf die Entwicklung von RFMs und World Models (vgl. Exkurs) – Schlüsseltechnologien, die als zentrale Enabler und Hoffnungsträger des nächsten Innovationssprungs gelten. In diesen Bereichen sind derzeit insbesondere US-amerikanische und chinesische Akteure führend.¹⁹⁹

Ein weiterer Treiber des globalen Wettbewerbs ist die zunehmende militärische Bedeutung und Nutzung autonomer Systeme. Weltweit investieren Länder gezielt in KI-gestützte Militärsysteme.^{200,201,202} Daraus entstehen Technologien, die häufig auch zivile Anwendungen entscheidend prägen.

¹⁹⁷ IFR (2024b).

¹⁹⁸ MÜNCHNER KREIS (2024).

¹⁹⁹ BCG (2024b).

²⁰⁰ Maven (2025).

²⁰¹ DARPA (2025b).

²⁰² US Cyber Defense Review, CDR (2024).

Die **USA** zählen weltweit zu den führenden Akteuren im Bereich intelligenter, softwaregestützter Robotiklösungen – insbesondere bei autonomen mobilen Systemen, Robotern für die Lagerlogistik, Medizinrobotern²⁰³ und humanoiden Robotern. Getragen wird diese Führungsrolle unter anderem durch eine hohe Innovationsdynamik bei der Integration von Vision-Language-Action Models (VLAMs), die multimodale Fähigkeiten vereinen und damit eine nahtlose Verknüpfung von Wahrnehmung, Sprachverstehen und Handlung ermöglichen. Hinzu kommen Large Language Models (LLMs) und Large Action Models (LAMs) in Roboterplattformen.²⁰⁴ Unternehmen wie Figure, Boston Dynamics, Amazon, Tesla (Optimus), Agility Robotics (Digit) und 1X Robotics stehen exemplarisch für den US-Fokus auf adaptive und KI-getriebene Robotiksysteme, der auch die Entwicklung humanoider Roboter mit signifikanten Investitionen vorantreibt.²⁰⁵ In all diesen Bereichen profitieren die USA von einem innovationsfreundlichen Ökosystem – geprägt durch hohe private Kapitalverfügbarkeit, schlanke regulatorische Strukturen und eine enge Vernetzung zwischen Tech-Konzernen, Universitäten und Start-ups.²⁰⁶

China hat im vergangenen Jahrzehnt den systematischen Ausbau robotischer Kompetenzen und Anwendungen massiv vorangetrieben – zuletzt entfielen rund 51 % aller globalen Neuinstallationen in der industriellen Robotik auf den chinesischen Markt.²⁰⁷ Die Initiative „Made in China 2025“ zielt explizit auf technologische Souveränität in Automatisierung und Robotik. Chinesische Unternehmen wie DJI, Siasun oder Unitree expandieren rasant in Bereichen wie Drohnen, industrieller Robotik und humanoiden Systemen. Der Staat investiert massiv in Robotik-Hubs, einheitliche Plattformarchitekturen und technologische Skalierung – und fördert darüber hinaus gezielt die Entwicklung und Integration humanoider Roboter in den Alltag und in die Industrie.²⁰⁸

Japan und Südkorea halten weiterhin eine Führungsposition in der klassischen Industrierobotik. Japan ist seit Jahrzehnten führend in der Entwicklung und dem Export robuster, hochpräziser Fertigungsroboter – insbesondere durch Unternehmen wie FANUC, Yaskawa oder Kawasaki. Darüber hinaus sind japanische Anbie-

ter stark in der Entwicklung und dem Vertrieb von Service- und Medizinrobotern sowie im Bereich von Exoskeletten (am Körper getragenen, motorisierten Bewegungshilfen) aktiv.²⁰⁹

Südkoreanische Unternehmen (z. B. Hyundai Robotics und LG) entwickeln nicht nur Industrieroboter, sondern investieren zunehmend auch in KI-basierte Robotiksysteme. Das Land nimmt zudem eine Vorreiterrolle in der praktischen Anwendung und Wertschöpfung mit Robotik ein: Mit über 1.012 Robotern pro 10.000 Beschäftigte weist Südkorea die weltweit höchste Roboterdichte auf. Zum Vergleich: Singapur folgt mit 730, Deutschland mit 415 und die USA mit 392 Robotern pro 10.000 Beschäftigte.^{210,211}

Europa verzeichnet im internationalen Vergleich ein insgesamt moderates Wachstum in der Entwicklung und Anwendung von Robotik.²¹² Dieses wird unter anderem durch den Nearshoring-Trend sowie eine führende Position in der professionellen Service- und Medizinrobotik begünstigt.²¹³ Dennoch steht Europa vor Herausforderungen, die das künftige Wachstumspotenzial begrenzen könnten. Geopolitische Spannungen sowie eine schwache Robotiknachfrage in zentralen Branchen erschweren derzeit umfassende Investitionen und Innovationsanstrengungen. Zudem zeigt sich Europa insbesondere bei der Entwicklung humanoider Roboter zurückhaltend – bedingt unter anderem durch verbreitete Zweifel an der Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit entsprechender Lösungen.²¹⁴ Aufgrund dieser zögerlichen Haltung droht Europa in diesem strategisch bedeutenden Technologiefeld international den Anschluss zu verlieren.

Deutschlands Position

Deutschland weist im internationalen Wettbewerb um die Marktführerschaft bei KI-basierter Robotik sowohl klare Stärken als auch zentrale Herausforderungen in spezifischen Bereichen auf. Ergänzend zu den im vorherigen Kapitel behandelten KI-bezogenen Aspekten sind dabei insbesondere folgende robotikspezifische Punkte entlang der sechs Handlungsfelder zu berücksichtigen:

²⁰³ IFR (2024b).

²⁰⁴ BCG (2024b).

²⁰⁵ Lakestar (2025).

²⁰⁶ MÜNCHNER KREIS (2024).

²⁰⁷ IFR (2024a).

²⁰⁸ MÜNCHNER KREIS (2024).

²⁰⁹ BCG (2024b).

²¹⁰ IFR (2024a).

²¹¹ TFN (2025).

²¹² IFR (2024b).

²¹³ IFR (2024b).

²¹⁴ Fraunhofer IPA (2025).

Strategie und Zielsetzung. Auf europäischer Ebene sind erst kürzlich konkrete strategische Initiativen zur KI-basierten Robotik entstanden. Die EU-Kommission hat für 2025 eine umfassende EU-weite Robotikstrategie angekündigt, die eine Harmonisierung von Forschung, Implementierung und Regulierung anstrebt.²¹⁵ Ergänzend dazu veröffentlichten die europäische Robotikvereinigung euRobotics sowie die AI, Data, and Robotics Association (ADRA) zwischen 2023 und 2024 Positionspapiere und strategische Roadmaps bis 2027 – teils auch darüber hinaus.^{216,217} Im Jahr 2025 ergänzte der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) diese Initiativen durch ein eigenes Strategiepapier, das konkrete Maßnahmen zur Stärkung Europas in der Robotik vorschlägt.²¹⁸

In Deutschland setzte der Zukunftsrat des Bundeskanzlers ab Dezember 2022 wichtige Impulse²¹⁹ – insbesondere durch die Gründung des Robotics Institute Germany (RIG) zur besseren Vernetzung der bislang fragmentierten Robotikforschung.²²⁰ Im Jahr 2023 folgten erstmals eigenständige strategische Initiativen: zunächst ein umfassendes Strategiepapier des VDMA mit konkreten Zielen für eine nationale Robotik-Roadmap bis 2028²²¹ und anschließend der „Aktionsplan Robotikforschung“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (ehemals Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF), verbunden mit einer jährlichen Förderung von über 40 Mio. €. ²²² Zusätzlich wird KI-basierte Robotik seit Juli 2025 im Rahmen der verabschiedeten Hightech Agenda Deutschland als Teil der Schlüsseltechnologie KI adressiert. Damit existieren nun erstmals klare strategische Vorgaben und Entwicklungsziele für die KI-basierte Robotik in Deutschland. Zuvor war das Thema seit 2018 lediglich als Bestandteil allgemeiner KI- und Industrie-4.0-Strategien behandelt worden.

Ökosystem-Infrastruktur. Für die Entwicklung und Erprobung von KI-Robotern sind spezialisierte Forschungsinfrastrukturen erforderlich. Deutschland verfügt über etablierte Zentren wie das Deutsche Rettungsrobotik-Zentrum (DRZ) in Dortmund oder ROBDEKON in Karlsruhe, die robotische Lösungen für

sicherheitskritische Anwendungen unter realitätsnahen Bedingungen testen. Ergänzend leisten Initiativen wie RoX – gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und mit dem Ziel, ein dezentrales digitales Ökosystem für KI-gestützte Robotik zu entwickeln – einen wichtigen Beitrag zur Stärkung des Robotikstandorts Deutschland.²²³ Hinzu kommen Modellfabriken und Testlabore an Fraunhofer-Instituten und Hochschulen, die industrielle Anwendungen wie kollaborative Roboter praxisnah erproben. Diese Infrastruktur ist derzeit allerdings häufig lokal begrenzt und projektgebunden; eine bundesweite Vernetzung befindet sich noch im Aufbau.

Initiativen wie Gaia-X²²⁴ und Manufacturing-X²²⁵ zum Aufbau spezialisierter industrieller Datenökosysteme und -plattformen im europäischen Kontext ergänzen die robotikrelevante Infrastruktur in Deutschland. Viele Unternehmen nutzen diese Plattformen allerdings derzeit noch zurückhaltend.

Zudem ist die flächendeckende Verfügbarkeit leistungsstarker Kommunikationsnetze (5G, künftig 6G) eine zentrale Voraussetzung für bestimmte robotische Anwendungen, wie beispielsweise autonome Serviceroboter im öffentlichen Raum. In diesem Bereich liegt Deutschland beim Ausbau jedoch weiterhin zurück.

In der Regulatorik zeichnet sich Deutschland durch hohe Sicherheits- und Qualitätsstandards in der Robotik aus – geprägt unter anderem durch die europäische Maschinenrichtlinie sowie die dazugehörigen harmonisierten europäischen (hENs) Normen und internationale ISO-Standards. Ein striktes Zertifizierungsregime – von interner Fertigungskontrolle nach Modul A des Blue Guides bis hin zu Drittstellenzertifizierung – garantiert geprüfte robotische Systeme und zertifizierte Komponenten.²²⁶ Ethische, rechtliche und soziale Aspekte (ELSA) sind von Beginn an integraler Bestandteil der Forschungsprogramme.²²⁷ Aktuell plant das BMWF zudem den Aufbau eines Prüfzentrums nach dem Vorbild der Fahrzeug-Crashtests (Euro NCAP), um einheitliche Sicherheitsstandards für KI-basierte Roboter zu etablieren.²²⁸

²¹⁵ Euronews (2024).

²¹⁶ euRobotics (2024).

²¹⁷ Adra-e (2023).

²¹⁸ VDMA (2025a).

²¹⁹ HOMBURG1 (2022).

²²⁰ Robotics Institute Germany (2025).

²²¹ VDMA (2023).

²²² BMBF (2025a).

²²³ Project RoX (2025).

²²⁴ BMWF (2019).

²²⁵ BMWK (2025b).

²²⁶ Fischer, Haspl, Rathmair & Schlund (2023).

²²⁷ Silicon Saxony (2023).

²²⁸ Capital (2024).

Diese hohen Qualitäts- und Sicherheitsstandards gehen jedoch mit komplexen und langwierigen Zulassungsverfahren einher, was insbesondere bei neuartigen KI-Robotiklösungen zu Verzögerungen bei Innovationsprozessen führt.²²⁹ Um dem entgegenzuwirken, legte die Bundesregierung im Mai 2025 einen Entwurf für ein Reallabore-Gesetz²³⁰ vor. Dieses soll rechtssichere und flexible Testumgebungen für KI-basierte Robotik schaffen.²³¹ Bislang existieren lediglich vereinzelte Pilotprojekte, etwa das Fraunhofer-Reallabor KIRR Real²³² und das KIT-Reallabor für humanoide Robotik, die diese Möglichkeit bereits nutzen.²³³

Bildung und Fachkräfte. Deutschland verfügt über eine solide Basis an MINT-Fachkräften (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik), die jährlich in signifikanter Zahl aus technischen Studiengängen hervorgehen. Explizite Robotikstudiengänge wie an der TU München, am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) oder an der Universität Stuttgart sind jedoch kaum verbreitet; meist wird Robotik lediglich als Vertiefungsrichtung innerhalb klassischer Studiengänge angeboten. Positiv hervorzuheben sind Deutschlands Stärken in Disziplinen wie Informatik und KI-Forschung, die für die Robotik essenziell sind.²³⁴ Dennoch verschärft sich der Fachkräftemangel, insbesondere bei interdisziplinären Experten, die Kompetenzen in KI, Softwareentwicklung und Robotikhardware vereinen.

Dieser Mangel wird zunehmend als zentrales Hemmnis für Robotikprojekte wahrgenommen – stärker als im internationalen Durchschnitt.²³⁵ Erste Weiterbildungsangebote und Pilotprojekte an Schulen zur frühzeitigen Auseinandersetzung mit Robotik existieren bereits, reichen jedoch bislang nicht aus. Maßnahmen wie die geplante „Robotics Academy“ des RIG oder praxisorientierte Technikwettbewerbe – etwa die „Autonomous Racing Challenge“ oder „RoboCupHumanoid Soccer“²³⁶ – sind hier richtungsweisend.²³⁷ Langfristig braucht Deutschland jedoch mehr spezialisierte Robotikstudiengänge und Weiterbildungsangebote, um Talente zu sichern und international wettbewerbsfähig zu bleiben.

Gesamtgesellschaftlich steht Deutschland der Robotik grundsätzlich offen gegenüber und sieht in ihr eine Antwort auf gesellschaftliche Herausforderungen wie den Fachkräftemangel. Rund 90 % der Bevölkerung erwarten, dass Robotik künftig an Bedeutung gewinnen wird – besonders optimistisch zeigen sich viele in Bereichen wie Pflege, Bildung und Gastgewerbe.²³⁸ Gleichzeitig bestehen weiterhin Informationslücken, die Ängste vor Arbeitsplatzverlust und sozialen Veränderungen verstärken können. Anders als die chancenfokussierte Sichtweise der USA oder Italiens sehen die Deutschen die Potenziale und Risiken der Robotik eher ausgewogen.²³⁹ Vor diesem Hintergrund ist es positiv zu bewerten, dass der neue Robotik-Aktionsplan (siehe „Strategie und Zielsetzung“) Kommunikation und Teilhabe als festen Bestandteil vorsieht.²⁴⁰ Maßnahmen wie öffentliche Dialogformate (z. B. im Rahmen des European Robotics Forum 2025, ERF), Robotikprojekte an Schulen sowie Informationsangebote zu gesellschaftlichen Chancen und Herausforderungen – wie sie etwa von der vom BMFTR geförderten „Plattform Lernende Systeme“ bereitgestellt werden – tragen bereits heute zur Akzeptanz bei. Sie stoßen insbesondere bei Eltern und Lehrkräften auf breite Zustimmung und leisten einen wichtigen Beitrag zur frühzeitigen gesellschaftlichen Verankerung von Robotikthemen.^{241,242} Allerdings fehlt es weiterhin an zielgruppenspezifischer, praxisnaher Information – insbesondere für ältere Menschen und Beschäftigte, die direkt von Automatisierung betroffen sein könnten.

Technologietransfer und -skalierung. Deutschland verfügt über starke Grundlagen und etablierte Transferstrukturen in der Robotik, vor allem im klassischen Maschinenbau sowie in der Automobilindustrie und der Automatisierungstechnik. Unternehmen wie KUKA, Festo, Siemens und Bosch zeigen, wie industrielle und akademische Forschung erfolgreich in marktfähige Produkte überführt werden kann. Im Bereich der KI-basierten Service- und Assistenzrobotik gelingt der Technologietransfer bislang jedoch nur eingeschränkt. Trotz innovativer Prototypen mangelt es häufig an geeigneten Industriepartnern und ausreichendem Risikokapital, insbesondere in kritischen Skalie-

²²⁹ Fraunhofer (2024).

²³⁰ Das Gesetz ist von themenübergreifender Bedeutung, da es neben der Robotik auch andere technologische und innovative Bereiche betrifft.

²³¹ BMWK (2025a).

²³² KIRR Real (2025).

²³³ KIT ITAS (2025).

²³⁴ VDMA (2023).

²³⁵ LOGISTIK HEUTE (2024).

²³⁶ Technische Universität München, TUM (2024).

²³⁷ BMFTR-Aktionsplan Robotikforschung (2025).

²³⁸ IT Production (2024).

²³⁹ IT Production (2024).

²⁴⁰ Silicon Saxony (2023).

²⁴¹ Plattform Lernende Systeme (2025).

²⁴² Plattform Lernende Systeme (2025).

rungsphasen. So bleiben etwa Series-B-Finanzierungen für Robotik-Scale-ups in Deutschland deutlich hinter denen internationaler Wettbewerber zurück. Zudem erschweren fragmentierte Forschungsstrukturen die effektive Überführung von Ergebnissen in marktfähige Anwendungen: Innovative Projekte verbleiben teilweise im akademischen Kontext, weil koordinierende Anlaufstellen oder skalierungsfähige Schnittstellen zur Industrie fehlen. Das RIG könnte hier Abhilfe schaffen, da es den Technologietransfer durch gemeinsame Strukturen und Kooperationsformate gezielt adressiert.

Kooperation. Branchenübergreifende Konsortien und herstellerunabhängige Plattformen bieten Deutschland gute Möglichkeiten, seine internationale Position in der Robotik auszubauen. Aktuelle Initiativen wie „Robotik und KMU“²⁴³ speziell für den Mittelstand sowie Kompetenzzentren (DRZ, ROBDEKON) fördern gezielt die Kooperation zwischen relevanten Akteuren. Wettbewerbe im Bereich interaktiver Servicerobotik wie die RoboCup@Home-Liga²⁴⁴ bringen Vertreter aus Wissenschaft und Forschung in gemischten Teams zusammen und stärken die anwendungsorientierte Zusammenarbeit. Pilotprojekte – etwa zur roboterassistierten Fertigung von Wasserstoff-Brennstoffzellen²⁴⁵ oder zur modularen Automatisierung im Bauwesen²⁴⁶ – setzen zusätzliche wichtige Impulse. Das RIG verfolgt das Ziel, die akademische Forschung enger mit der Industrie zu vernetzen und so unter anderem die Zusammenarbeit und den Technologietransfer zu stärken. Auch auf europäischer Ebene trägt das Network of Excellence (NoE) in Robotics im Rahmen von Horizon Europe zur verbesserten Vernetzung bei – mit aktiver Beteiligung mehrerer deutscher Forschungszentren wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) und dem Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme.

Innovation, Forschung und Entwicklung. Deutschland hat seine öffentlichen Investitionen in die KI- und Robotikforschung in den letzten Jahren deutlich erhöht. Das BMFTR (ehemals BMBF) kündigte 2021 die Bereitstellung von rund 5 Mrd. € bis 2025 an, um KI und damit auch KI-basierte Robotik gezielt zu fördern. Im aktuellen Haushaltsjahr 2025 sind Fördermittel in Höhe von 1,6 Mrd. € vorgesehen.^{247,248,249} Darüber

hinaus unterstützt die Bundesregierung spezielle Anwendungsgebiete der Robotik durch gezielte Forschungs- und Innovationsinitiativen – darunter das DRZ, ROBDEKON sowie Innovationswettbewerbe im Bereich interaktiver Servicerobotik. Ergänzend stehen öffentliche Fonds (HTGF, Zukunftsfonds, DeepTech & Climate Fonds)²⁵⁰ sowie begrenzte steuerliche Anreize zur Verfügung, die auch auf die Finanzierung der Robotikforschung anwendbar sind.²⁵¹

Jedoch erschwert der stark limitierte Zugang zu Risikokapital häufig die Entwicklung robotischer Technologien bis zur Marktreife. Vor allem in der Skalierungsphase fehlen ausreichende Finanzierungsquellen. Trotz bestehender Instrumente bleibt das Investitionsvolumen in Deutschland zu gering, um langfristig im globalen Wettbewerb mit führenden Ländern mithalten.^{252,253}

²⁴³ BMBF (2025e).

²⁴⁴ RoboCup (2024).

²⁴⁵ Fraunhofer IPA (2021).

²⁴⁶ The Manufacturer (2023).

²⁴⁷ Tatsachen (2024).

²⁴⁸ Bundesregierung (2021).

²⁴⁹ BMBF (2023a).

²⁵⁰ Capvisory (2025).

²⁵¹ BMF (2023a).

²⁵² Capvisory (2025).

²⁵³ IFR (2024b).

4.5. Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken

Die Bestandsaufnahme zeigt, dass Deutschland über ausgeprägte technologische Stärken und industrielle Kompetenzen in der KI-basierten Robotik verfügt. Zugleich wird deutlich, dass kritischer Handlungsbedarf besteht, um den Anschluss an führende Wettbewerber nicht zu verlieren.

Die im vorherigen Kapitel formulierten Empfehlungen zur KI lassen sich grundsätzlich auch auf die KI-gestützte Robotik übertragen. Angesichts der strategischen Bedeutung der Robotik für den Industriestandort Deutschland bedarf es jedoch zusätzlicher Maßnahmen, die gezielt auf KI-basierte Robotik ausgerichtet sind.

Bezug zur Hightech Agenda Deutschland

Die Hightech Agenda Deutschland erkennt die strategische Bedeutung der Robotik im Kontext ihrer KI-Offensive an. Maßnahmen wie der KI-Robotik-Booster mit Leitprojekten für Mehrzweckroboter sind richtungsweisend, da sie die enge Verbindung zwischen KI-Technologien und robotischen Anwendungen gezielt adressieren.

Gleichzeitig sollte Robotik angesichts ihrer zentralen Bedeutung für Deutschlands industrielle Basis und ihres erheblichen Potenzials deutlich stärker im Rahmen der Hightech Agenda hervorgehoben werden. Sie ist nicht nur ein Anwendungsfeld von KI, sondern stellt insbesondere für die deutsche Wirtschaft – mit ihrer traditionell starken industriellen Ausrichtung in Maschinenbau, Fertigung und Logistik – eine eigenständige Schlüsseltechnologie dar. Deutschland verfügt bereits heute über exzellente industrielle Grundlagen und technologisches Know-how, um im Bereich KI-basierter Robotik international führend zu werden – ein Potenzial, das eine entsprechende Priorisierung auf der politischen Agenda rechtfertigt.

Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich, dass der anstehende Roadmapping-Prozess der Hightech Agenda die Robotik explizit als eigenständige, strategisch priorisierte Technologie behandelt. Die bereits angekündigten Leitprojekte und Schaufenster sind dabei als erste Schritte zu verstehen, die im Rahmen einer eigenständigen Robotikstrategie systematisch weiterentwickelt und ausgebaut werden sollten. Die vorliegende Studie ergänzt die Hightech Agenda entsprechend, indem sie konkrete robotikspezifische Handlungsempfehlungen formuliert, die Deutschland dabei unterstützen können, das wirtschaftliche und gesellschaftliche Potenzial von KI-basierter Robotik voll auszuschöpfen.

ABBILDUNG 21 | KI-basierte Robotik | Empfehlungen entlang der sechs Handlungsfelder

Handlungsfeld	Handlungsempfehlung
Strategie und Zielsetzung 	<p>R1 – Ausarbeitung und Umsetzung einer dedizierten, innovationsfreundlichen Robotikstrategie gemeinsam mit der Industrie</p> <p>R2 – Entwicklung technologieoffener Industriestrategien, die sich an Anwendungsfällen mit hohem Wertschöpfungspotenzial orientieren</p>
Ökosystem-Infrastruktur 	<p>R3 – Aufbau hardwareagnostischer Infrastruktur zur Entwicklung und Anwendung industrieller KI-Modelle für die Robotiksteuerung</p> <p>R4 – Förderung standardisierter Komponenten unter Einbeziehung bestehender Standards sowie Unterstützung industrieller Normung</p> <p>R5 – Aufbau vertrauenswürdiger, interoperabler Datenökosysteme und Verbesserung bestehender Plattformen</p> <p>R6 – Konsequente Verankerung ethischer Bewertung und menschenzentrierter Prinzipien in Forschung und Entwicklung</p>
Bildung und Fachkräfte 	<p>R7 – Aufbau spezifischer Kompetenzprofile und gezielter Qualifizierungsmaßnahmen für die Robotik</p>
Technologie-transfer und -skalierung 	<p>R8 – Zusammenführung bestehender Forschungsstrukturen in transfer- und anwendungsorientierte Technologie-Hubs für Robotik</p>
Kooperation 	<p>R9 – Förderung akteursübergreifender Kooperation zur anwendungsnahen Entwicklung</p> <p>R10 – Entwicklung risikoteilender Pilot- und Erprobungsformate zur Förderung der aktiven Zusammenarbeit der Industrie mit Start-ups</p>
Innovation, Forschung und Entwicklung 	<p>R11 – Förderung vertikal integrierter Robotiklösungen mit gezieltem Aufbau softwareseitiger Systemkompetenz</p>

Quelle: BCG-Analyse

R1 - Strategie und Zielsetzung: Ausarbeitung und Umsetzung einer dedizierten, innovationsfreundlichen Robotikstrategie im Rahmen der Hightech Agenda gemeinsam mit der Industrie.

Aufbauend auf der Hightech Agenda sollte nun in enger Zusammenarbeit von Politik und Industrie eine dezidierte Deep-Tech-Strategie für den Bereich Robotik entwickelt werden. Ziel dieser Strategie sollte sein, einen konkreten, innovationsfreundlichen und zugleich rechtssicheren regulatorischen Rahmen für die Entwicklung und Zulassung KI-gestützter Robotik zu schaffen – insbesondere für Systeme mit intensiver Mensch-Roboter-Interaktion oder autonomen Entscheidungsfunktionen in sensiblen Bereichen wie Pflege, Bildung oder Industrie.

Derzeit bestehen regulatorische Hürden, etwa durch die sehr strikte Auslegung der DSGVO, die den Zugang zu realitätsnahen Trainingsdaten erschweren. Eine praxisnahe, innovationskompatible Auslegung – unter Wahrung von Datenschutz und Persönlichkeitsrechten – ist daher dringend erforderlich. Dies gilt ebenso für die Umsetzung des EU Data Acts und des EU AI Acts.

Darüber hinaus sollte die Robotikstrategie darauf abzielen, technologische Entwicklungsschritte bewusst und gesellschaftlich verantwortlich zu gestalten. Übergangstechnologien wie hybride Robotikplattformen sollten gezielt gefördert werden, bevor komplexere humanoide Systeme in größerem Maßstab zum Einsatz kommen.

Entscheidend ist dabei die frühzeitige Einbindung der Industrie in die Strategieentwicklung, um technologische Expertise, wirtschaftliches Potenzial und branchenspezifische Anforderungen systematisch zu berücksichtigen.

R2 - Strategie und Zielsetzung: Entwicklung technologieoffener Industriestrategien, welche sich an konkreten Anwendungsfällen mit hohem Wertschöpfungspotenzial orientieren.

Basierend auf der nationalen Robotikstrategie sollten Industrieunternehmen eigene Strategien und Roadmaps entwickeln, die auf die Kommerzialisierung konkreter, unternehmensrelevanter Anwendungen mit hohem Marktpotenzial ausgerichtet sind. Diese Entwicklungen sollten – soweit möglich – technologieoffen erfolgen und sowohl Hardwarekomponenten (z. B. Sensorik, Aktorik, KI-Chips) als auch Softwareplattformen und spezifische Anwendungsfälle integrativ berücksichtigen.

Die Roadmaps zur Umsetzung dieser Strategien sollten kurzfristig realisierbare Schritte priorisieren, die zügig Wettbewerbsvorteile schaffen.

R3 - Ökosystem-Infrastruktur: Aufbau hardwareagnostischer Infrastruktur zur Entwicklung und Anwendung industrieller KI-Modelle für die Robotiksteuerung.

Deutschland verfügt über starke Voraussetzungen, um bei der Entwicklung und industriellen Nutzung von KI-Modellen (inklusive RFMs) in der Robotik eine führende Rolle einzunehmen. Die Politik sollte daher gezielt den Aufbau einer nationalen oder – im Idealfall – europaweit koordinierten, offenen und hardwareagnostischen Entwicklungs- und Testinfrastruktur initiieren, die speziell auf die Anwendung industrieller KI-Modelle im Robotikbereich ausgerichtet ist. Ziel dieser Infrastrukturplattform ist es, standardisierte Entwicklungsumgebungen, Simulationsräume und Testfelder bereitzustellen, in denen Unternehmen KI-Modelle für reale Robotikanwendungen trainieren, testen und validieren können – unabhängig von konkreter Hardware. Gleichzeitig sollte die Plattform vorhandene Expertise in Automatisierungstechnik, Maschinenbau sowie Sensorik und Aktorik bündeln und einer breiten Entwickler- und Anwendergemeinschaft zugänglich machen. Industrie und Forschungseinrichtungen agieren dabei als zentrale Mitgestalter, indem sie Fachwissen, technologische Lösungen und Anwendungsszenarien aktiv einbringen.

Eine solche koordinierte Infrastruktur würde die technologischen Grundlagen für KI-basierte Robotik erheblich stärken und insbesondere KMUs die Entwicklung und Anwendung spezialisierter KI-Modelle für komplexe Robotikanwendungen vereinfachen.

R4 - Ökosystem-Infrastruktur: Förderung standardisierter Komponenten unter Einbeziehung bestehender Standards sowie Unterstützung industrieller Normung.

Um den Markteintritt neuer Akteure zu erleichtern, Entwicklungskosten zu senken und Innovationen in der KI-basierten Robotik zu beschleunigen, sollte die Politik den Aufbau und die Nutzung offener, standardisierter Entwicklungsumgebungen und Komponenten gezielt fördern. Dies kann durch den Ausbau bestehender, öffentlich geförderter Normungsinfrastrukturen, die finanzielle Unterstützung von Open-Source-Projekten sowie durch strategische Partnerschaften mit Industrie und Forschung zur Erarbeitung gemeinsamer Standards erfolgen. Etablierte Tools und Plattformen wie das Robot Operating System (ROS) oder die Simulationsumgebung Gazebo sollten dabei gezielt eingebunden und weiterentwickelt werden. Besonderes Augenmerk sollte auf dem Ausbau softwareseitiger Systemarchitekturen und Schnittstellen liegen – etwa durch standardisierte APIs und modulare Softwarebausteine –, um die Interoperabilität und Integration roboterischer Komponenten zu erleichtern.

Zudem sollte die Politik gezielt Anreize schaffen, um die aktive Beteiligung der Industrie an Normungsprozessen zu erhöhen. Dazu gehören spezielle Förderprogramme zur Normungsteilnahme, etwa nach dem Vorbild des bestehenden WIPANO-Programms (Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)²⁵⁴, sowie finanzielle Unterstützung für KMUs, beispielsweise durch steuerliche Forschungszulagen oder Zuschüsse zur Freistellung von Fachleuten für die Mitarbeit in Normungsgremien. Auch die Beteiligung deutscher Akteure an internationalen Standardisierungsinitiativen sollte gestärkt werden.

R5 - Ökosystem-Infrastruktur: Aufbau vertrauenswürdiger, interoperabler Datenökosysteme und Verbesserung bestehender Plattformen.

Für das Training neuer KI-Modelle zur Robotiksteuerung werden große Mengen industrieller Daten aus Produktion, F&E und weiteren Unternehmensbereichen benötigt. Um diese Daten breiter verfügbar und nutzbar zu machen, braucht es einen gezielten Auf- und Ausbau vertrauenswürdiger und interoperabler Datenökosysteme und Plattformen. Entscheidend ist, dass dabei sowohl Datenhoheit als auch Interoperabilität gewährleistet werden, um eine vertrauensvolle, branchenübergreifende Zusammenarbeit zu ermöglichen. Ein Ansatz hierfür ist die konsequente Weiterentwicklung bestehender Initiativen wie Gaia-X oder Manufacturing-X, um ihre Anwendungsbreite und Wirksamkeit zu steigern. Der Fortschritt und Mehrwert solcher Plattformen sollte dabei kontinuierlich und systematisch evaluiert werden, um sicherzustellen, dass sie die gesteckten Ziele erreichen. Förderungen von Strukturen ohne ausreichende Nutzung oder Wirkung sollten vermieden werden.

Die Industrie ist gefordert, sich aktiv an diesen Initiativen zu beteiligen, sie mitzugestalten und durch die Bereitstellung relevanter Daten zu stärken. Forschungseinrichtungen tragen parallel durch methodische Innovationen und technologische Expertise zur Weiterentwicklung dieser Datenräume bei.

R6 - Ökosystem-Infrastruktur: Konsequente Verankerung ethischer Bewertung und menschenzentrierter Prinzipien in Forschung und Entwicklung.

Um ethische Bewertungen und menschenzentrierte Gestaltungsprinzipien verbindlich in der Robotikforschung zu verankern, braucht es klare forschungspolitische Leitlinien seitens der Politik. Dabei sollten insbesondere gesellschaftliche Risiken und Auswirkungen neuer robotischer Anwendungen frühzeitig und systematisch bewertet werden – etwa in sensiblen

Bereichen wie Pflege, Bildung oder der Interaktion mit Kindern. ELSA-Aspekte sind hierfür durch standardisierte Bewertungsverfahren verbindlich in Forschungs- und Entwicklungsprozesse zu integrieren.

Zugleich gilt es, praxisnahe Ansätze für die Umsetzung des „Human in command“-Prinzips weiterzuentwickeln, um sicherzustellen, dass Menschen auch künftig die Entscheidungsautorität über Robotiksysteme behalten. Politisch geförderte Forschungsprogramme sollten gezielt Projekte priorisieren, die Robotiklösungen explizit als Assistenz- und Kooperationssysteme gestalten – nicht ausschließlich als Substitutionslösungen. Die Wissenschaft ist bei der Umsetzung dieser Prinzipien besonders gefragt, während Industriepartner durch ihre Anwendungs- und Nutzerperspektive konkrete Anforderungen an eine menschenzentrierte Gestaltung einbringen sollten.

R7 - Bildung und Fachkräfte: Aufbau spezifischer Kompetenzprofile und gezielter Qualifizierungsmaßnahmen für die Robotik.

Die Entwicklung und Anwendung von KI-gestützter Robotik erfordert ein neues Kompetenzprofil, das klassische Ingenieurdisziplinen mit KI-Methoden, Datenverarbeitung und Systemintegration verbindet. Um diesem Bedarf systematisch zu begegnen, sollte die Politik gezielt interdisziplinäre Bildungsangebote fördern, die eine enge Verzahnung von Ingenieurwissenschaften, Informatik, Robotik und KI-Forschung ermöglichen. Insbesondere im universitären Bereich sind neue Studiengänge und Vertiefungsrichtungen gefragt, die technische Grundlagen (z. B. Mechatronik, Regelungstechnik) mit modernen KI-Ansätzen (z. B. ML, Computer Vision, Reinforcement Learning) kombinieren. Unternehmen, die bereits heute in der Robotik aktiv sind, sollten sich an der Qualifizierung beteiligen – etwa durch unternehmenseigene Bildungsangebote, duale Studiengänge oder durch die Mitgestaltung technischer Lehrinhalte.

R8 - Technologietransfer und -skalierung: Zusammenführung bestehender Forschungsstrukturen in transfer- und anwendungsorientierte Technologie-Hubs für Robotik.

Die Entwicklung von Spitzentechnologien in der KI-basierten Robotik erfordert umfangreiche, spezialisierte und kapitalintensive Infrastruktur. Dadurch haben große Forschungseinrichtungen mit entsprechenden Budgets einen klaren Vorteil gegenüber kleineren, fragmentierten Einrichtungen und Clustern, wie sie derzeit in Deutschland existieren.

²⁵⁴ WIPANO (2024).

Es empfiehlt sich daher, die bestehenden Forschungsstrukturen für Robotik in einer kleinen Zahl leistungsfähiger Technologie-Hubs zu bündeln. In diesen Hubs sollten Wissenschaft, Industrie und Anwendungspartner eng zusammenarbeiten und Kompetenzen aus KI, Robotik, Maschinenbau und Ethik gezielt zusammenführen. Die entstehenden Skalen- und Netzwerkeffekte könnten die Entwicklung neuer Technologien – einschließlich neuer KI-Modelle für die Robotiksteuerung – erheblich beschleunigen.

Die Hubs sollten jeweils über eine zentrale Koordinationsstelle verfügen, die Projektziele definiert, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sicherstellt und regelmäßige Evaluationen durchführt. Ergänzend sollten sie praxisnahe Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten, Testumgebungen – einschließlich Reallaboren zur frühzeitigen Erprobung und Validierung regulatorischer Anforderungen – sowie gezielte Beratungsangebote für Unternehmen und Forschungseinrichtungen bereitstellen.

Neben der politischen Rahmensetzung kann die Politik die Zusammenführung fragmentierter Exzellenzcluster und Forschungszentren gezielt durch finanzielle Mittel und spezifische Förderprogramme unterstützen. Wissenschaftliche Einrichtungen können in den entstehenden Hubs die operative Trägerschaft übernehmen, während die Industrie konkrete Anwendungsfälle und technologische Ressourcen einbringt, um ein praxisnahes Umfeld für Forschung, Technologietransfer und Skalierung zu schaffen.

R9 - Kooperation: Förderung akteursübergreifender Kooperation zur anwendungsnahen Entwicklung.

Um die Zusammenarbeit zwischen und innerhalb der verschiedenen Akteursgruppen – insbesondere Industrie und Wissenschaft – bei der Entwicklung von Robotikinnovationen zu verbessern, braucht es effektive Kooperationen, die aktiv durch die Politik gefördert werden. Ziel dieser Förderung sollte eine branchenübergreifende Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaft sein, die technologieoffen ist und sich an der Entwicklung konkreter industrieller Use-Cases mit hohem Anwendungspotenzial und messbarem Wert orientiert. Industrie und Wissenschaft wirken dabei eng zusammen, indem sie gemeinsame Anforderungen definieren und die praktische Umsetzbarkeit von Forschungsergebnissen kontinuierlich evaluieren. Das Aufsetzen von Matchmaking-Prozessen kann zusätzlich dazu beitragen, die Vernetzung zwischen Forschungsprojekten und relevanten Industriepartnern zu verbessern und zu beschleunigen.

R10 - Kooperation: Entwicklung risikoteilender Pilot- und Erprobungsformate zur Förderung der aktiven Zusammenarbeit der Industrie mit Start-ups.

Um die Entwicklung und Kommerzialisierung KI-basierter Robotiklösungen zu beschleunigen, sollten risikoteilende Pilot- und Erprobungsformate gezielt von Politik und Industrie gefördert und ausgebaut werden. Ziel ist es, Formate zu schaffen, die sowohl für innovative Pionieranwender als auch für etablierte Unternehmen als Skalierungspartner attraktiv sind.

Gerade große Industrieakteure bieten aufgrund ihrer Skalierungserfahrung und -fähigkeit ideale Voraussetzungen – etwa durch Marktzugang, bestehende Infrastrukturen und reale Anwendungsfälle –, um robotische Innovationen und KI-Modelle gemeinsam mit Start-ups zügig zu validieren und den Aufbau von Datenökosystemen voranzutreiben.

Damit sich Industrieakteure finanziell und operativ in Start-ups einbringen, sollte die Politik risikoteilende Förderinstrumente bereitstellen. Diese sollten Unsicherheiten in frühen Phasen von Pilotprojekten abfedern. Gleichzeitig braucht es eine klare Erwartungshaltung an die Industrie, diese Formate nicht nur zu unterstützen, sondern durch aktive Kooperation mit Start-up-Partnern zum Erfolg zu führen. Forschungseinrichtungen können diesen Prozess ergänzen, indem sie technologische Innovationen und methodische Expertise einbringen.

R11 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Förderung vertikal integrierter Robotiklösungen mit gezieltem Aufbau softwareseitiger Systemkompetenz.

Die Förderung und Unterstützung von Forschungsprojekten, die Hardwarekomponenten und KI-Modelle für konkrete robotische Anwendungen von Anfang an integrativ entwickeln, kann wesentlich dazu beitragen, die dafür nötige Kompetenz und Zusammenarbeit in Deutschland aufzubauen. Besonders relevant sind dabei Lösungen, die unmittelbar praxisrelevante Anwendungen ermöglichen und Marktpotenziale erschließen (z. B. Logistikroboter oder Assistenzroboter in der Pflege).

Dies sollte im Einklang mit den bestehenden Fördermaßnahmen zur Standardisierung und industriellen Normung geschehen, die ebenfalls auf die (vertikale) Integrierbarkeit von Komponenten abzielen.



5. Quantentechnologien: Erfolg durch Kontrolle von Schlüsseltechnologien im Quanten-Tech-Stack erzielen

5.1. Executive Summary und Kernbotschaften für Quantentechnologien

Deep Tech Quantentechnologien umfassen eine neue Generation technologischer Innovationen mit dem Potenzial, bisherige technische Limitierungen grundlegend zu überwinden. Aufbauend auf den fundamentalen Prinzipien der Quantenmechanik – etwa Superposition und Verschränkung – ermöglichen diese Technologien potenziell eine Leistungsfähigkeit, die klassische Systeme hinsichtlich Rechenkapazität, Kommunikationssicherheit und Messpräzision weit übertrifft. Die Anwendungsfelder lassen sich in drei komplementäre Säulen gliedern:

- **Quantencomputing** für exponentiell beschleunigte Simulation, Optimierung und Datenverarbeitung.
- **Quantenkommunikation** für absolut sichere Informationsübertragung durch quantenbasierte Verschlüsselung.
- **Quantensensorik** für bisher unerreichte Messgenauigkeit in vielseitigen industriellen Anwendungen.

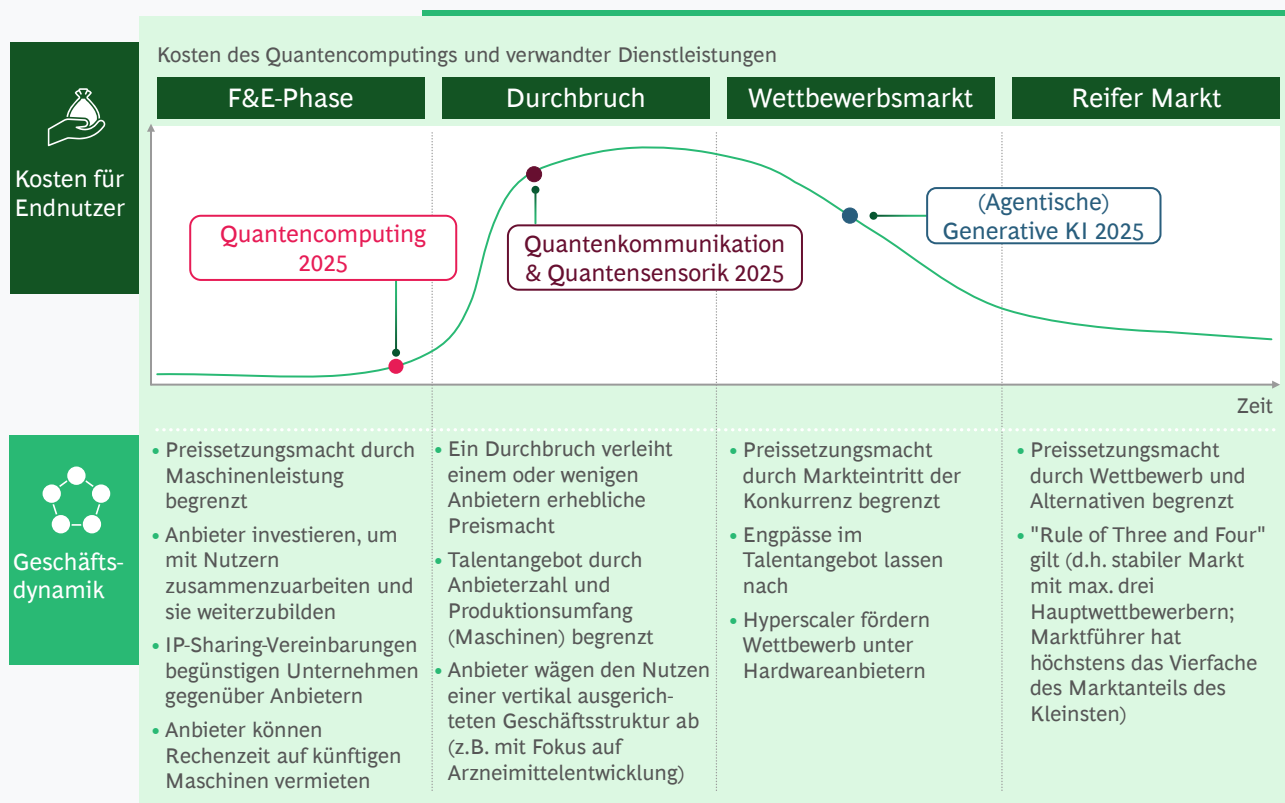
Quantenbasierte Technologien sind nicht neu und haben bereits im 20. Jahrhundert zu bedeutenden Innovationen wie Lasern, Atomuhren und der Mikroelektronik geführt. Auf dieser Grundlage wird heute

eine neue Generation von Quantentechnologien entwickelt, die komplexere Quantenphänomene für praktische Anwendungen erschließt. Ihre Entwicklung und Nutzung haben das Potenzial, in den kommenden Jahren zu einem strategischen Differenzierungsfaktor im globalen Innovationswettbewerb zu werden sowie entscheidende Beiträge zu Wertschöpfung, Sicherheit, Resilienz und technologischer Souveränität zu leisten.

Im Unterschied zu den anderen Fokustechnologien der vorliegenden Studie befinden sich Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik noch in einem frühen industriellen Entwicklungsstadium und haben bislang keine breite Marktreife erreicht (vgl. Abb. 22). Weder das Rennen um die technologische Entwicklung noch das Rennen um die wertschöpfende Anwendung ist entschieden – es bleibt offen, welche Länder am meisten profitieren werden. Vieles spricht dafür, dass sich mittelfristig unterschiedliche technologische Ansätze parallel etablieren werden, insbesondere im Quantencomputing, mit frühen Wertschöpfungspotenzialen vor allem in spezialisierten, aber praxisnahen Systemen. Daraus ergibt sich, dass voraussichtlich nicht ein einzelner Gewinner den Markt dominieren wird, sondern dass verschiedene strategisch positionierte Länder und Akteure signifikant profitieren können.

ABBILDUNG 22 | Quantentechnologien noch in frühen industriellen Entwicklungsstadien, ohne breite Marktreife

Schematische Darstellung



Anmerkung: IP = geistiges Eigentum ("Intellectual Property") Quelle: BCG-Analyse

Vor diesem Hintergrund sind Quantentechnologien weltweit ins Zentrum nationaler Innovationsstrategien gerückt. Viele Staaten investieren massiv in Quantenkompetenzen, um technologische Führungsrollen zu sichern, wirtschaftlichen Mehrwert zu schaffen und ihre Souveränität zu stärken – auch mit Blick auf sicherheits- und verteidigungsrelevante Anwendungen. Getrieben durch milliardenschwere Investitionen entwickeln sich Quantentechnologien hochdynamisch. Der globale Markt könnte von heute weniger als 5 Mrd. € bis 2030 auf ~35 Mrd. € anwachsen²⁵⁵ – und sich damit, je nach Szenario, bis zu verzehnfachen.

Deutschland und Europa haben starke Voraussetzungen, um von dieser Dynamik zu profitieren und eine führende Rolle in Technologieentwicklung und -anwendung einzunehmen. Deutschland verfügt über eine exzellente wissenschaftliche Basis in der Quantenforschung sowie international führende Industriekompetenzen in Schlüsseltechnologien wie Photonik, Laser und Kryotechnik. Zugleich ist das deutsche und europäische Ökosystem fragmentiert: Es fehlen skalierbare

Strukturen für Transfer und industrielle Anwendung, und Finanzierungslücken in den Wachstumsphasen von Start-ups schwächen die Dynamik.

Mit der Hightech Agenda Deutschland auf nationaler Ebene und der europäischen Quantum-Strategie wurden wichtige Schritte unternommen, um Ziele für Quantentechnologien zu definieren sowie bestehende Strukturen zu bündeln und weiterzuentwickeln. Entscheidend ist nun, diese Ansätze in eine verbindliche Roadmap mit klaren Meilensteinen, Verantwortlichkeiten und einer industrieorientierten Umsetzung zu überführen.

Die vorliegende Studie erarbeitet technologiespezifische Handlungsempfehlungen (vgl. Abb. 28), die ein integraler Bestandteil dieser Umsetzungsagenda sein sollten. Aus diesen detaillierten Empfehlungen ergeben sich **drei strategische Prioritäten für Deutschland:**

²⁵⁵ BCG (2023c), Marktpotenzial für Quantenkommunikation exkl. Post-Quantum-Kryptographie.



Quelle: BCG-Analyse

- 1. Moonshot-Projekt für Quantentechnologien initiieren („Quanten-Mission 2030“):** Deutschland und Europa sollten ein Moonshot-Projekt starten, das den gezielten Ausbau von Kompetenzen und Infrastrukturen entlang der Quantenhardware- und -software-Stacks vorantreibt. Hierfür ist eine langfristige, koordinierte Förderung auf nationaler und europäischer Ebene mit einer zentralen Steuerungsstelle erforderlich. Anwendungen mit erwartetem frühem Quantenvorteil – entlang spezifischer Nutzungspfade – sollten priorisiert entwickelt werden, um international eine aktive Führungsrolle einzunehmen.
- 2. Frühzeitige Überführung von Forschung in marktfähige Anwendungen ermöglichen:** Frühzeitige Überführung von Forschung in marktfähige Anwendungen ermöglichen: Exzellente Grundlagenforschung und industrielle Stärke sollten durch anwendungsnahe Technologie-Hubs gebündelt werden, die Wissenschaft, Start-ups und Industrie enger verzahnen und den Technologietransfer mit Hilfe vereinfachter, quantentechnologie-adäquater IP-Regelungen beschleunigen. Staatliche Stellen und die deutsche Industrie können dabei als erste Ankerkunden frühzeitig Märkte für Quanteninnovationen öffnen.

- 3. Strategische Schlüsselpositionen in Quantentechnologien sichern:** Strategische Schlüsselpositionen in Quantentechnologien sichern: Deutschland sollte gezielt die Erforschung, Entwicklung und Skalierung global notwendiger Schlüssel- und Enabler-Technologien fördern, um strategisch relevante Führungsrollen einzunehmen. Europas Wertschöpfungsmodell hat bereits gezeigt, dass Spezialisierung auf Schlüsseltechnologien international erfolgreich sein kann. Auch bei Quantentechnologien sollte dieser Ansatz in Ergänzung zu ausgewählten Full-Stack-Lösungen verfolgt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den kapitalintensiven Plattform-Ökosystemen und Full-Stack-Ansätzen anderer Länder zu sichern.

5.2. Definition, Reifegrad und strategische Relevanz

Quantentechnologien umfassen eine neue Generation technologischer Innovationen, die auf den fundamentalen Prinzipien der Quantenphysik basieren und das Potenzial haben, bisherige technische Limitierungen grundlegend zu überwinden. Im Kontext der technologischen Entwicklung folgen sie

perspektivisch auf die Ära klassischer Informationstechnologien, die maßgeblich durch das Mooresche Gesetz²⁵⁶ geprägt war – eine Entwicklung, bei der sich die Anzahl der Transistoren auf einem Mikrochip etwa alle zwei Jahre verdoppelte und dadurch enorme Leistungssteigerungen ermöglichte. Diese Entwicklung stieß jedoch zunehmend an physikalische Grenzen (etwa bei der weiteren Miniaturisierung von Transistoren oder der Beherrschbarkeit thermischer Effekte), die die Skalierbarkeit klassischer Halbleitertechnologie einschränken. Quantentechnologien setzen hier an, indem sie neue physikalische Prinzipien erschließen, um bisher unerreichbare Leistungsniveaus in Rechenkapazität, Kommunikation und Sensorik zu ermöglichen – jenseits der architektonischen und materiellen Grenzen klassischer IT-Systeme.

Quantentechnologien sind keineswegs eine vollkommen neue Entdeckung, sondern haben bereits im 20. Jahrhundert im Rahmen der sogenannten ersten Quantenrevolution zahlreiche grundlegende Innovationen hervorgebracht (vgl. Abb. 24). Dazu zählen insbesondere die Entwicklung von Lasern, Atomuhren und Grundlagen der Mikroelektronik – Technologien, die heute integrale Bestandteile unseres Alltags sind. Aktuell befindet sich die Entwicklung in einer zweiten, tiefgreifenderen Quantenrevolution, die darauf abzielt, komplexere quantenphysikalische Phänomene für fortschrittliche technologische Anwendungen nutzbar zu machen.²⁵⁷

²⁵⁶ Moore (1965).

²⁵⁷ Moore BMBF (2023c).

ABBILDUNG 24 | Die Quantentechnologie durchläuft die zweite Revolution



1. Prognose für Markt für jeweilige Quantentechnologie und Wertschöpfung durch Anwendung
Quelle: "Making Sense of Quantum Sensing" (BCG, 2023); "Quantum Computing Set to Transform Multiple Industries" (BCG, 2021)

Diese zweite Revolution nutzt Quantenzustände von Teilchen wie Elektronen oder Photonen, die durch quantenmechanische Effekte wie Superposition und Verschränkung charakterisiert sind. Zentrale Informationsträger in Quantentechnologien sind sogenannte Quantenbits (Qubits). Während klassische Bits entweder den Zustand 0 oder 1 annehmen, kann ein Qubit eine lineare Kombination („Superposition“) beider Zustände darstellen.²⁵⁸ Durch Superposition und Verschränkung – einem Phänomen, bei dem die Zustände von zwei oder mehr Qubits untrennbar miteinander korreliert sind – lassen sich mit Quantencomputern bestimmte Problemstellungen exponentiell effizienter verarbeiten als mit klassischen Systemen. So kann ein System mit 30 Qubits theoretisch über einer Milliarde klassischer Zustände beschreiben. Diese Eigenschaften eröffnen neue Potenziale für Hochleistungsanwendungen wie Quantencomputer oder Quantenkommunikationssysteme, die klassische Technologien in bestimmten Bereichen grundlegend übertreffen könnten.

Neben den Prinzipien der Superposition und der Verschränkung existieren zwei weitere zentrale quantenphysikalische Konzepte, die sich künftige Quantentechnologien zunutze machen und die somit grundlegend für die zweite Quantenrevolution sind:

²⁵⁸ BMBF (2023c).

ABBILDUNG 25 | Deep-Tech-Quantentechnologien nutzen vier zentrale Quanteneigenschaften



- **Superposition:** Ein Quantensystem kann sich simultan in mehreren Zuständen befinden. Diese Eigenschaft ermöglicht es Qubits, mehrere Rechenoperationen parallel auszuführen – eine zentrale Voraussetzung für die exponentiellen Geschwindigkeitsvorteile von Quantencomputern gegenüber klassischen Systemen.
- **Verschränkung:** Dieses Prinzip beschreibt die quantenmechanische Kopplung zweier oder mehrerer Teilchen, bei der ihre Zustände untrennbar miteinander verknüpft sind („Entanglement“). Eine Zustandsmessung an einem verschränkten Teilchen legt den Zustand der übrigen Teilchen unmittelbar fest, unabhängig von deren räumlicher Entfernung.
- **„No cloning“:** Dieses Prinzip besagt, dass ein unbekannter Quantenzustand nicht exakt kopiert werden kann. Daraus ergibt sich das Potenzial für absolut sichere Kommunikation, da jeder Abhörversuch den Zustand verändert und somit detektierbar ist.

- **Echte Zufälligkeit:** Im Gegensatz zu klassischen Zufallszahlen, die deterministisch erzeugt und letztlich vorhersagbar sind, können Quantensysteme Zufallszahlen liefern, die nicht vorhersagbar sind. Diese inhärente Zufälligkeit ist entscheidend für kryptografische Anwendungen und wird insbesondere in der quantenbasierten Verschlüsselung zur sicheren Generierung von Schlüsseln genutzt.

Diese Prinzipien bilden die Grundlage für die drei wesentlichen technologischen Säulen der zweiten Quantenrevolution und der Deep-Tech-Quantenforschung: Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik.

ABBILDUNG 26 | Drei Kernbereiche der Deep-Tech-Quantenforschung



Quelle: BCG-Analyse

- **Quantencomputing** kann potenziell bestimmte komplexe Berechnungen exponentiell schneller als herkömmliche Computer durchführen.²⁵⁹ Derzeit befindet sich die Technologie in der sogenannten NISQ-Phase (Noisy Intermediate-Scale Quantum), die durch eine geringe Anzahl an Qubits und hohe Fehleranfälligkeit gekennzeichnet ist. Erste industrielle Anwendungen werden bereits erprobt. Die kommerzielle Reife wird im Laufe der kommenden zehn Jahre erwartet.
- **Quantenkommunikation** ermöglicht Netzwerke, die quantenmechanische Prinzipien zur sicheren Informationsübertragung nutzen, insbesondere durch Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution, QKD).²⁶⁰ Diese Technologie verfügt bereits über erste kommerzielle Anwendungen, vor allem zur Absicherung kritischer Infrastrukturen. Parallel dazu wird Post-Quantum-Kryptografie (PQC) entwickelt, um klassische Verschlüsselungsverfahren widerstandsfähig gegen Quantenangriffe zu machen. Aktuelle Herausforderungen bestehen sowohl in der flächendeckenden Implementierung von QKD als auch in der Einführung und Standardisierung quantensicherer Verfahren wie PQC.
- **Quantensensorik** umfasst hochpräzise Messsysteme, die quantenmechanische Effekte zur Erkennung kleinster Veränderungen nutzen.²⁶¹ Anwendungsbeispiele sind die medizinische Diagnostik (z. B. Magnetresonanztomografie-Geräte) sowie hochpräzise industrielle Messverfahren, die vor allem in der Mikroelektronik und in sicherheitsrelevanten Technologien von Bedeutung sind – etwa in der Verteidigung. Im Vergleich zum Quantencomputing und zur Quantenkommunikation ist die Quantensensorik derzeit am weitesten entwickelt. Zentrale Herausforderungen liegen in der Integration in bestehende technologische Systeme und in der industriellen Skalierbarkeit.

Strategische Relevanz

Aufgrund ihrer innovativen Eigenschaften gelten Quantentechnologien als strategische Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Dies unterstreicht auch das erwartete mittel- bis langfristige Marktpotenzial: Allein für Quantencomputing wird ab 2040 ein jährlicher Marktumfang von 410 bis 770 Mrd. € prognostiziert.²⁶² Volkswirtschaftlich und gesellschaftlich bieten Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik erhebliche Chancen für neue Geschäftsmodelle, Effizienzgewinne und digitale Sicherheit.

Insbesondere durch den Sicherheitsaspekt besitzen Quantentechnologien auch eine starke geopolitische Dimension – im Hinblick auf technologische Souveränität, digitale Resilienz und Cybersicherheit. Aufgrund ihrer möglichen militärischen wie zivilen Nutzung gelten sie als klassische Dual-Use-Technologien.²⁶³ Der gezielte Aufbau eigener Kompetenzen, etwa im Bereich quantensicherer Verschlüsselungsverfahren, ist essenziell, um Sicherheitsrisiken vorzubeugen und kritische technologische Abhängigkeiten von Drittstaaten zu vermeiden.

Zur Sicherstellung technologischer Souveränität und zur Stärkung langfristiger Wettbewerbsfähigkeit ergeben sich zwei komplementäre strategische Ansätze – analog zum internationalen Wettlauf um die Entwicklung und Anwendung von KI (jedoch in einem deutlich früheren Stadium): Erstens der systematische Aufbau eines eigenständigen Quantenökosystems, das entlang des sogenannten Quanten-Stacks (vgl. Abb. 27) eigene Technologien hervorbringt und die Mitgestaltung internationaler Standards ermöglicht. Zweitens die rasche Erschließung wirtschaftlicher Potenziale durch die Anwendung bereits verfügbarer oder künftig zugänglicher Quantentechnologien, auch durch internationale Anbieter. Beide Strategien ergänzen einander: Während die Nutzung von Lösungen Effizienzgewinne und Innovationsimpulse ermöglicht, ist der parallele Aufbau eigener technologischer Kompetenzen entscheidend, um langfristige Unabhängigkeit, Resilienz und Gestaltungsmacht im globalen Wettbewerb zu sichern.

5.3. Anwendungsfelder und Marktpotenzial

Trotz gemeinsamer physikalischer Grundlagen haben Quantencomputing, -kommunikation und -sensorik eigenständige Anwendungsfelder – in unterschiedlichen technologischen Reifegraden und mit jeweils eigenen Marktchancen. Das größte Marktpotenzial der drei Quantentechnologien in den kommenden fünf Jahren wird derzeit für das Quantencomputing prognostiziert mit einem Marktvolumen von 14 bis 27 Mrd. € im Jahr 2030. Quantenkommunikation könnte laut aktuellen Prognosen bis 2030 ein globales Marktvolumen von 4 bis 5 Mrd. € erreichen (exklusive Post-Quantum-Kryptografie), die Quantensensorik 3 bis 5 Mrd. €.

²⁵⁹ Fraunhofer (2025a).

²⁶⁰ Fraunhofer (2025b).

²⁶¹ Fraunhofer (2025c).

²⁶² BCG (2024e).

²⁶³ EC (2025b).

1. Anwendungsfelder des Quantencomputings

Quantencomputing bietet ein breites Spektrum an (künftigen) Anwendungen, die nahezu alle Industriebereiche durchdringen. Bereits heute werden weltweit über 100 Pilotprojekte (Proofs of Concept [PoC]) in Fortune-500-Unternehmen getestet (Stand 2023).²⁶⁵ Quantencomputing findet insbesondere Anwendung bei spezifischen, komplexen mathematischen Problemstellungen und algorithmischen Verfahren – und eröffnet in diesen Bereichen künftig neue Potenziale für industrielle Anwendungen und Geschäftsmodelle.

- **Simulation (partielle Differenzialgleichungen):** Quantencomputing ermöglicht die präzise Simulation quantenmechanischer Systeme, etwa komplexer Molekülstrukturen und chemischer Prozesse, die klassische Rechner nicht exakt abbilden können. Ein Anwendungsbeispiel ist die Wirkstoffforschung in der Pharmaindustrie, die durch Quantencomputing erheblich beschleunigt werden könnte. Pilotprojekte wie das QuPharma-Projekt – ein britisch geführtes Vorhaben mit internationalen Partnern –, das sich auf die Simulation molekularer Strukturen und Reaktionen mit Hilfe von Quantencomputing zur Beschleunigung und Verbesserung der Wirkstoffentwicklung konzentriert, arbeiten bereits an der Realisierung dieses Potenzials.²⁶⁶
- **Optimierungsprobleme (kombinatorische Optimierung):** Quantencomputing ist besonders leistungsfähig bei bestimmten Kategorien komplexer Optimierungsprobleme. Beispiele sind die effiziente Planung von Produktionsprozessen und Lieferketten, die Ressourcenverteilung sowie die Verkehrsoptimierung. Existierende Pilotprojekte und Studien, etwa von der Volkswagen Gruppe, zeigen bereits konkrete Anwendungsmöglichkeiten von Quantencomputing in der Industrie.^{267,268,269}
- **Machine Learning (ML)²⁷⁰ (lineare Algebra):** Quantencomputing beschleunigt und verbessert Anwendungen im Bereich ML, insbesondere bei der Datenverarbeitung und Mustererkennung. Konkrete Anwendungsfälle sind die Entwicklung von KI-Algorithmen für autonome Fahrzeuge sowie für die Geldwäsche- und Betrugsprävention im Finanzsektor. Unternehmen wie IBM und Google sowie

Initiativen wie ML2R (Kompetenzzentrum Maschinelles Lernen Rhein-Ruhr) treiben entsprechende Pilotprojekte bereits aktiv voran.²⁷¹

- **Kryptografie (Primzahlenfaktorisierung):** Im Bereich Kryptografie stellt Quantencomputing sowohl eine neue Herausforderung als auch eine Chance dar. Während zukünftige Quantencomputer bestehende Verschlüsselungsverfahren wie beispielsweise Rivest–Shamir–Adleman (RSA) potenziell brechen könnten, ermöglichen sie zugleich neue und sichere Verschlüsselungsansätze. Anwendungsfelder liegen in der sicheren Kommunikation und der quantensicheren Verschlüsselung für Unternehmen. Regierungen und Unternehmen entwickeln daher bereits heute quantensichere Verschlüsselungsverfahren (Post-Quantum-Kryptografie), um zukünftige Herausforderungen zu adressieren (siehe Quantenkommunikation).

2. Anwendungsfelder der Quantenkommunikation

Die Quantenkommunikation entwickelt sich zunehmend zu einem strategisch relevanten Technologiefeld – insbesondere aufgrund der Herausforderungen, die leistungsfähige Quantencomputer künftig für bestehende kryptografische Verfahren mit sich bringen. Besonders betroffen sind asymmetrische Verschlüsselungsverfahren wie RSA, die bislang das Rückgrat sicherer Onlinekommunikation bilden.

Die Quantenkommunikation umfasst verschiedene Technologien und Ansätze, die auf den Prinzipien der Quantenmechanik basieren und eine sichere Datenübertragung gewährleisten. Dazu zählen insbesondere die **Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution, QKD)** und die **Quantenzufallszahlengenerierung (Quantum Random Number Generation, QRNG)**. Diese Technologien ermöglichen abhörsichere Kommunikation durch die gezielte Anwendung quantenmechanischer Effekte. Ergänzend dazu bietet die **Post-Quantum-Kryptografie (Post-Quantum Cryptography, PQC)** klassische kryptografische Verfahren, die gegen Bedrohungen durch Quantencomputer resistent sind und somit eine wichtige Rolle im Übergang zu quantensicheren Kommunikationssystemen spielen. PQC ist dabei insbesondere für Bereiche der nationalen Sicherheit ein entscheidendes Element, um bereits heute langfristige Datensicherheit zu gewährleisten.

²⁶⁴ BCG (2023c).

²⁶⁵ BCG (2023c).

²⁶⁶ NQCC (2021).

²⁶⁷ D-Wave Quantum (2021).

²⁶⁸ Volkswagen (2019).

²⁶⁹ NQCC (2021).

²⁷⁰ BCG (2023c).

²⁷¹ ML2R (2025).

QKD nutzt quantenmechanische Prinzipien, um kryptografische Schlüssel sicher zu übertragen. Jeder unerlaubte Zugriffsversuch verursacht physikalisch messbare Veränderungen, was eine sofortige Erkennung ermöglicht. Ein beispielhaftes Pilotprojekt ist der erfolgreiche Test von Toshiba Europe, bei dem eine quantenverschlüsselte Kommunikation über bestehende Glasfasernetze über eine Distanz von 254 km zwischen Kehl, Frankfurt und Kirchfeld realisiert wurde.²⁷² Auch Quantum Optics Jena hat in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (Fraunhofer IOF) ähnliche Tests durchgeführt.²⁷³ Typische Anwender sind Regierungsbehörden, Finanzinstitute und andere Betreiber kritischer Infrastrukturen.

Quantenzufallsgeneratoren (QRNGs) erzeugen echt zufällige Zahlen, die auf quantenphysikalischen Prozessen beruhen, und sind ein entscheidender Bestandteil quantensicherer Kommunikationssysteme. Im Gegensatz zu klassischen, deterministischen Zufallsgeneratoren gewährleisten QRNGs „echte“ Zufälligkeit, was sie unverzichtbar für sichere Schlüsselgenerierung und den Schutz von Kommunikationssystemen macht. Anwendungen finden sich unter anderem in der Finanztechnologie, in Cloud-Infrastrukturen, IoT (Internet of Things)-Geräten sowie Smartphones.

3. Anwendungsfelder der Quantensensorik

Quantensensorik basiert auf quantenmechanischen Prinzipien, um Messungen physikalischer Größen mit bisher unerreichter Präzision zu ermöglichen. Dabei unterscheidet man zwischen verschiedenen Technologien, die sich für unterschiedliche Anwendungsbereiche eignen.²⁷⁴

Quantenelektromagnetische Sensoren wie SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices), NV-Zentren (eng.: Nitrogen Vacancy; Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamanten) und SERF (Spin Exchange Relaxation-Free)-Magnetometer erlauben hochpräzise Messungen elektromagnetischer Felder. Konkrete Anwendungsfälle umfassen tragbare MRT-Geräte für die medizinische Diagnostik sowie Spektroskopie zur Materialanalyse.²⁷⁵ Im militärischen Bereich werden solche Sensoren bereits aktiv zur U-Boot-Ortung eingesetzt.

Quantensensoren im Bereich der **Quantenbildgebung** – darunter Technologien wie die Quanteninfrarotbildgebung und das Single-Photon-Imaging – erlauben hochpräzise optische Messungen und Bildgebung selbst unter extrem schwachen Lichtverhältnissen. Ein wichtiger Anwendungsfall ist das autonome Fahren, bei dem LiDAR-Systeme (Light Detection and Ranging) auf Basis dieser Technologien zur präzisen Umgebungswahrnehmung eingesetzt werden. Weitere Anwendungen umfassen die Überwachung von Gas- und CO₂-Emissionen sowie medizinische Bildgebungsverfahren, die präzisere und schnellere Diagnosen ermöglichen.

Quantengravimeter und -gradiometer nutzen quantenmechanische Effekte – insbesondere mit Hilfe von Atominterferometrie –, um kleinste Variationen des Gravitationsfeldes zu messen. Diese Sensoren finden Anwendung in der zivilen Navigation, vor allem in Umgebungen ohne GPS-Empfang, z. B. in Tunneln. In der Geologie und der Bergbauindustrie werden sie bereits eingesetzt, um geophysikalische Eigenschaften unter der Erdoberfläche präzise zu bestimmen und mineralische Rohstoffe effektiver zu identifizieren. Ein Pilotprojekt in diesem Bereich ist der „Quantum Compass“ im Londoner U-Bahn-System, bei dem Forscher des Imperial College London erfolgreich einen quantenbasierten Kompass testen, der präzise Navigation ohne externe Signale ermöglicht.²⁷⁶

Quantenbasierte **Thermometer und Barometer**, etwa NV-Zentren und Resonanzthermometer, erlauben hochgenaue Messungen von Temperatur- und Druckveränderungen. Anwendungen finden sich hier vor allem im Infrastrukturmanagement, beispielsweise in Kraftwerken, wo präzise Messungen entscheidend für Sicherheit und Effizienz sind. Auch in der Halbleiterfertigung ermöglichen sie ein exaktes Temperaturmanagement, um Produktionsfehler zu minimieren. Weitere Beispiele sind der Einsatz in der Wetterüberwachung sowie die Live-Patientenüberwachung im Gesundheitswesen.

²⁷² Toshiba (2025).

²⁷³ Fraunhofer IOF (2022).

²⁷⁴ BCG (2023b).

²⁷⁵ BMBF (2022c).

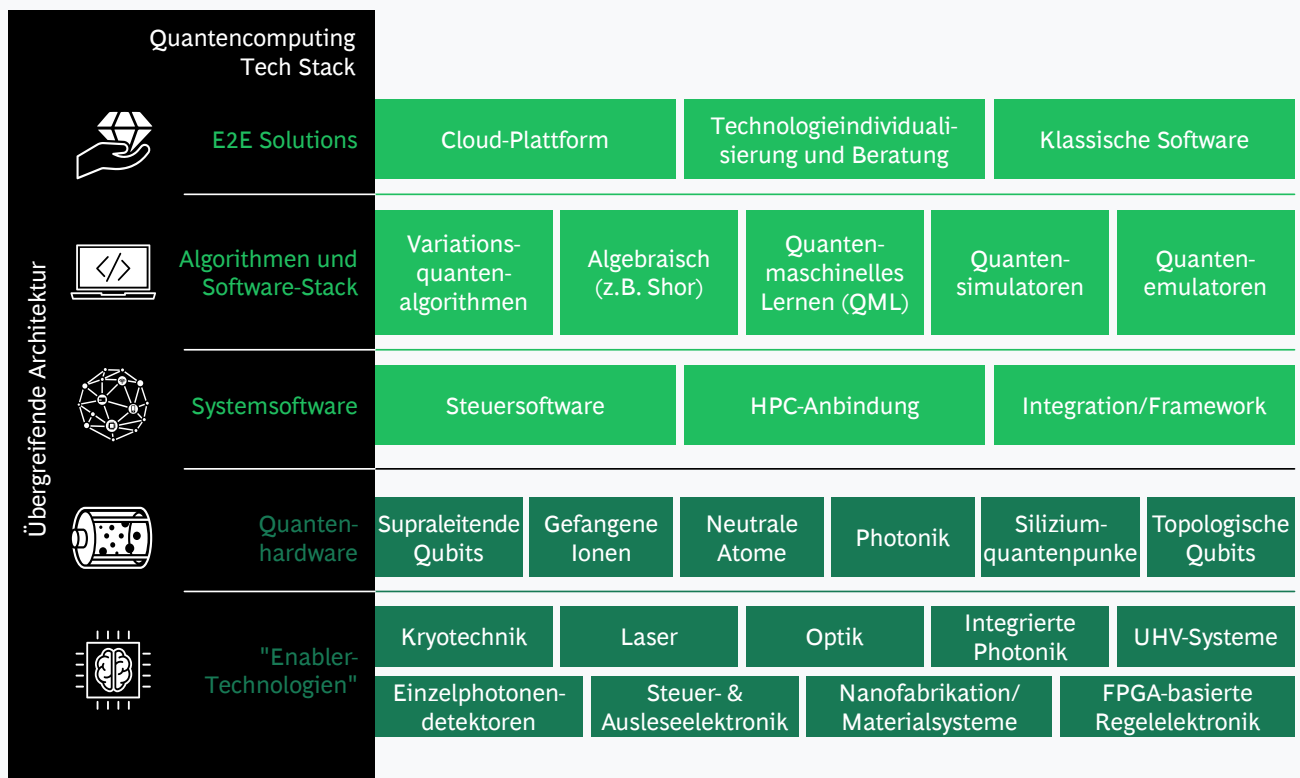
²⁷⁶ The Guardian (2024).

Erschließung der Anwendungsfelder für Quantentechnologien

Die Realisierung der benannten Anwendungsfelder und Marktpotenziale der Quantentechnologien ist derzeit noch mit erheblichen technologischen Herausforderungen verbunden. Exemplarisch zeigt sich dies besonders im Bereich des Quantencomputings, dessen Umsetzung auf einer hochkomplexen, spezialisierten und mehrschichtigen technologischen Architektur – dem Quantencomputing Tech Stack – beruht. Dieser umfasst mehrere technologische Ebenen (vgl. Abb. 27) mit teilweise unterschiedlichen Ansätzen zur potenziellen Realisierung, die aktuell erforscht werden. Bis heute ist nicht eindeutig absehbar, welche Tech Stacks sich letztlich etablieren werden. Vor allem die Frage, welche Hardwaretechnologien sich durchsetzen werden, bleibt derzeit offen und ist Gegenstand intensiver internationaler Forschung und Wettbewerbsaktivität (vgl. Kapitel 5.2).

ABBILDUNG 27 | Übersicht über Quantencomputing Tech Stack – Deutschland unter anderem stark in Quantenhardware und "Enabler-Technologien"

Illustrativ



Quelle: BCG-Analyse

Die Vielschichtigkeit und die hohe Spezialisierung des Tech Stacks führen dazu, dass unterschiedliche Akteure und Länder in verschiedenen Bereichen und Komponenten des Quantencomputings aktuell Führungsrollen einnehmen.

Auch für Deutschland ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, sich innerhalb des Stacks zu positionieren und gegenüber anderen Ländern zu differenzieren: Bei den Enabler-Technologien – etwa Photonik, Optik, Laser- oder Kryotechnik – verfügt Deutschland bereits über international führende Kompetenzen. Chancen bestehen auch im Bereich der Quantenhardware: Mit starker Physik- und Materialforschung sowie einer ausgeprägten Ingenieurtradition hat Deutschland gute Voraussetzungen, in dieser Wertschöpfungsebene eine

führende Rolle einzunehmen. In den softwarebasierten Ebenen und bei End-to-End-Lösungen ist eine klare Differenzierung für Deutschland hingegen aufgrund der Dominanz globaler Plattformanbieter schwieriger zu erreichen (vgl. auch Kapitel 5.4 „Globale Wettbewerbslandschaft und Deutschlands Position“). Neben der Weiterentwicklung einzelner Tech-Stack-Komponenten und übergreifender Architekturschichten liegt strategisches Potenzial auch in der gezielten Integration bestehender Technologien wie KI in quantentechnologische Ansätze. Im Zusammenspiel können KI und Quantencomputing technologische Fortschritte ermöglichen, die mit jeder der beiden Technologien für sich allein nicht erreichbar wären.

Exkurs: KI für Quantum und Quantum für KI

Die konsequente Nutzung von Synergien zwischen Quantentechnologien und KI bietet erhebliche Potenziale für die Weiterentwicklung beider Felder. Besonders relevant sind dabei zwei komplementäre Innovationspfade: Quantum für KI („Quantum for AI“) sowie KI für Quantum („AI for Quantum“).

Quantum für KI beschreibt die Nutzung quantentechnologischer Ansätze zur Überwindung fundamentaler Limitationen heutiger KI-Verfahren. Derzeitige KI-Modelle, insbesondere großskalierte LLMs, stoßen zunehmend an technologische und ökologische Grenzen, etwa im Hinblick auf Rechenaufwand, Skalierbarkeit und Energieverbrauch. Eine entscheidende strategische Chance besteht darin, zukünftige Generationen von KI-Modellen mit Hilfe quantenbasierter Technologien zu trainieren. Gerade hochkomplexe LLMs könnten zukünftig durch den Einsatz von Quantencomputern signifikante Effizienzgewinne und exponentielle Beschleunigung erfahren. So lassen sich zentrale Trainingsprozesse kommender LLMs drastisch beschleunigen.

Erste Unternehmen (z. B. IonQ) präsentieren bereits heute hybride Architekturen zur quantengestützten Feinabstimmung von LLMs Quantum Machine Learning Layer (QML-Layer), die sowohl eine höhere Klassifikationsgenauigkeit bei der Stimmungsanalyse von Sätzen (sentence sentiment) als auch einen reduzierten Energieverbrauch ermöglichen. Diese gezielte Verbindung von Quantentechnologien und KI stellt damit nicht nur eine technologische Option dar, sondern

besitzt das Potenzial, zu einem der wichtigsten Anwendungsfelder von Quantencomputing zu werden.

KI für Quantum beschreibt umgekehrt die Nutzung von KI-Technologien, um zentrale Herausforderungen bei der Entwicklung und Optimierung quantentechnologischer Systeme gezielt und effizient zu bewältigen. Komplexe Problemstellungen in Design und Steuerung von Qubits, der effizienten Fehlerkorrektur sowie bei der Material- und Komponentenentwicklung stellen derzeit noch erhebliche Hürden auf dem Weg zur Marktreife und breiten Anwendung von Quantentechnologien dar. Neue wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass KI-Techniken bereits heute einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, diese Herausforderungen wirksam zu adressieren. KI-gestützte Verfahren wie Maschinelles Lernen (ML) und Reinforcement Learning (RL) tragen dazu bei, Fehlerquellen automatisiert zu identifizieren und zu korrigieren, das Materialdesign supraleitender Qubits zu beschleunigen sowie die Kalibrierung und Steuerung quantentechnologischer Komponenten präzise zu automatisieren. Ein Beispiel ist der von DeepMind entwickelte KI-gestützte Decoder „AlphaQubit“, der Quantensysteme bei der Fehlerkorrektur unterstützt und damit eine wesentliche Voraussetzung für skalierbare und praxistaugliche Quantencomputer schafft.²⁷⁸ Auch NVIDIA und QuEra arbeiten gezielt daran, KI-gestützte, skalierbare QEC-Decoder für künftige Quantensysteme mit massiv skalierbaren Qubit-Architekturen zu entwickeln – eine entscheidende technologische Grundlage, um Quantensysteme industriell nutzbar zu machen.²⁷⁹

²⁷⁸ Google (2024).

²⁷⁹ NVIDIA Developer (2025).

5.4. Globale Wettbewerbslandschaft und Deutschlands Position

Globale Wettbewerbslandschaft

Quantentechnologien allgemein. Quantentechnologien sind in den letzten Jahren weltweit ins Zentrum nationaler Innovationsstrategien gerückt. Viele Staaten haben umfassende Programme initiiert, um eine technologische Führungsrolle zu übernehmen, ökonomischen Mehrwert zu schaffen und Autonomie in diesem Zukunftsfeld zu erreichen.

Die USA setzen auf eine enge öffentlich-private Kooperation, getragen durch hohe Investitionen von Technologiekonzernen wie IBM, Google, Microsoft und Amazon in Forschungsprojekte und Start-ups. Staatliche Initiativen wie der National Quantum Initiative Act (NQIA; ca. 1 Mrd. € seit 2018) fördern gezielt die Forschung (z. B. Testbeds, Forschungszentren).²⁸⁰

China verfolgt eine zentralisierte, staatlich koordinierte Strategie (ca. 14 Mrd. € seit 2016²⁸¹), die auf technologische Souveränität abzielt. Ein besonderer Fokus liegt auf der Quantenkommunikation – unter anderem durch ein 12.000 km langes QKD-Netz und bereits implementierte Satellitensysteme.²⁸² Die Umsetzung erfolgt über staatliche Institute wie das National Laboratory Hefei mit signifikanter regulatorischer Kontrolle der Wertschöpfungskette.

Die EU setzt auf eine umfassend koordinierte Strategie („Quantum-Europa-Strategie“, 2025)²⁸³, die die bisherigen dezentralen Strukturen stärker bündeln und gezielt weiterentwickeln soll. Aufbauend auf etablierten Initiativen wie dem Quantum Flagship (1 Mrd. € bis 2028), EuroQCI (Europäische Quantenkommunikationsinfrastruktur) und EuroHPC (Quantencomputing) sollen Fragmentierungen reduziert und Synergien verstärkt werden.²⁸⁴ Diese Initiative ist auch dadurch motiviert, dass Europa derzeit zwar über eine starke akademische Basis im Bereich der Quantentechnologien verfügt, bei Koordination, Technologietransfer und Investitionen jedoch klar hinter den USA und China zurückliegt. Nationale Programme wie Frankreichs Plan Quantique (1,8 Mrd. €)²⁸⁵ oder Deutschlands

Handlungskonzept Quantentechnologien (2,2 Mrd. €)²⁸⁶ sorgen für Dynamik, führen aber teils zu Redundanzen. Künftig sollen daher gemeinsame europäische Roadmaps – etwa die Quantum Chips Industrialisation Roadmap²⁸⁷ – und gezielte industrielle Pilotlinien etabliert werden.

Das Vereinigte Königreich investiert bereits seit über zehn Jahren in Quantentechnologien und hat diesen Fokus kürzlich noch intensiviert (10-Jahres-Strategie in 2024 mit 2,9 Mrd. €)²⁸⁸. Dazu gehören industrieorientierte Forschung, die Förderung von Start-ups (z. B. Oxford Quantum Circuits, OQC; ORCA Computing) sowie der Aufbau strategischer Zentren (Oxford, Cambridge, NQCC).^{289,290}

Quantencomputing. Im internationalen Wettbewerb um Quantencomputing zeichnen sich zwei grundlegende strategische Ansätze ab: die Entwicklung von Full-Stack-Lösungen und die selektive Spezialisierung auf Schlüsseltechnologien im Quantencomputing-Tech-Stack.

Die Full-Stack-Strategie zielt darauf ab, möglichst große Teile der Quantencomputing-Wertschöpfungsketten abzudecken – von Hardware über Steuerungselektronik und Software bis hin zu Cloud-Plattformen und Anwendungen. Führend sind hier insbesondere US-Technologiekonzerne wie IBM, Google, Quantinuum, Microsoft und Amazon, die umfassende Ökosysteme entlang des Quantum-Stacks aufbauen.

China verfolgt eine ähnliche Strategie, jedoch staatlich koordiniert am National Laboratory Hefei mit dem Ziel umfassender technologischer Unabhängigkeit.²⁹¹ Auch in Europa entstehen erste Full-Stack-Ansätze, etwa durch IQM (Finnland/Deutschland) und planqc (Deutschland).²⁹²

Innerhalb dieser Full-Stack-Strategien gewinnen flexible, offene Architekturen an Bedeutung, bei denen unterschiedliche Quantenhardware softwareseitig integriert werden kann. Amazon verfolgt diesen Ansatz mit Braket über eine plattformoffene Cloud-Lösung, IBM durch die Kopplung eigener Systeme mit klassischer High-Performance-Computing (HPC)-Infrastruktur wie am LRZ.

²⁸⁰ PostQuantum (2025).

²⁸¹ Quantum Insider (2024).

²⁸² MERICS (2024).

²⁸³ EC (2025d).

²⁸⁴ Quantum Flagship (o.J.).

²⁸⁵ Quantum Insider (2024).

²⁸⁶ BMBF (2023b).

²⁸⁷ EC (2025d).

²⁸⁸ UK Quantum Strategy (2023).

²⁸⁹ UK Quantum 45M (2024).

²⁹⁰ NQCC (2025).

²⁹¹ Quantum Insider (2023).

²⁹² Quantum Insider (2023).

Besonders stark verbreitet ist die **selektive Spezialisierung** in europäischen Staaten, wo sich Akteure auf global notwendige Schlüsselkomponenten konzentrieren.²⁹³ Beispiele für diese Strategie sind Bluefors (Finnland, Kryotechnik), TOPTICA Photonics (Deutschland, Lasersysteme) und Qblox (Niederlande, modulare Elektronikkomponenten).²⁹⁴ Sie ermöglicht es, trotz begrenzter Ressourcen globale Schlüsselpositionen in der Wertschöpfungskette einzunehmen. Die Wahl der Hardwaretechnologie – supraleitende Qubits, gefangene Ionen, Photonik, neutrale Atome, Siliziumquantenpunkte oder topologische Qubits – bestimmt dabei teilweise die Bedeutung einzelner Schlüsseltechnologien (vgl. Abb. 27). Komponenten wie Kryotechnik und Laser sind universell einsetzbar und weltweit stark nachgefragt, während spezialisierte Elektronikmodule und Steuerungssysteme oft hardwarespezifisch sind. Europa hält insbesondere in diesen Enabler-Technologien bedeutende Marktanteile, während die USA im digitalen Bereich (FPGAs, Steuerchips) führend sind.

Ausblick bis 2030: Innerhalb der nächsten fünf bis sieben Jahre wird sich entscheiden, welche Strategien und Technologien sich im globalen Wettbewerb durchsetzen. Verschiedene Quantentechnologien und Architekturen werden dabei voraussichtlich zumindest in der Anfangsphase nebeneinander bestehen – vergleichbar mit heutigen Central Processing Units (CPUs), Graphics Processing Units (GPUs) und spezialisierten Chips.

Länder und Akteure, die umfassende Full-Stack-Fähigkeiten aufbauen, dürften sich durch signifikante Marktkontrolle auszeichnen. In diesen Ländern könnten innerstaatliche Anwender bereits in frühen Stadien der Marktreife von einem besseren Zugang zu Quantencomputern profitieren. Gleichzeitig werden spezialisierte Akteure und Länder Schlüsselpositionen in der Wertschöpfungskette besetzen – mit entsprechendem wirtschaftlichem Potenzial. Während beide Ansätze auf internationale Kooperationen angewiesen sein werden, gilt dies insbesondere für spezialisierte Akteure und Länder.

Quantensensorik. Quantensensorik ist weltweit zu einem Schlüsselthema nationaler Deep-Tech-Strategien geworden. Die meisten führenden Technologieländer – darunter Deutschland, die USA und China –

haben erkannt, dass ultraempfindliche Sensoren auf Quantenbasis nicht nur wissenschaftlich bahnbrechend sind, sondern auch signifikante wirtschaftliche Wertschöpfung versprechen.

Strategischer Stellenwert und institutionelle Verankerung: Mehrere Länder machen Quantensensorik explizit zu einem Kernelement ihrer nationalen Quantenprogramme und binden wichtige Ministerien sowie Forschungs- und Verteidigungsinstitutionen direkt ein. Die USA adressieren Quantensensorik vor allem implizit – innerhalb umfassenderer Quantenprogramme, verteilt über DARPA, das National Institute of Standards and Technology (NIST) und die National Science Foundation (NSF).^{295,296} So treibt DARPA etwa mit dem „Robust Quantum Sensors“- (RoQS-) Programm gezielt die Entwicklung von Quantensensoren voran.²⁹⁷

Kanada (mit eigenständiger Mission für Quantensensorik in der National Quantum Strategy, NQS²⁹⁸), das vereinigte Königreich (mit der Definition von Quantum-Sensing-Hubs im National Quantum Technologies Programme, unter Beteiligung des Verteidigungsministeriums [Defence Science and Technology Laboratory, Dstl]²⁹⁹) und Frankreich (mit einem eigenständigen Pfeiler für Quantensensorik im Plan Quantique, koordiniert durch mehrere Ministerien inklusive Verteidigung³⁰⁰) setzen in ihren jeweiligen Strategien ebenfalls stark auf die Integration von Quantensensorik. Deutschland positioniert sich derzeit in einer Zwischenrolle: Quantensensorik gewinnt zwar an Stellenwert, musste jedoch bislang um Sichtbarkeit ringen. Erste gezielte Initiativen werden durch Ministerien wie das BMFTR angestoßen, unter Beteiligung etablierter Forschungsorganisationen oder Institutionen wie dem DLR.

Kleinere Staaten wie Singapur verfolgen spezifische, fokussierte Ansätze, um in ausgewählten Nischen präsent zu sein.³⁰¹

Fördervolumen und Allokation: Führend sind die USA und China, die jeweils mehrere Milliarden Euro investieren. China adressiert im Rahmen des laufenden Fünfjahresplans bis 2025 insbesondere den Ausbau umfangreicher Infrastruktur, während sich die USA seit 2019 primär auf militärische und grundlagenorientierte

²⁹³ Vinnova (2023).

²⁹⁴ ECFR (2024).

²⁹⁵ DARPA (2025d).

²⁹⁶ Quantum.gov (2025).

²⁹⁷ DARPA (2025c).

²⁹⁸ Perimeter Institute (2023).

²⁹⁹ Dstl (2019).

³⁰⁰ République Française (2025).

³⁰¹ National Quantum Office Singapore (2024).

tierte Projekte konzentrieren.³⁰² Auch die EU fördert den Bereich Quantentechnologien, etwa durch das EU-Quantum-Flagship-Programm, das über einen Zeitraum von rund zehn Jahren mit 1 Mrd. € ausgestattet ist.³⁰³ Länder wie Kanada, Australien oder Südkorea investieren gezielt in spezifische Anwendungen – jeweils im dreistelligen Millionenbereich³⁰⁴.

Führungsindikatoren: Technologische Führerschaft zeigt sich derzeit an konkreten Meilensteinen wie der Entwicklung und Pilotierung tragbarer Quantengravimeter (UK), mobiler Atomuhren (Deutschland) sowie satellitenbasierter Sensor-Arrays (China). Die meisten Patente im Bereich Quantentechnologien werden aktuell in China angemeldet (51 %), gefolgt von den USA (26 %) und Europa (9 %).³⁰⁵ Die industrielle Anwendung in Pilotprojekten (PoCs) erfolgt besonders intensiv in Deutschland (z. B. in der Automobil- und Chemieindustrie) sowie in den USA (z. B. in der Halbleiterbranche).

Ausblick 2030. In den kommenden Jahren ist mit einer weiteren Zuspitzung des internationalen Wettbewerbs zu rechnen. Bereits heute werden erste Prototypen außerhalb von Laborumgebungen unter realen Einsatzbedingungen getestet – etwa im Rahmen des 2025 gestarteten RoQS-Programms der US-amerikanischen DARPA³⁰⁶ oder in Pilotanwendungen in China³⁰⁷ und Europa. In den nächsten fünf Jahren wird sich zeigen, welche Nationen und Akteure den Übergang von der Forschung zur realwirtschaftlichen Nutzung am schnellsten vollziehen. Bis 2030 ist mit ersten einsatzfähigen Anwendungen zu rechnen, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie Navigation, Detektion und Infrastrukturüberwachung³⁰⁸ – mit potenziell strategischer Bedeutung für technologische Souveränität und Marktzugänge.

Quantenkommunikation. Quantenkommunikation. Die Entwicklung von Quantenkommunikation – insbesondere QKD und PQC – wird weltweit mit Hochdruck vorangetrieben. Staaten verfolgen dabei zwei grundsätzliche Zielsetzungen, die je nach Land unterschiedlich stark im Fokus stehen:

Globale Führungsrolle und technologische Souveränität. Globale Führungsrolle und technologische Souveränität. Einige Länder streben explizit die technologische Vorreiterrolle durch den Aufbau umfassender Quantenkommunikationsinfrastrukturen an. Besonders China verfolgt dieses Ziel mit umfangreichen staatlich koordinierten Investitionen in QKD-Fasernetze (12.000 km, Peking – Schanghai³⁰⁹) sowie Satelliteninfrastruktur (Micius-Satellit³¹⁰, quantensichere Kommunikationsverbindungen zwischen Peking und Südafrika³¹¹) und plant bis 2035 ein globales Quanteninternet. Auch die USA arbeiten langfristig am Aufbau eines landesweiten Quanteninternets, derzeit über Testumgebungen wie dem U.S. Department of Energy Quantum Loop in Chicago. In Europa soll der Aufbau eines paneuropäischen Quantenkommunikationsnetzes (EuroQCI³¹²) die technologische Souveränität stärken. Gleichzeitig entstehen nationale Industrieinitiativen (z. B. BT/Toshiba in Großbritannien³¹³ und Thales in Frankreich als Partner in nationalen und europäischen Quantenkonsortien³¹⁴, unter anderem im European-Space-Agency Projekt TeQuantS).

Sicherung und Infrastrukturvorbereitung. Staaten legen den Fokus auf die kurzfristige Einführung quantensicherer Verfahren zum Schutz kritischer Infrastrukturen und sensibler Daten. Die USA treiben die Einführung von PQC gezielt voran – insbesondere über das NIST-Standardisierungsverfahren als Reaktion auf das „Harvest now, decrypt later“-Risiko. Ziel ist die frühzeitige Absicherung der Behördenkommunikation und kritischer Sektoren.^{315,316} Staatliche, akademische und militärische Akteure schaffen dabei strategische Grundlagen für die nationale Sicherheit von morgen. Israel verfolgt einen besonders entschlossenen Ansatz: PQC-Übergangspläne für kritische Infrastrukturen sollen bis Ende 2025 umgesetzt werden.³¹⁷ Öffentliche Einrichtungen und Technologiepartner sind zur frühzeitigen Migration sowie zur Durchführung spezifischer Risikoanalysen für besonders schützenswerte Daten verpflichtet. Ergänzend werden experimentelle QKD-Netze getestet.

³⁰² NSTC (2024).

³⁰³ Quantum Flagship (2025).

³⁰⁴ QURECA (2024)

³⁰⁵ QulC (2025).

³⁰⁶ DARPA (2025b).

³⁰⁷ TQI (2025).

³⁰⁸ DARPA (2025a).

³⁰⁹ India Today (2025).

³¹⁰ PostQuantum (2022).

³¹¹ Quantum Insider (2025b).

³¹² Quantum Insider (2025b).

³¹³ BT Group (2021).

³¹⁴ Thales Alenia Space (2023).

³¹⁵ Cryptomathic (2025).

³¹⁶ GSMA (2025).

³¹⁷ ynetnews (2025).

Auch Europa verfolgt Sicherheitsstrategien in Kombination mit industrieller Positionierung: In Deutschland (QuNET)³¹⁸ und Frankreich (Campus Quantique Défense)³¹⁹ entstehen nationale QKD-Netze, die primär auf sichere Behördenkommunikation und Interoperabilität innerhalb der EU ausgerichtet sind. Darüber hinaus empfehlen das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik und Partner aus 17 EU-Mitgliedstaaten, dass besonders sensible Anwendungen – etwa in kritischer Infrastruktur – bis 2030 konsequent durch Post-Quanten-Kryptografie abgesichert werden³²⁰. Auch Singapur und Südkorea sehen Quantenkommunikation als strategischen Baustein zur Sicherung ihrer Positionen als führende digitale Nationen. Beide Länder investieren in quantengesicherte Kommunikationsnetze (z. B. Singapurs National Quantum-Safe Network³²¹ und Südkoreas National Convergence Network) und kooperieren gezielt mit der Industrie (z. B. Unternehmen wie SK-Telecom und Singtel), um kritische Bereiche wie den Finanzsektor und die öffentliche Verwaltung langfristig zu schützen.

Ausblick 2030. Bis 2030 ist mit erheblichen Fortschritten beim Aufbau quantenbasierter Kommunikationsnetze zu rechnen. Dabei zeigen sich unterschiedliche strategische Schwerpunkte – zwischen nationaler Sicherheitsorientierung (z. B. Aufbau quantensicherer Netze) und internationaler Kooperation (z. B. Standardisierung und Interoperabilität). Wer frühzeitig in reale Anwendungen, sektorübergreifende Partnerschaften und globale Normsetzung investiert, wird die Entwicklung im Quantenzeitalter maßgeblich mitprägen.

Deutschlands Position

Deutschland hat die strategische Relevanz der Quantentechnologien erkannt und sie mit der **Hightech Agenda Deutschland** explizit formuliert. Eine nähere Betrachtung der sechs zentralen Handlungsfelder zeigt zudem, dass darüber hinaus bereits weitere wichtige Voraussetzungen für ein leistungsfähiges Quantenökosystem existieren oder derzeit entwickelt werden – auf denen nun gezielt aufgebaut werden sollte.

Strategie und Zielsetzung. Die Bundesregierung positioniert sich klar mit der im Juli 2025 verabschiedeten Hightech Agenda Deutschland, die strategische Ziele für Quantentechnologien definiert und auf die langfristige Sicherung technologischer Souveränität und inter-

nationaler Wettbewerbsfähigkeit abzielt.³²³ (vgl. Kapitel 5.5) Ab Herbst 2025 sollen diese laut BMFTR durch eine Roadmap hinterlegt und operationalisiert werden.

Ökosystem-Infrastruktur. Die politische Gestaltung und Förderung eines innovationsfreundlichen Ökosystems für Quantentechnologien entwickelt sich derzeit sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene dynamisch.

Zunehmend rückt dabei die Bedeutung von **Normung, Standardisierung und Zertifizierung** in den Vordergrund – zur Sicherung von Interoperabilität, zur Förderung des Technologietransfers und zur Vorbereitung marktfähiger Anwendungen. Europaweit wurde 2023 erstmals eine Normungs-Roadmap veröffentlicht (DIN/CEN-CENELEC), gefolgt von konkreten Maßnahmen wie der Gründung des Normungsgremiums JTC 22 (mit Sekretariat beim DIN).^{324,325} Kompetenzzentren wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) etablieren bereits Mess- und Prüfstandards für Quantenkomponenten³²⁶, und Projekte wie QuNet haben teilweise schon Leitfäden für Unternehmen veröffentlicht. Zusätzlich werden Standardisierungsaktivitäten für sicherheitskritische Anwendungen angestoßen, etwa für autonome Systeme und den Bereich Medizin. Regulatorische PQC-Vorgaben existieren derzeit allerdings noch nicht – die aktive Implementierung von PQC basiert daher auf der Initiative von Vorreitern wie der Bundeswehr, die PQC bereits aktiv einsetzt.

Für die einzelnen Quantentechnologien entsteht in Deutschland eine umfassende, aber noch fragmentierte Infrastruktur:

- **Quantencomputing:** Seit 2021 steht in Ehningen mit dem IBM Quantum System One Europas erster kommerzieller Quantenrechner (27 Qubits) zur Verfügung.³²⁷ Zusätzlich entstehen deutsche Prototypen, etwa in Jülich (supraleitende Qubits), Hannover (Ionenfallen) und München (neutrale Atome). Standorte wie Jülich (Supercomputing Centre mit EuroHPC), Karlsruhe (KIT) und Garching (LRZ) dienen darüber hinaus als Testbeds für hybride Rechnersysteme.
- **Quantensensorik:** Die Infrastruktur zur Entwicklung und Erprobung von Präzisionssensorik für spezifische Anwendungsgebiete wie PTB-Strontiu-

³¹⁸ DLR (2025b).

³¹⁹ Thales Alenia Space (2023).

³²⁰ BSI (2024).

³²¹ IMDA (2025).

³²² KoreaTechToday (2023).

³²³ BMFTR (2025a).

³²⁴ CEN-CENELEC (2023).

³²⁵ DIN (2023).

³²⁶ PTB (2025a).

³²⁷ IBM Newsroom (2024)..

muhren und Quantengravimeter für die Meteorologie ist gut etabliert.³²⁸ Für andere Einsatzfelder (z. B. Industrie, Medizin) fehlen bislang umfassende Realtestfelder.

- **Quantenkommunikation:** Pilotnetze wie QuNET (seit 2019; quantensichere Netze für Behörden unter Beteiligung des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik, BSI) und erste Satellitentests (Quantenschlüsselverteilung mit CubeSat [QUBE, 2022]) bilden die Grundlage für das geplante bundesweite Glasfaser- und Satellitennetz EuroQCI.³²⁹ Parallel entsteht ein nationales Zeit- und Frequenznetz (PTB), das Quantenprotokolle synchronisiert.³³⁰ Zudem erfolgen europäische Abstimmungen (EuroQCI; European Telecommunications Standards Institute, ETSI) zur grenzüberschreitenden Quantenkommunikationsinfrastruktur.^{331,332}
- **Fertigungsinfrastruktur:** Kompetenzen der Nanofabrikation sind vorhanden, unter anderem am Fraunhofer IAF, PTB und dem Walther-Meißner-Institut (WMI). Großskalige Fertigungskapazitäten („Quantum Foundries“) bestehen jedoch bislang nicht.³³³

Die **europäische Förderlandschaft** umfasst das Quantum-Flagship-Programm (1 Mrd. €, 2018 – 2028)³³⁴, das ergänzt wird durch EU-weite Initiativen wie EuroHPC (Quantenbeschleuniger, Quantencomputer) und den EU Chips Act (Quantenchips).³³⁵ Deutsche Akteure profitieren hiervon stark – etwa durch Projekte wie den EuroHPC-Quantencomputer in Jülich oder das EU-weite Kommunikationsnetz EuroQCI.

Deutschland hat seine **nationalen Förderinstrumente** für Quantentechnologien seit 2020 deutlich ausgeweitet. Mit rund 2,18 Mrd. € an Bundesmitteln bis 2026 und zusätzlichen 850 Mio. € von Forschungsorganisationen (Fraunhofer; Helmholtz; Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG) zählt Deutschland international zu den am stärksten investierenden Ländern.³³⁶ Die Vielzahl an Projekten – darunter das BMFTR-Förderprogramm (Quantensysteme)³³⁷, BMWK-Programme³³⁸ zur Kommerzialisierung und Produktion sowie die DLR-Quantencomputing-Initiative mit direkten Indust-

rieraufträgen zur Prototypentwicklung³³⁹ – führt in der Praxis jedoch zu erheblichen Dopplungen bei Zielen und Förderungen. Hinzu kommen fragmentierte Länderinitiativen und regionale Cluster wie das Munich Quantum Valley oder Quantum BW, die ebenfalls teils ähnliche Vorhaben unterstützen.

Gleichzeitig besteht weiterhin ein wesentliches strukturelles Defizit bei der Verfügbarkeit großvolumigen Wachstumskapitals (Growth-Capital) für Deep-Tech-Unternehmen in kritischen Skalierungsphasen. Während Seed-Finanzierungen in Deutschland gut verfügbar sind, fehlt es an privaten Wagniskapitalgebern, die die notwendigen Investitionssummen für kapitalintensive Skalierungen bereitstellen. In Ländern wie den USA ist dieses Kapitalangebot oft um ein Vielfaches höher. Der Mangel an Growth-Capital ist ein wichtiger Grund dafür, dass deutsche und europäische Unternehmen (z. B. IonQ) ihre Standorte teils in Länder mit besseren Finanzierungsmöglichkeiten verlagern.

Insgesamt stellt die Zersplitterung und unzureichende Koordination sowohl der Infrastruktur als auch der Förderlandschaft eine zentrale Herausforderung dar. Zwar verfügen einzelne Standorte über hochmoderne Ausstattung, doch fehlen integrierte, zentral koordinierte Technologiezentren für verschiedene Quantenbereiche. Die parallele Fragmentierung der Förderstrukturen erhöht den administrativen Aufwand für Akteure und erschwert großskalige Investitionen – wie sie für die Skalierung kapitalintensiver Quantentechnologien erforderlich sind. Diese Unübersichtlichkeit mindert die Attraktivität des Standorts Deutschland für Investoren, Unternehmen und Fachkräfte, da oft unklar ist, welche Institution für welche Anliegen zuständig ist.

Bildung und Fachkräfte. Europa verfügt über eine ausgezeichnete akademische Infrastruktur zur **Ausbildung hochqualifizierter Fachkräfte** im Bereich der Quantentechnologien. Im internationalen Vergleich belegt die EU eine Spitzenposition bei der Zahl jährlicher Hochschulabsolventen (> 110.000) in quantenrelevanten Fächern, insbesondere Physik, Ingenieurwissenschaften sowie Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT).³⁴⁰ Trotz dieser starken Ausgangslage steht auch Deutschland vor einem sich verschärfenden Fachkräfteengpass. Zwar existieren spezialisierte Studi-

³²⁸ PTB (2025b).

³²⁹ QuNET (2025).

³³⁰ PTB (2025c).

³³¹ PETRUS (2025).

³³² ESA (2025).

³³³ Fraunhofer IAF (2025).

³³⁴ Quantum Flagship (o.J.).

³³⁵ EC (2025d).

³³⁶ BMBF (2023c).

³³⁷ BMBF (2022a).

³³⁸ BMWK (2024).

³³⁹ QCI (2022).

³⁴⁰ IQM (2025).

engänge – etwa Master Quantum Science & Technology der TU München und Quantum Engineering der Universität des Saarlandes –, diese liefern jedoch derzeit nicht genügend Absolventen.^{341,342} Das BMFTR fördert bereits gezielt Nachwuchsformate wie die Quantum Future Academy (seit 2018 jährlich) sowie Weiterbildungsinitiativen (z. B. Quantum Training Alliance, QTA, und IBM-Q-Schulungen bei Fraunhofer), um bestehende Engpässe zu reduzieren.³⁴³

Zur **internationalen Fachkräftegewinnung** nutzt Deutschland Programme wie die Humboldt-Professur, European-Research-Council-(ERC-)Grants und seit 2024 das Quantenpersonalabkommen mit den USA.³⁴⁴ Insbesondere große internationale Tech-Konzerne, die in Deutschland gezielt Quantenteams aufbauen (z. B. das IBM Quantum Lab in Ehningen), ziehen sowohl nationale als auch internationale Talente an.

Um gesamtgesellschaftliche Akzeptanz und Verständnis zu steigern, fördert das BMFTR gezielt innovative Kommunikationsformate wie interaktive Videos (QuExplained), VR-Erlebnisse und spielerische Ansätze (Quantum Escape Rooms).^{345,346} Insbesondere Schüler werden über mobile Labore (Turing-Bus) frühzeitig angesprochen.³⁴⁷ Ergänzend veranstaltet das BMFTR regelmäßig das „Quantum Futur“-Programm zur Förderung der Sichtbarkeit von quantentechnologischen Anwendungen.³⁴⁸ Industrieverbände wie Bitkom, ZVEI^{349,350} und VDMA³⁵¹ leisten durch Leitfäden und Marktberichte Aufklärungsarbeit bei Unternehmen, während politische Entscheidungsträger durch parlamentarische Dialoge (z. B. acatech) informiert werden.^{352,353} Zudem fördern Initiativen wie Quantum Technology & Application Consortium (QUTAC) die Verbreitung industrieller Use-Cases (z. B. Lieferkettenoptimierung bei BMW), um Unternehmen konkret einzubinden.³⁵⁴ Dennoch fehlt bislang eine umfassende gesellschaftliche Wahrnehmung. Um dies zu ändern, wird es hilfreich sein, frühzeitige und greifbare Erfolge (z. B. erste industrielle Anwendungen) sichtbar und öffentlichkeitswirksam zu kommunizieren.

Technologietransfer und -skalierung. Der Transfer von Quantentechnologien aus der Forschung in wirtschaftliche Entwicklung und Anwendung ist ein zentraler Erfolgsfaktor für die Wettbewerbsfähigkeit. Obwohl Europa international zu den führenden Regionen in der Quantenforschung und bei Patentanmeldungen zählt (Platz 3 hinter den USA und China)³⁵⁵, bleibt die Überführung von Innovationen in industrielle Entwicklung und Skalierung eine Herausforderung. Um gegenzusteuern, fördern Akteure wie die Fraunhofer-Institute den Technologietransfer aktiv – etwa durch die Anwendungszentren Quantencomputing in Ehningen und Aachen oder durch Kooperationen wie IBM Q.³⁵⁶ Auch DFG-Exzellenzcluster, beispielsweise das Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST), unterstützen Spin-offs und Innovation-Labs.

Seit etwa fünf Jahren entstehen erfreulicherweise zunehmend Quanten-Start-ups, darunter Q.ANT (TRUMPF-Ausgründung zur photonischen Sensorik),³⁵⁷ HQS Quantum Simulations (Quantensoftware für die Chemie³⁵⁸) und eleQtron (Ausgründung der Universität Siegen für Ionenfallen-Quantencomputer).³⁵⁹ Zudem zeigen Pilotprojekte (PoCs) relevante industrielle Anwendungen – etwa Verkehrsflussoptimierung mit Hilfe von Quantenalgorithmen (Volkswagen Gruppe), Materialsimulation mit Quantensoftware (BASF) sowie quantenverschlüsselte Kommunikationsnetze (Telekom).

Dennoch bestehen weiterhin Hürden: Patente werden oft aufgrund unattraktiver IP-Regelungen nicht verwertet, und sowohl Unternehmen als auch Kapitalgeber investieren wegen hoher technischer Unsicherheit nur zögerlich in den Technologietransfer und die Skalierung. Um hier Abhilfe zu schaffen, wird es entscheidend sein, erfolgreiche Beispiele sichtbar zu machen, die kontinuierliche Förderung bis zur industriellen Nutzung sicherzustellen sowie den IP- und Technologietransfer deutlich zu vereinfachen. Die Bundesregierung strebt bis 2026 ein unternehmerisches Quantenökosystem an, das Deutschland an die Spitze Europas führen soll – Voraussetzung dafür ist jedoch der konsequente Abbau bestehender Transferhürden.

³⁴¹ Kooperation international (2024).

³⁴² BMBF (2022b).

³⁴³ BMBF (2018).

³⁴⁴ Alexander von Humboldt-Stiftung (2025).

³⁴⁵ QuantumFrontiers (2025).

³⁴⁶ Quantum Escape Challenge (2025).

³⁴⁷ GI (2025).

³⁴⁸ Photonik Forschung Deutschland (2025).

³⁴⁹ ZVEI (2023a).

³⁵⁰ ZVEI (2023b).

³⁵¹ VDMA (2025b).

³⁵² Bitkom (2022).

³⁵³ ABgcatech (2020).

³⁵⁴ i40-magazin (2021).

³⁵⁵ QuIC (2025).

³⁵⁶ Fraunhofer IGD (2025).

³⁵⁷ Ensun (2025).

³⁵⁸ HQS Quantum Simulations (2025).

³⁵⁹ eleQtron (2025).

Kooperation. Deutschland verfügt bereits über zahlreiche etablierte Plattformen und Initiativen zur Förderung von Kooperationen im Bereich der Quantentechnologien zwischen Industrie, Wissenschaft und öffentlichen Einrichtungen. Zu diesen gehören etwa das Munich Quantum Valley, Quantum BW, QUTAC, EIN Quantum NRW sowie das Quantum Valley Lower Saxony (QVLS Niedersachsen). Diese Netzwerke schaffen wichtige Voraussetzungen für den Austausch und die Bündelung industrieller und wissenschaftlicher Kompetenzen, bleiben jedoch teilweise fragmentiert und regional begrenzt.

Zudem bestehen auf Bundesebene Initiativen wie die Quantencomputing-Initiative des Zentrums für Luft- und Raumfahrt, die explizit Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen fördern, sich jedoch stärker auf projektbezogene Zusammenarbeit konzentrieren.³⁶⁰

Europäische Kooperationen wie EuroHPC und EuroQCI sind etabliert und bieten eine bedeutende Grundlage für grenzüberschreitende Zusammenarbeit und die Bündelung von Ressourcen. Konkrete Beispiele sind das EuroHPC-Projekt HPCQS, bei dem seit 2021 zwei Quantensimulatoren in klassische Supercomputer integriert werden (unter anderem in Deutschland und Frankreich),³⁶¹ sowie die EuroQCI-Initiative EAGLE-1, Europas erste satellitengestützte Quantenkommunikationsmission, die voraussichtlich ab Ende 2025 einen sicheren Quantenkanal zwischen Satellit und Bodenstationen aufbauen soll.³⁶²

Viele der aktuell bestehenden nationalen und europäischen Kooperationsformen fokussieren sich auf spezifische technologische Bereiche oder einzelne Leuchtturmprojekte, während breit angelegte und dauerhaft institutionalisierte Kooperationsnetzwerke und -formate eher die Ausnahme als die Regel sind. Um langfristig internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, bedarf es daher weiterhin einer gezielten und systematischen Stärkung transdisziplinärer Kooperationen.

Innovation, Forschung und Entwicklung. Die deutsche Innovationslandschaft zeichnet sich durch leistungsfähige Forschungseinrichtungen wie Fraunhofer und Helmholtz, Forschungsnetzwerke wie die DFG sowie renommierte Universitäten und Exzellenzcluster aus. Diese institutionelle Stärke manifestiert sich in einer Vielzahl hochrangiger wissenschaftlicher Publikationen und Patentanmeldungen (jeweils Platz 4 im internationalen Vergleich)³⁶³, die Deutschland zu einem global bedeutenden Standort für Grundlagenforschung in Quantentechnologien machen. Zudem verfügt Deutschland über eine starke öffentliche Förderlandschaft für akademische Forschung und Entwicklung im Bereich Quantentechnologien, geprägt durch umfassende staatliche Programme und signifikante Finanzmittel (vgl. Ökosystem-Infrastruktur).

5.5. Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken

Wie die Bestandsaufnahme und die Analyse der globalen Wettbewerbslandschaft gezeigt haben, sind Quantentechnologien ein entscheidender Faktor für künftige Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität. Um Wertschöpfung, Sicherheit und industrielle Führungspositionen zu sichern, müssen Entwicklung und Anwendung gleichermaßen berücksichtigt werden – von der Forschungsinfrastruktur bis zur industriellen Integration. In der aktuellen Phase der Strategieneuorientierung gilt es daher, Prioritäten klug zu setzen, Ressourcen wirkungsvoll zu bündeln und die Weichen für eine breite Nutzung quantentechnologischer Potenziale zu stellen. Quantentechnologien sollten dabei als Querschnittsthema verstanden werden – mit Relevanz für Forschung, Industrie, Sicherheit und Digitalisierung. Die folgenden Handlungsempfehlungen zeigen auf, welche Schritte dafür notwendig sind.

³⁶⁰ DLR (2025c).

³⁶¹ HPCQS (2021-2025).

³⁶² ESA EAGLE-1 (2025).

³⁶³ BMBF (2023c).

Bezug zur Hightech Agenda Deutschland

Die Bundesregierung hat mit der Hightech Agenda Deutschland die strategische Bedeutung der Quantentechnologien erkannt und explizite Ziele für die drei Säulen der Deep-Tech-Quantenforschung formuliert:

1. „Im **Quantencomputing** wollen wir bis zum Jahr 2030 mindestens zwei fehlerkorrigierte Quantencomputer auf europäischem Spitzenniveau realisieren und diese Nutzern zugänglich machen.“
2. „Wir sorgen dafür, dass bis 2030 mithilfe von **Quantensensoren** Krankheiten frühzeitiger erkannt werden und erschließen mindestens ein weiteres Anwendungsfeld für die Technologie.“
3. „In der **Quantenkommunikation** werden wir das Innovationsökosystem stärken und weiter ausbauen – dabei sollen die Perspektiven der Endanwender stärker Eingang finden.“
4. „Wir stärken die Fachkräftebasis in den Quantentechnologien.“³⁶⁴

Insbesondere die konkreten messbaren Ziele für Quantencomputing und Quantensensorik sind ein wichtiger Schritt. Entscheidend ist nun, daraus eine strategisch abgestimmte Roadmap zu entwickeln, die systematisch rückwärts von den politisch festgelegten Zielen denkt und diese mit klaren Maßnahmen, Meilensteinen und Verantwortlichkeiten unterlegt. Eine solche Roadmap ist für Herbst 2025 angekündigt und sollte konsequent genutzt werden, um Quantentechnologien in Deutschland nachhaltig voranzubringen.

Vor dem Hintergrund der starken industriellen Basis Deutschlands eröffnet sich die einmalige Chance, die Entwicklung quantentechnologischer Anwendungen gezielt mit bestehenden Kernkompetenzen in Branchen wie Automobil, Chemie, Pharma und Maschinenbau zu verknüpfen. Diese industrieorientierte Perspektive sollte in der angekündigten Roadmap klar adressiert werden.

Die nachfolgend formulierten Handlungsempfehlungen verstehen sich als gezielter Impuls für die Ausgestaltung und Priorisierung dieser Roadmap. Sie sollen dazu beitragen, die technologische und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im Bereich der Quantentechnologien nachhaltig zu sichern und die Umsetzung der Hightech Agenda Deutschland wirksam zu unterstützen.

³⁶⁴ BMFTR (2025a).

Handlungsfeld	Handlungsempfehlung
Strategie und Zielsetzung 	<p>Q1 - Entwicklung einer sicherheits- und verteidigungspolitischen Strategie für Quantentechnologien</p> <p>Q2 - Standardisierte Implementierung quantensicherer Kryptografie, angeführt von staatlichen Stellen</p>
Ökosystem-Infrastruktur 	<p>Q3 - Frühzeitige Definition technologiendifferenzierter IP-Regelungen für Algorithmus- und Prozessschutz</p> <p>Q4 - Aufbau technologischer Kompetenzen entlang des Quantensoftware- und -hardware-Stacks mit Fokus auf kritische Technologien</p> <p>Q5 - Entwicklung langfristiger, koordinierter Förderstrukturen auf EU- und Bundesebene</p> <p>Q6 - Einrichtung einer koordinierenden Steuerungsstelle für Quantentechnologien durch die Politik</p> <p>Q7 - Strategischer Ausbau und flexible Nutzung bestehender Infrastruktur für skalierbare Quantentechnologien</p>
Bildung und Fachkräfte 	<p>Q8 - Etablierung interdisziplinärer, quantennaher Bildungsformate mit Industriebezug</p>
Technologie-transfer und -skalierung 	<p>Q9 - Differenzierte Entwicklung von Quantentechnologien entlang der Nutzungspfade</p> <p>Q10 - Aufbau staatlicher Ankerkunden in Quantencomputing, Quantensensorik und Quantenkommunikation</p> <p>Q11 - Vereinfachung von Spin-off-Prozessen an Hochschulen zur Förderung von Quanteninnovationen</p>
Kooperation 	<p>Q12 - Bündelung von Forschungs- und Anwendungsstrukturen in Technologie-Hubs, um Entwicklung und Skalierung zu beschleunigen</p>
Innovation, Forschung und Entwicklung 	<p>Q13 - Innovationsförderung mit Fokus auf Fehlerkorrektur, Skalierung und hybride Architekturen in allen Quantenfeldern</p> <p>Q14 - Anreizsetzung zur Veröffentlichung von Forschungsdaten und Open-Source-Komponenten durch Industrie und Wissenschaft</p>

Quelle: BCG-Analyse

Q1 - Strategie und Zielsetzung: Entwicklung einer sicherheits- und verteidigungspolitischen Strategie für Quantentechnologien.

Quantentechnologische Entwicklungen sollten gezielt und frühzeitig in sicherheitspolitische Strategien und Vorhaben Deutschlands integriert werden. Während im Bereich der Quantenkommunikation bereits heute erhebliche sicherheitspolitische Investitionen erfolgen, sollte die Bundesregierung in Abstimmung mit europäischen Partnern auch für Quantencomputing und Quantensensorik strategische Förderstrukturen etablieren. Diese sollten klar auf den Aufbau souveräner technologischer Fähigkeiten ausgerichtet sein, um Deutschlands Handlungsfähigkeit im globalen sicherheitspolitischen Kontext langfristig sicherzustellen.

Durch die gezielte Allokation von Mitteln aus dem Verteidigungsbudget in strategisch ausgewählte quantentechnologische Vorhaben kann eine doppelte Wirkung entfaltet werden: Einerseits lassen sich sicherheitsrelevante Forschungsprojekte frühzeitig anschieben und finanziell absichern, andererseits entsteht eine belastbare technologische Basis, die sich langfristig auch für zivile Anwendungen nutzen lässt – etwa in der Luft- und Raumfahrt oder der digitalen Infrastruktur. Eine solche Investition kann somit unmittelbar zur Stär-

kung der deutschen Souveränität und zum wirtschaftlichen Wachstum beitragen.

Die Politik ist gefordert, klare sicherheitspolitische Zielsetzungen für Quantentechnologien zu formulieren, strategische Prioritäten festzulegen sowie geeignete Finanzierungs- und Kooperationsformate zu etablieren. Dabei sollten Synergien zwischen ziviler Forschung und Wirtschaft sowie dem Verteidigungssektor gezielt genutzt und Hürden in der Zusammenarbeit mit Sicherheits- und Verteidigungsinstitutionen abgebaut werden. Das Einbringen von Wissen aus Forschung und Industrie fördert zudem die Entwicklung verteidigungsrelevanter quantentechnologischer Lösungen, indem vorhandene technologische Kompetenzen gebündelt und kooperativ weiterentwickelt werden.

Q2 - Strategie und Zielsetzung: Standardisierte Implementierung quantensicherer Kryptografie, angeführt von staatlichen Stellen.

Um die langfristige Cybersicherheit Deutschlands angesichts kommender quantenbasierter Bedrohungen zu gewährleisten, sollte die Politik eine verbindliche Verpflichtung zur zügigen Standardisierung und Implementierung quantensicherer Kryptografie in allen staatlichen Behörden und kritischen Infrastruktura-

ren beschließen. Diese Migration sollte idealerweise eng mit der von der EU veröffentlichten Roadmap zur Transition³⁶⁵ auf Post-Quanten-Kryptografie abgestimmt werden, um Kompatibilität und einheitliche Sicherheitsstandards auf europäischer Ebene sicherzustellen. Zudem sollte Deutschland seine regulatorischen Vorgaben mit EuroQCI koordinieren, um frühzeitig quantensichere Kommunikationsnetze zu etablieren und Synergien auf europäischer Ebene zu schaffen. Staatliche Akteure können dabei eine wichtige Vorreiterrolle einnehmen, indem sie die Implementierung von Post-Quanten-Kryptografie selbst frühzeitig vorantreiben und so eine vertrauenswürdige Grundlage für Wirtschaft und Gesellschaft schaffen. Zugleich fungieren sie als Ankerkunden für technologische Lösungen und tragen entscheidend zum Aufbau der hierfür notwendigen Industrie- und Kompetenzbasis in Deutschland bei.

Ergänzend dazu ist es wichtig, dass sich Industrie und Verbände frühzeitig auf die bevorstehende technologische Umstellung vorbereiten. Es sollten gezielte Anreize geschaffen werden, damit Unternehmen eigenständig und proaktiv in die Migration zu quantensicherer Kryptografie investieren. Industrieverbände können dabei unterstützen, indem sie branchenspezifische Leitlinien und praxisnahe Handlungsanleitungen entwickeln, um Unternehmen bestmöglich zu begleiten. Forschungseinrichtungen sollten technologische Expertise bereitstellen. Zudem gilt es, unabhängige Prüf- und Zertifizierungsverfahren auf europäischer Basis zu entwickeln, um die praktische Implementierung quantensicherer Lösungen sowohl technisch als auch organisatorisch zu begleiten.

Q3 - Ökosystem-Infrastruktur: Frühzeitige Definition technologiedifferenzierter IP-Regelungen für Algorithmus- und Prozessschutz.

Angesichts des dynamischen Innovationsumfelds im Bereich der Quantentechnologien ist die frühzeitige Entwicklung technologiedifferenzierter Strategien zum Schutz geistigen Eigentums von zentraler Bedeutung. Insbesondere im Hinblick auf proprietäre Algorithmen, Prozessdesigns und softwarebasierte Komponenten – etwa Quantenalgorithmen, Compiler-Technologien oder Steuerprotokolle – bestehen derzeit Unsicherheiten hinsichtlich der Schutzfähigkeit und rechtlichen Durchsetzbarkeit. Während klassische IP-Instrumente wie Patente insbesondere im Hardwarebereich etabliert sind, bedarf es für softwaredominierte Felder angepasster Konzepte.

Erforderlich sind gezielte IP-Strategien, die unterschiedliche Schutzbedarfe adressieren – etwa durch eine Kombination aus Urheberrecht, Geschäftsgeheimnis und selektiver Patentierung. Wie bereits im Zusam-

menhang mit IP-rechtlichen Fragestellungen zu KI dargelegt, sollten die bestehenden Rechtsunsicherheiten durch eine Weiterentwicklung des IP-Rechtsrahmens geklärt werden.

Die Politik ist gefordert, klare Rahmenbedingungen zu schaffen und diese aktiv zu unterstützen, indem öffentliche Förderprojekte eindeutige Anforderungen an die Entwicklung und Umsetzung von IP-Strategien stellen. Zudem sollte sie begleitende Strukturen anbieten, beispielsweise durch Beratungseinrichtungen, die Bereitstellung von Musterverträgen oder zentrale IP-Transferstellen.

Die Entwicklung, Implementierung und konsequente Anwendung eigenständiger technologieabhängiger IP-Strategien durch Industrie und Forschungseinrichtungen würde es ermöglichen, innovationskritische Komponenten gezielt zu schützen und langfristige Wettbewerbsvorteile zu sichern. Entscheidend ist, frühzeitig gemeinsame Standards zu etablieren, um IP-Konflikte zu vermeiden und den Transfer in marktfähige Anwendungen sicherzustellen. Auch strategische Open-Source-Modelle sollten von der Industrie aktiv erwogen und umgesetzt werden, insbesondere zur Etablierung gemeinsamer Plattformstandards.

Q4 - Ökosystem-Infrastruktur: Aufbau technologischer Kompetenzen entlang des Quantensoftware- und -hardware-Stacks mit Fokus auf kritische Technologien.

Um Deutschlands technologische Souveränität in den Quantentechnologien zu erhöhen, ist ein klar priorisierter und differenzierter Aufbau von Forschungs- und Produktionskapazitäten entlang des Quantensoftware- und -hardware-Stacks erforderlich. Kritische Technologien und Komponenten, bei denen Abhängigkeiten besonders risikoreich wären (z. B. Quantenchips, Kryptotechnik, Laser, photonische Bauteile), sind systematisch zu identifizieren und gezielt zu adressieren.

Für eine effiziente Umsetzung sollte sichergestellt werden, dass Forschungsinvestitionen weder unkoordiniert noch redundant erfolgen. Dies erfordert eine zentrale Koordination der Forschungsaktivitäten, deren Fortschritt regelmäßig anhand transparenter Schlüsselkennzahlen evaluiert werden sollte. Auch im Bereich Quantenkommunikation müssen kritische Abhängigkeiten – etwa bei Schlüsselkomponenten für QKD, kryptografischen Standards und FPGA-basierten Kontrollsystemen – aktiv gemanagt werden. In der Quantensensorik sind nationale Koordinierungsstrukturen und Roadmaps für Schlüsseltechnologien wie atomare Gravimeter, präzise Magnetometer oder portable Atomuhren dringend erforderlich.

³⁶⁵ EC (2025e).

Der deutsche Aufbau von Kompetenzen sollte eng mit relevanten EU-Initiativen wie der Quantum Chips Industrialisation Roadmap verzahnt werden, um eine souveräne europäischen Wertschöpfungskette zu fördern und kritische Abhängigkeiten zu reduzieren. Deutschland sollte dabei eine ambitionierte Strategie verfolgen, die sich einerseits auf strategische Schlüsseltechnologien konzentriert und andererseits den Aufbau vollständiger souveräner Systeme in ausgewählten Hardwaretechnologien innerhalb von Quantencomputing, Quantensensorik und Quantenkommunikation vorantreibt. Zentral hierfür ist ein klares politisches und wirtschaftliches Bekenntnis zur eigenständigen europäischen Quantenhardwareentwicklung, insbesondere mit Blick auf die Weiterentwicklung des Handlungskonzepts Quantentechnologien nach 2026 sowie die bevorstehende Ausgestaltung der in der Hightech Agenda festgelegten Zielsetzungen.

Industrie und Wissenschaft sollten diesen Technologieaufbau gemeinsam gestalten: Unternehmen müssen eigenständig Kompetenzen in kritischen Bereichen des Technologie-Stacks entwickeln, während Forschungseinrichtungen frühzeitig strategische Lücken identifizieren und durch gezielte Forschung schließen. Wichtige Forschungsschwerpunkte sind Fehlerkorrektur, Skalierung und hybride Architekturen, um robuste, langfristig nutzbare Systeme zu ermöglichen. Parallel zur Hardware ist der Aufbau umfassender Softwarefähigkeiten entscheidend. Im Bereich Quantencomputing sollten unabhängige, interoperable Softwarelösungen entstehen, um technologische Abhängigkeiten und einen Vendor-Lock-in langfristig zu vermeiden. Analog dazu sollte die Entwicklung interoperabler Protokolle und Softwarestandards für die Quantenkommunikation (QKD-Schlüsselmanagement, Netzwerk-Routing) und die Quantensensorik (Ausleseplattformen, Echtzeitschnittstellen) gezielt gefördert werden.

Q5 - Ökosystem-Infrastruktur: Entwicklung langfristiger, koordinierter Förderstrukturen auf EU- und Bundesebene.

Um die Wettbewerbsfähigkeit Europas und insbesondere Deutschlands langfristig zu sichern, sollte die Politik eine klar koordinierte und nachhaltige Förderstruktur etablieren. Diese sollte langfristig ausgerichtet und frei von kurzfristigen gesellschaftlichen Begeisterungszyklen gestaltet sein. Die EU-Quantenstrategie verfolgt das Ziel, durch eine Kombination von Maßnahmen – etwa Kompetenzzentren, Wettbewerben und der Förderung durch öffentliche Ausschreibungen – die Kommerzialisierung von Quantentechnologien voranzubringen. Das europäische Förderprogramm könnte jedoch noch stärker gebündelt und mit den deutschen Initiativen verzahnt werden.

Zudem sollte Deutschland nationale Förderstrukturen weiter auf die Entwicklung von Deep Tech ausrichten. Konkret sollte die Bundesregierung der derzeit bestehenden Finanzierungslücke für Deep-Tech-Unternehmen in den entscheidenden Skalierungsphasen entgegenwirken. Dazu sollten gezielt auf diese Wachstumsphase zugeschnittene Finanzierungsinstrumente eingerichtet werden (vgl. Kapitel 7). Es empfiehlt sich den Deep-Tech-Schwerpunkt im Zukunftsfonds auszubauen – etwa im Rahmen des geplanten Zukunftsfonds II – um einen speziell auf Deep Tech zugeschnittenen Wachstumsfonds zu etablieren. Dieser sollte explizit Quantentechnologien einschließen. Der Fonds sollte in der Lage sein, pro Investition deutlich größere Kapitalvolumina bereitzustellen als bisherige Vehikel, und diese gezielt in vielversprechende Vorhaben zu investieren, um eine global konkurrenzfähige Skalierung der Unternehmen zu ermöglichen.

Zudem sollte der Fonds gezielt privates Growth-Capital durch Co-Investitionen mobilisieren, um eine nachhaltige Finanzierungsbasis sicherzustellen. Die Bundesregierung sollte hierfür zusätzlich Anreizstrukturen schaffen (z. B. durch temporäre Steuerbefreiungen), die privates Wagniskapital für großvolumige Investitionen erschließen und so Investitionssummen auf ein international wettbewerbsfähiges Niveau heben.

Q6 - Ökosystem-Infrastruktur: Einrichtung einer koordinierenden Steuerungsstelle für Quantentechnologien durch die Politik.

Zur strategischen Stärkung des Quantentechnologiestandorts Deutschland empfiehlt sich die Einrichtung einer zentralen politischen Steuerungsstelle. Diese sollte ausdrücklich mit der Entwicklung und Umsetzung der sicherheits- und verteidigungspolitischen Strategie für Quantentechnologien betraut sein. So ließen sich bestehende Initiativen und Akteure effizient bündeln, koordinierte Förderstrukturen schaffen und klare Verantwortlichkeiten definieren. Zentrale Aufgaben wären die strategische Priorisierung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die gezielte Allokation finanzieller Ressourcen sowie eine enge Vernetzung von Wissenschaft, Wirtschaft, und staatlichen Institutionen – einschließlich Sicherheits- und Verteidigungsakteuren – auf nationaler und europäischer Ebene.

Die Einrichtung dieser Steuerungsstelle ermöglicht eine systematische Ausrichtung der bislang fragmentierten quantentechnologischen Landschaft auf langfristige strategische Ziele. Dies würde nicht nur die Effizienz der eingesetzten Mittel deutlich erhöhen, sondern könnte auch den Technologietransfer beschleunigen und Deutschlands nationale und internationale Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig stärken.

Q7 - Ökosystem-Infrastruktur: Strategischer Ausbau und flexible Nutzung bestehender Infrastruktur für skalierbare Quantentechnologien.

Die künftige Skalierung quantentechnologischer Anwendungen erfordert eine strategisch geplante Infrastruktur entlang des gesamten Technologie-Stacks – vom hardwarenahen Stack über Enabler-Technologien bis hin zur Softwareintegration. Deutschland verfügt bereits über führende Einrichtungen, etwa im Bereich der Enabler-Technologien, deren gezielte Nutzung die Entwicklung beschleunigen kann.

Entscheidend wird nun sein, die bestehende, relevante Infrastruktur systematisch zu identifizieren, bedarfsgerecht weiterzuentwickeln und flexibel zugänglich zu machen – insbesondere für Start-ups und technologiegetriebene KMUs. Neben industriellen Einrichtungen steht auch die Anpassung und intelligente Nutzung vorhandener Kapazitäten von Forschungseinrichtungen wie den Fraunhofer-Instituten im Fokus, um schnelle Umsetzungen und Kosteneffizienz sicherzustellen.

Es sollten klare Zugangs- und Nutzungsmodelle eingeführt werden, die es insbesondere Start-ups ermöglichen, bestehende Forschungs- und Produktionsinfrastrukturen flexibel und kosteneffizient für die Entwicklung und Vorbereitung skalierbarer Produktionsprozesse von Quantenhardware und -software zu nutzen. Zudem sollten europäische Infrastrukturprojekte wie das EuroHPC JU für Computing und Quantensimulation oder die Q-MRI-Pilotinfrastruktur für Quantensensorik aktiv von deutschen Akteuren genutzt und mitgestaltet werden.

Q8 - Bildung und Fachkräfte: Etablierung interdisziplinärer, quantennaher Bildungsformate mit Industriebezug.

Um dem akuten Fachkräftemangel in den Quantentechnologien wirksam zu begegnen, sollte die Politik gezielt interdisziplinäre Bildungsformate initiieren und finanziell unterstützen, die nicht nur auf Quantentechnologien fokussieren, sondern auch Enabler-Technologien (z. B. Mikroelektronik, Photonik, Kryotechnik) sowie synergetische Schlüsseltechnologien wie KI systematisch einbeziehen. Die Wissenschaft ist hierbei maßgeblich für die inhaltliche Gestaltung der Bildungsangebote und die Sicherstellung des erforderlichen fachlichen Niveaus zu konsultieren. Industrieunternehmen sollten aktiv einbezogen werden, um zu gewährleisten, dass Inhalte praxisnah und technologisch aktuell bleiben – etwa durch gemeinsame Curricula, Industrieprojekte, Praktika und Mentoring-Programme.

Neben der Schaffung neuer quantenspezifischer Studiengänge auf Bachelor- und Master-Ebene sollten modulare, anwendungsorientierte Weiterbildungsprogramme sowie duale Studien- und Ausbildungsmodule entwickelt werden, die insbesondere Nachwuchskräfte und Quereinsteiger aus relevanten angrenzenden Disziplinen (z. B. Elektrotechnik, Informatik, Materialwissenschaften) ansprechen. Ergänzend braucht es strukturelle Qualifizierungsangebote für Fachkräfte aus angrenzenden technischen Disziplinen wie Ingenieurwissenschaften, um vorhandenes Know-how systematisch auf den Einsatz in Quantenfeldern auszurichten. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei darauf liegen, Talente langfristig in Deutschland zu halten sowie attraktive Karrierewege in Forschung, Industrie und Start-ups zu eröffnen.

Der parallele Aufbau eines nationalen Weiterbildungsportals für Quantenkompetenzen könnte bestehende Bildungsangebote sichtbar machen und zugleich die Abstimmung auf europäischer Ebene unterstützen – etwa mit der geplanten EU Quantum Skills Academy.³⁶⁶

Q9 - Technologietransfer und -skalierung: Differenzierte Entwicklung von Quantentechnologien entlang der Nutzungspfade.

Der Aufbau quantentechnologischer Souveränität muss nicht nur technologiegetrieben, sondern auch nutzungsorientiert differenziert erfolgen. Zwei strategische Nutzungspfade lassen sich unterscheiden: Quantencomputing und Quantensensorik können einerseits bestehende Produkte und Prozesse optimieren (z. B. chemische Simulation, Logistikoptimierung), andererseits direkt als Bestandteil neuer Produkte und Dienste wirken (z. B. Sensorik in der Medizintechnik, quantensichere Kommunikation). Beide Pfade sind technologisch und wirtschaftlich bedeutsam, stellen jedoch unterschiedliche Anforderungen an Entwicklungszyklen, Infrastrukturen, Sicherheitsstandards und Kompetenzprofile. In Deutschland dominiert bislang der optimierungsorientierte Pfad – eine ambitionierte Gesamtstrategie sollte jedoch beide Ansätze systematisch adressieren. Dazu gehören klare Zielbilder, abgestimmte Fördermechanismen sowie ein gezielter Kompetenzaufbau in Industrie, Forschung und Verwaltung. Dieser Aufbau sollte eng mit der für 2026 geplanten EU Quantum Skills Academy abgestimmt sein, um passgenaue Profile für beide Nutzungspfade zu schaffen. Nur so lässt sich sicherstellen, dass Quantentechnologien nicht nur angewendet, sondern auch produktprägend aus Deutschland heraus entwickelt und vermarktet werden können.

³⁶⁶ EC (2024d).

Q10 - Technologietransfer und -skalierung: Aufbau staatlicher Ankerkunden in Quantencomputing, Quantensensorik und Quantenkommunikation.

Um technologische Souveränität zu stärken und frühzeitig Märkte für Deep-Tech-Innovationen zu schaffen, sollten staatliche Institutionen und Betreiber kritischer Infrastrukturen in allen drei Quantentechnologien gezielt als Ankerkunden fungieren.

- In der Quantenkommunikation ist ein besonderer Fokus auf den Ausbau bundesweiter Glasfasernetze und einer satellitengestützten Kommunikationsinfrastruktur zu legen. Dazu zählt insbesondere der beschleunigte Aufbau einer quantenverschlüsselten Netzinfrastruktur sowie interoperabler Netzknoten als Grundlage für ein europäisches Quanteninternet.
- In der Quantensensorik sollten staatliche Akteure und regulierte Branchen (z. B. Mobilität, Medizin, Sicherheit) als erste Anwender auftreten, um die Überführung von relevanten Innovationen in marktfähige Anwendungen zu beschleunigen.
- Auch im Quantencomputing gilt es, staatliche Bedarfe frühzeitig zu identifizieren (etwa in Simulation, Optimierung oder Kryptografie) und diese gezielt in Pilotprojekten mit relevanten Innovationsakteuren zu adressieren.

Q11 - Technologietransfer und -skalierung: Vereinfachung von Spin-off-Prozessen an Hochschulen zur Förderung von Quanteninnovationen.

Um die Übersetzung von quantentechnologischen Forschungsergebnissen in wirtschaftliche Anwendungen zu beschleunigen, sollten die rechtlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen für Ausgründungen aus Hochschulen und Forschungsinstituten deutlich vereinfacht und vereinheitlicht werden. Darunter fällt die Reduktion bürokratischer Hürden – etwa durch digitale Antragsverfahren und verkürzte Laufzeiten von Förderprogrammen –, sowie auch die Schaffung klarer und transparenter Rahmenbedingungen für Gründer.

Ein entscheidender Aspekt betrifft den Umgang mit geistigem Eigentum, der als zentrale Dimension in Spin-off-Prozesse integriert werden muss. Hier gilt es, klare und verlässliche IP-Regelungen zu entwickeln, die den Transfer von Forschungsergebnissen in Start-ups erleichtern und gleichzeitig den Schutz von Innovationen sicherstellen. Dabei reicht eine undifferenzierte Standardlösung nicht aus. Vielmehr erfordert es eine technologiespezifische Ausgestaltung: Je nach Charakter der Innovation – ob Hardware, Software, Algorithmen oder Prozessdesigns – müssen unter-

schiedliche Schutz- und Transfermodelle zur Anwendung kommen (vgl. Handlungsempfehlung Q3).

Industrie und Verbände können Hochschulen und Forschungseinrichtungen bei der Gestaltung von Lizenzmodellen und IP-Verträgen mit Expertise und Erfahrung unterstützen. Forschungseinrichtungen wiederum sollten klare, standardisierte Leitlinien für IP-Transfers etablieren und Ausgründungen aktiv fördern – etwa durch spezialisierte Spin-off-Programme –, um das volle wirtschaftliche Potenzial der Quantenforschung effizient zu erschließen.

Q12 - Kooperation: Bündelung von Forschungs- und Anwendungsstrukturen in leistungsfähigen Technologie-Hubs, um Entwicklung und Skalierung von Quantentechnologien zu beschleunigen.

Die Entwicklung und Skalierung von Quantentechnologien erfordert – wie auch bei anderen Zukunftstechnologien – umfangreiche, spezialisierte und kapitalintensive Infrastruktur. Damit haben große Forschungseinrichtungen mit entsprechenden Budgets einen deutlichen Vorteil gegenüber den derzeit zahlreichen, kleineren und fragmentierten Exzellenzclustern. Bestehende regionale Cluster, Forschungsinitiativen und Anwendungszentren sollten daher zu leistungsfähigen Technologie-Hubs konsolidiert werden. Die Zusammenführung mehrerer kleiner Initiativen bietet die Möglichkeit die notwendigen Skalen- und Netzwerkeffekte zu erzielen und die Ressourcen zu mobilisieren, die für die kapitalintensive Forschung in der Quantentechnologie erforderlich sind.

Die Technologie-Hubs dienen dabei als langfristige F&E-Strukturen, um führende akademische Einrichtungen mit forschungsstarken Industriepartnern, Start-ups und Großunternehmen in strategisch relevanten Technologiefeldern zu vernetzen – etwa in Quantenhardware, Algorithmenentwicklung, Quantenkommunikation oder quantengestützter Messtechnik.

Zudem sollten sie als leistungsfähige Brücke zwischen Forschungsexzellenz und industrieller Umsetzung dienen indem sie auf die Erprobung, Skalierung und wirtschaftliche Verwertung konkreter Anwendungsfälle abzielen und praxisnahe Test- und Produktionsumgebungen bereitstellen. So entstehen langfristig kritische Massen an Know-how, Talenten und Infrastruktur. Darüber hinaus können sie auch industrieinterne Kooperationsprozesse fördern – etwa durch den Aufbau gemeinsamer technischer Standards oder sektorübergreifender Initiativen.

In den Hubs entstehen so Netzwerke, in denen konkrete Anwendungsfälle – optimierte Lieferketten, sichere Kommunikation oder Präzisionssensorik –

identifiziert und gemeinsam weiterentwickelt werden können. Durch ein kombiniertes Angebot aus Infrastruktur, methodischer Begleitung und technologischem Co-Design könnten sie die Entwicklung validierter Anwendungen mit messbarem Quantenvorteil erheblich beschleunigen. Wesentlich ist hierbei die enge Verzahnung von Hardware-, Software- und Anwendungsentwicklung, um End-to-End-Lösungen zu ermöglichen. Für eine nachhaltige und kosteneffiziente Wirkung ist eine institutionelle Verankerung innerhalb bestehender Ökosysteme (z. B. Fraunhofer-Institute, Hochschulzentren, Innovation-Hubs) und die Koordination mit EU-Pilotinfrastrukturen (z. B. EuroHPC, Q-MRI) anzustreben.

Idealerweise werden Technologie-Hubs von wissenschaftlichen Einrichtungen wie Hochschulen oder Fraunhofer-Instituten in Kooperation mit Industriepartnern gegründet und betrieben. Ihre Finanzierung sollte durch eine Kombination aus staatlichen Fördermitteln und Beiträgen der beteiligten Industrieunternehmen erfolgen. Die Politik sollte diesen Prozess aktiv flankieren, indem sie entsprechende Rahmenbedingungen schafft - durch finanzielle Förderung, regulatorische Unterstützung und die Etablierung sektorspezifischer Vernetzungsformate.

Q13 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Innovationsförderung mit Fokus auf Fehlerkorrektur, Skalierung und hybride Architekturen in allen Quantenfeldern.

Zentrale Voraussetzung für die technologische Skalierung und Industrialisierung quantentechnologischer Systeme ist die gezielte Weiterentwicklung kritischer technischer Grundlagen – insbesondere in den Bereichen Fehlerkorrektur, Systemskalierung und hybride Architekturen. Die Politik sollte spezifische Förderprogramme und technologieoffene Ausschreibungen etablieren, die explizit auf diese technischen Engpässe ausgerichtet sind.

Industrieunternehmen sind gefordert, sich aktiv an diesen Ausschreibungen zu beteiligen und ihre technologischen Bedarfe präzise zu definieren, um praxisrelevante Lösungen zu gewährleisten. Die Wissenschaft sollte gezielt eingebunden werden, indem sie grundlegende Forschungsarbeiten in den Bereichen Fehlerkorrekturverfahren, Systemskalierung und hybride Architekturen leistet. Dabei sollten gemeinsame Forschungsprojekte sowie Test- und Demonstrationsplattformen zwischen Industrie und Wissenschaft entstehen – etwa für robuste Qubit-Systeme, skalierbare Quantenkommunikationsnetze oder portable, hochpräzise Quantensensorsysteme.

³⁶⁷ IBM (2025).

³⁶⁸ Google Quantum AI (2025).

³⁶⁹ EC (2025b).

Um Synergien optimal zu nutzen und Doppelstrukturen zu vermeiden, sollten Förderprogramme eng mit europäischen Initiativen koordiniert werden.

Q14 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Anreizsetzung zur Veröffentlichung von Forschungsdaten und Open-Source-Komponenten durch Industrie und Wissenschaft.

Zur Beschleunigung der Innovationszyklen und zur besseren Verwertung quantentechnologischer Forschungsergebnisse sollte die Politik strategisch die Veröffentlichung von Forschungsdaten sowie die Bereitstellung von Open-Source-Softwarekomponenten fördern. Dabei gilt es, Forschungseinrichtungen durch Anreize und geeignete Förderkonditionen zu motivieren, qualitativ hochwertige Daten – etwa zu Quantenzuständen, Materialeigenschaften oder Algorithmen-Benchmarks – zu veröffentlichen, vor allem in den Bereichen Quantencomputing und Quantensensorik.

Ergänzend kann die Förderung offener und standardisierter Softwarekomponenten für Quantenanwendungen sowie Simulationsplattformen – nach dem Vorbild etablierter Frameworks wie Qiskit³⁶⁷ oder Cirq³⁶⁸ – dabei unterstützen, industrieübergreifend schnellen Wissensaufbau zu ermöglichen. Hierzu sieht die Quantenstrategie der EU vor, bis 2026 eine European Quantum Standards Roadmap zu veröffentlichen³⁶⁹ – in enger Zusammenarbeit und Unterstützung mit Industrie und Mitgliedsstaaten. Industrieakteure sollten sich aktiv an Open-Source-Projekten beteiligen, um langfristig von einer breiten Innovationsbasis und kosteneffizienten Technologieentwicklungen zu profitieren.

Insbesondere in der Quantenkommunikation sind offene Standards und Protokolle entscheidend, um frühzeitig internationale Technologiestandards zu setzen und Europas Rolle in der globalen Quanten-Community zu stärken. Daher gilt es, die europäische Koordination von Interoperabilitätsstandards zwischen klassischen und quantenbasierten IT-Systemen durch Politik und Wirtschaft aktiv voranzutreiben. Grundlagenforscher sollten frühzeitig eingebunden werden, um gemeinsam mit industriellen Anbietern und Endanwendern standardisierte Schnittstellen und Spezifikationen für den Datenaustausch zu entwickeln. Ein europaweit koordiniertes Netzwerk könnte Anbieter- und Nutzeranforderungen systematisch abgleichen und technologische Standards festlegen – und so langfristig Europas technologische Souveränität stärken.



6. mRNA-Medikamente, Gen- und Zelltherapien (GCT): Wettbewerbsfähigkeit durch Translation und Skalierung sichern

6.1. Executive Summary und Kernbotschaften für mRNA-Medikamente, Gen- und Zelltherapien

mRNA-Medikamente (Messenger Ribonucleic Acid)³⁷⁰ sowie Gen- und Zelltherapien³⁷¹ stehen für einen Paradigmenwechsel in der Medizin: Sie eröffnen neue Wege, um Krankheitsursachen gezielt und mit teils kurativem Ansatz zu adressieren – insbesondere bei bislang schwer behandelbaren oder therapieresistenten Erkrankungen. Sie treiben eine tiefgreifende Transformation der Medizin voran – hin zu präziser, wirkungsorientierter und teils personalisierter Versorgung, mit weitreichenden Auswirkungen auf das gesamte Gesundheitssystem.

Die Medikamente gehören zu innovativen Biotech-Ansätzen, die sich sowohl in der Herstellung als auch in der Anwendung grundlegend von der konventionellen Pharmazie unterscheiden. Während klassische Arzneimittel überwiegend auf synthetisch-chemischen Wirkstoffen mit standardisierten Herstellungsverfahren und breiterer Anwendbarkeit beruhen, entwickelt die Biotechnologie Medikamente in biologischen Produktionssystemen. Diese sind häufig komplex und hochspezifisch und adressieren einzelne Gene, Proteine oder Zelltypen.

Der aktuelle Reifegrad von mRNA-Medikamenten sowie Gen- und Zelltherapien reicht – je nach Anwendungsgebiet bzw. medikamentösem Archetyp – von der frühen, stark forschungsgetriebenen Deep-Tech-Phase bis hin zur marktreifen Anwendung. Entsprechend variiert er sowohl hinsichtlich des wissenschaftlich-technologischen Entwicklungsstands als auch des Grades der Integration in das Gesundheitssystem (vgl. Abb. 29).

Die dynamische Entwicklung entlang der gesamten biotechnologischen Wertschöpfungskette wird in den kommenden Jahren zu einem stark wachsenden Markt führen: Prognosen zufolge dürfte sich dieser weltweit von ~20 Mrd. € heute bis 2030 auf ~95 Mrd. € entwickeln und somit mehr als vervierfachen – mit jährlichen Wachstumsraten von über 40 % für einzelne Technologien.³⁷²

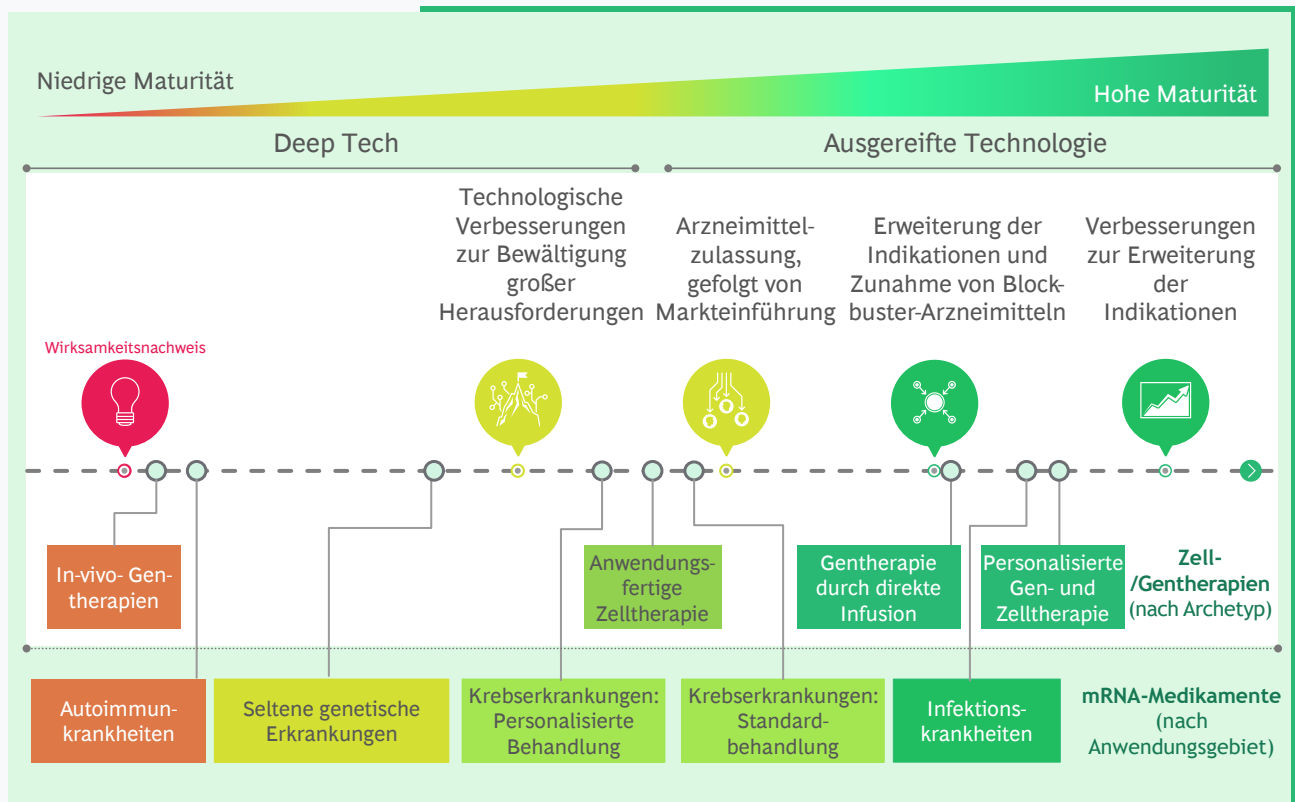
³⁷⁰ mRNA: „Messenger Ribonucleic Acid“ (Boten-RNA); RNA-Moleküle sind natürliche Bestandteile jeder Zelle und dienen der Umsetzung genetischer Information in Proteine. Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Studie der Begriff „mRNA-Medikamente“ verwendet. Dieser umfasst sowohl Wirkstoffe, deren zentrales Wirkprinzip auf mRNA basiert, als auch mRNA-basierte Medikamente, bei denen mRNA eine unterstützende oder vermittelnde Rolle spielt.

³⁷¹ Gen- und zellbasierte Therapien (GCT): therapeutische Ansätze, die genetische Modifikationen oder lebende Zellen nutzen, um biologische Funktionen wiederherzustellen, zu verbessern oder zu ersetzen. Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Studie der Begriff „Gen- und Zelltherapien“ (GCT) verwendet. Dieser umfasst sowohl Therapien mit direkter Gen- oder Zellmodifikation als auch gen- und zellbasierte Ansätze, die auf entsprechenden Technologien beruhen, ohne primär Gene oder Zellen zu verändern.

³⁷² EvaluatePharma; BCG-Analyse (2025).

ABBILDUNG 29 | Von Deep Tech bis zur ausgereiften Technologie – das Spektrum bei mRNA-Medikamenten, Zell- und Gentherapien

Vereinfachte Darstellung zur Orientierung



Quelle: BCG-Analyse

Für Deutschland ergibt sich daraus nicht nur medizinisches und wirtschaftliches Potenzial, sondern – dank renommierter Unternehmen und exzellenter Forschung – auch eine strategische Chance, sich im globalen Wettbewerb als führender Deep-Tech-Standort im Biotechnologiesektor zu etablieren. Damit dies gelingt, sind jedoch zentrale Herausforderungen gezielt und konsequent zu adressieren, darunter Unsicherheiten hinsichtlich Markteintritt und Preisfindung, mangelnder Zugang zu Infrastruktur, Engpässe bei Schlüsselkomponenten sowie unzureichende Fachkräftekapazitäten, die aktuell die Skalierung von Medikamenten und die internationale Wettbewerbsfähigkeit hemmen.

Mit der Nationalen Strategie für gen- und zellbasierte Therapien (Nationale Strategie GCT, 2024) und der Hightech Agenda Deutschland (2025) wurden erste wichtige Impulse gesetzt. Nun gilt es, daraus eine kohärente, technologieadäquate Umsetzungsagenda abzuleiten – mit klaren Zielen, ressortübergreifender Steuerung und verbindlicher Durchführung.

Die vorliegende Studie erarbeitet technologiespezifische Handlungsempfehlungen (vgl. Abb. 36) für eine solche Umsetzungsagenda. Aus diesen detaillierten Empfehlungen ergeben sich drei strategische Prioritäten für Deutschland:



Quelle: BCG-Analyse

1. **Gesundheitssystem für Deep-Tech-Medikamente fit machen:** Das deutsche Gesundheitssystem ist auf die Anforderungen von Deep-Tech-Medikamenten bislang unzureichend vorbereitet – eine schnelle und umfassende Neuausrichtung der Rahmenbedingungen ist daher dringend erforderlich. Dazu gehören neue Erstattungslogiken, innovative Finanzierungsmodelle für die Entwicklung und den Einsatz hochpreisiger Medikamente sowie die Förderung adaptiver Zulassungsverfahren. Ohne diese Grundlage werden viele Ansätze trotz klinischer Wirksamkeit auf Einzelfälle oder Nischenanwendungen beschränkt bleiben.
2. **Standortattraktivität für spätere Entwicklungsphasen stärken:** Über die in der Hightech Agenda Deutschland vorgesehene Forschungsförderung hinaus sollten insbesondere die späteren klinischen Entwicklungsphasen in der Medizin – einschließlich Zulassung und Anwendung – stärker in den Blick genommen werden. Dafür sollten attraktive Rahmenbedingungen geschaffen werden –

etwa durch noch stärker harmonisierte Genehmigungsverfahren, klar geregelte Zuständigkeiten und die Vereinfachung bürokratischer Abläufe. Nur so investieren führende Unternehmen auch in fortgeschrittene Entwicklungsphasen in Deutschland, und das Land kann maximal von der Wertschöpfung innovativer Medikamente profitieren.

3. **Translation von Forschung in Anwendung erleichtern:** Die Hightech Agenda unterstützt bereits den Aufbau eines Translationszentrums für Gen- und Zelltherapien. Um das volle Potenzial translationaler Forschung bundesweit zu heben, braucht es darüber hinaus weitere Stärkungen des Ökosystems: Erleichterte Ausgründungsbedingungen, Investitionen in GMP-nahe Infrastruktur sowie ein vereinfachter bidirektionaler Transfer zwischen Grundlagenforschung und klinischer Anwendung sollten kombiniert werden, um Finanzierungslücken zu schließen und die Skalierung innovativer Medikamente zu vereinfachen.

6.2. Strategische Relevanz

mRNA-Medikamente und GCT sind biotechnologische Ansätze, die gezielt genetisches Material oder modifizierte Zellen nutzen, um Krankheiten kausal oder präventiv zu adressieren. Diese neuartigen therapeutischen Ansätze markieren eine weitere Verschiebung hin zu molekular-individueller Krankheitsbehandlung. Insbesondere personalisierte Verfahren für bisher schwer behandelbare Erkrankungen rücken dadurch in den Fokus.³⁷³

Die Bedeutung dieser Medikamente zeigt sich nicht nur medizinisch, sondern auch wirtschaftlich: Seit 2019 erleben sie eine außergewöhnliche Entwicklungsdynamik und zählen mit einem erwarteten jährlichen Wachstum (CAGR) von teils über 40 % bis 2030³⁷⁴ zu den wachstumsstärksten Segmenten im biomedizinischen Bereich. Marktprognosen zufolge ist bis 2030 mit einem weltweiten Marktvolumen von bis zu 95 Mrd. € zu rechnen.³⁷⁵ Vor diesem Hintergrund gelten mRNA-Medikamente und GCT als strategische Zukunftstechnologien mit erheblichem Potenzial für den Industriestandort Deutschland.

Während die genannten Medikamentengruppen alle hohes Wachstumspotenzial in den nächsten Jahren aufweisen, unterscheiden sich mRNA-Medikamente und GCT grundlegend in Wirkmechanismus und Wirkungsdauer: Einige der mRNA-Medikamente erzeugen kurzfristige, reversible Veränderungen, während GCT längerfristige, strukturelle Modifikationen bewirken. Diese Unterschiede erfordern eine getrennte Betrachtung der beiden Medikamentengruppen, wenngleich gemeinsame Handlungsempfehlungen für alle drei Ansätze definiert werden können.

6.3. mRNA- Medikamente

6.3.1. Definition und Reifegrad: mRNA-Medikamente

RNA-Medikamente nutzen RNA-Moleküle gezielt, um biologische Prozesse im Körper zu modulieren. mRNA-Therapien und präventive mRNA-Impfstoffe bilden eine Unterkategorie, bei der die mRNA als Bauplan für die körpereigene Synthese definierter Proteine dient. Der Organismus wird damit temporär befähigt, Wirkstoffe selbst zu produzieren. Dies ermöglicht den Ersatz defekter Proteine oder die gezielte Expression immunologischer Zielstrukturen. Ein prominentes Beispiel sind mRNA-Impfstoffe, die während der COVID-19-Pandemie erstmals breiten Einsatz fanden.

Die besonderen Vorzüge von mRNA-Medikamenten liegen darin, dass sie schnell und effektiv Proteine produzieren, ohne sich in das Genom einzufügen, und zeitlich begrenzt wirken, was einen wichtigen Sicherheitsvorteil darstellt. Diese Eigenschaften sowie die ersten Erfolge im breiten Einsatz machen mRNA-Medikamente zu einer Schlüsseltechnologie im Deep-Tech-Bereich der Biomedizin.

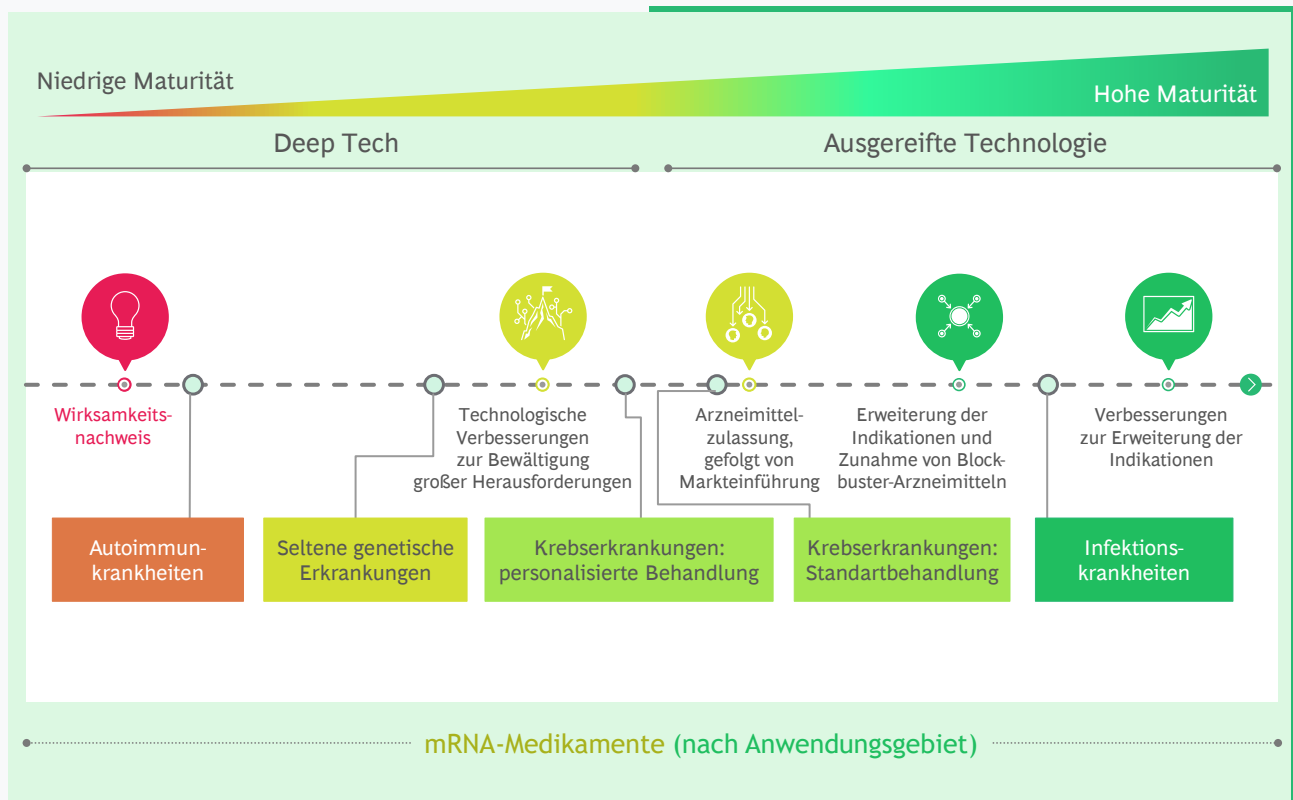
Der Reifegrad von mRNA-Medikamenten reicht von marktnahen Anwendungen bis zu Ansätzen in der Grundlagenforschung und variiert sowohl im wissenschaftlichen Entwicklungsstand als auch in der Integration ins Gesundheitssystem. So befinden sich mRNA-Impfstoffe für bestimmte Infektionskrankheiten bereits in der breiten Anwendung und Impfstoffe für die Krebstherapie zum Teil in fortgeschrittenen klinischen Studien, während mRNA-Ansätze für Autoimmunerkrankungen oder seltene genetische Erkrankungen derzeit noch in der frühen Erforschung sind (vgl. Abb. 31 und Kapitel 6.3.2).

Hinzu kommt: Auch nach der Marktzulassung werden innovative Medikamente häufig kontinuierlich weiterentwickelt. Dies umfasst klinische Studien zur Übertragbarkeit auf weitere Indikationen sowie Untersuchungen zur Langzeitwirksamkeit in breiten Patientenpopulationen.

³⁷³ BMBF und BIH (2024).

³⁷⁴ EvaluatePharma; BCG-Analyse (2025).

³⁷⁵ BDI, BCG und IW (2025).



Quelle: BCG-Analyse

Neben mRNA-Medikamenten bestehen auch weitere RNA-basierte Ansätze wie siRNA (small interfering RNA) oder ASOs (Antisense Oligonucleotide), die sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus technologischer Perspektive von Bedeutung sind. Sie werden aufgrund der primären Fokussierung auf mRNA-Medikamente in der vorliegenden Studie nicht näher behandelt, können jedoch in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium zumindest teilweise dem Deep-Tech-Bereich zugerechnet werden.

6.3.2 Anwendungsfelder und Marktpotenzial von mRNA-Medikamenten

mRNA-Medikamente haben sich in den vergangenen Jahren zu einem zentralen Innovationsfeld in der Biomedizin entwickelt. Die pandemiebedingt beschleunigte Zulassung und breite Nutzung mRNA-basierter COVID-19-Impfstoffe bestätigte ihre Skalierbarkeit, Wirksamkeit und Sicherheit. Auf dieser Grundlage hat sich ein breites Spektrum an medizinischen Anwendungen eröffnet – sowohl in der Prävention als auch in der Therapie. Die Einsatzfelder sind heute vielfältig und reichen weit über Infektionskrankheiten hinaus. Aktuelle Studien und Forschungsprojekte in unterschiedlichen Entwicklungsstadien (Reifegrade/Maturitäten) umfassen zahlreiche medizinische Bereiche, wie in Tabelle 1 beispielhaft dargestellt.

TABELLE 1 | Anwendungsfelder von mRNA-Medikamenten (beispielhaft)

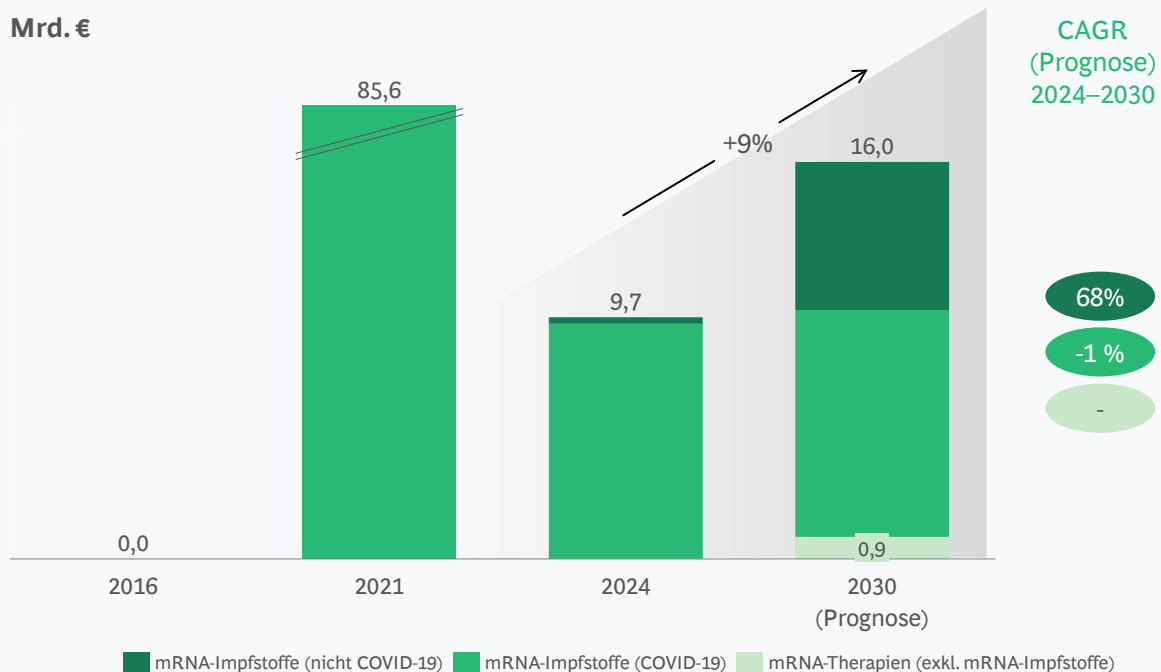
ANWENDUNGSBEREICH	REIFEGRAD (MATURITÄT)	BEISPIELHAFTE STUDIEN UND ANWENDUNGEN
INFEKTIONSKRANKHEITEN	Hoch (In Anwendung)	Impfstoffe gegen COVID-19 und ein Impfstoff gegen RSV ¹ (zugelassen und vermarktet); Influenza-Impfstoffe (Phase II-III, Moderna NCT05827978, GSK/CureVac NCT06431607, Sanofi NCT06727058); Antivirales Therapeutikum (Phase II, Ethris) ²
KREBSERKRANKUNGEN	Mittel	mRNA-basierte Therapie bei Melanom (Phase III, Moderna/MSD, NCT05933577 und Phase II, BioNTech, NCT04526899) und bei Kopf-Hals-Tumoren (Phase III, BioNTech, NCT04534205)
SELTENE GENETISCHE ERKRANKUNGEN	Niedrig	Therapie bei Methylmalonazidämie (Phase I/II, Moderna, mRNA-3705, NCT04899310); Therapie von Mukoviszidose (Phase II, Arcturus, NCT06747858); Therapie der primären Ziliendyskinesie (präklinisch, Ethris) ³
AUTOIMMUNERKRANKUNGEN	Sehr niedrig	Präklinische Studien zur Bekämpfung multipler Sklerose (BioNTech); Basedow-Krankheit (ISAR Bioscience/Universitätsmedizin Mainz) ⁴

1. EMA (2024) 2. ETHRIS (2025) 3. BMBF (2025d) 4. ISAR Bioscience (o. J.).
Quelle: BCG-Analyse

Angesichts der Vielseitigkeit der mRNA-Technologien wird für die kommenden fünf Jahre ein deutlich wachsendes Marktpotenzial erwartet: Trotz des Rückgangs des COVID-19-bedingten Umsatzbooms wird bis 2030 ein weltweites jährliches Umsatzwachstum von 9 % prognostiziert, getrieben primär von mRNA-Impfstoffen für neue Indikationen (vgl. Abb. 32).³⁸⁰

³⁸⁰ EvaluatePharma; BCG-Analyse (2025).

Weltweites Marktvolumen für mRNA-Medikamente



Quelle: EvaluatePharma (Febr. 2025); Experteninterviews; BCG-Analyse

Drei zentrale Trends treiben diese Dynamik:

- 1. Plattformcharakter:** Die mRNA-Technologie folgt einer modularen Plattformlogik („Plug-and-Play“)³⁸¹, bei der der kodierende Abschnitt der RNA flexibel austauschbar ist, ohne grundlegende Produktionsprozesse zu verändern. Dies verkürzt Entwicklungszyklen erheblich und ermöglicht eine effiziente Skalierung der Produktion.
- 2. Klinische und gesellschaftliche Akzeptanz:** Die pandemiebedingt beschleunigte Zulassung und breite Anwendung von mRNA-Impfstoffen hat sowohl klinische Erfahrungswerte als auch in Teilen der Gesellschaft gesellschaftliche Akzeptanz geschaffen.
- 3. Vielfältige Anwendungslogik:** mRNA kann für kurative, immunmodulierende und präventive Anwendungen eingesetzt werden – ein technologischer Vorteil gegenüber der klassischen Gentherapie.

Mit zunehmender technologischer Reife und dem absehbaren Wachstum ist zu erwarten, dass mRNA-Medikamente zu einem festen Bestandteil moderner Arzneimittelportfolios werden.³⁸²

Für Biotech- und Pharmaunternehmen sowie Gesundheitsstandorte bedeutet das: Wer frühzeitig die erforderlichen regulatorischen, produktionstechnischen und datenbezogenen Grundlagen schafft, kann einen festen Platz in den entstehenden Wertschöpfungsketten einnehmen.

³⁸¹ EMA (2025a).

³⁸² Deutscher Bundestag (2023a).

6.3.3 Globale Wettbewerbslandschaft und Position Deutschlands hinsichtlich mRNA-Medikamenten

Die globale mRNA-Wertschöpfung ist derzeit stark konzentriert und wird von wenigen technologisch führenden Akteuren geprägt. Zu den Leitunternehmen zählen BioNTech (Deutschland) und Moderna (USA), die durch die pandemiebedingt beschleunigte Zulassung von COVID-19-Impfstoffen weltweite Sichtbarkeit und Validierung erlangten. Beide Unternehmen verfügen heute über robuste mRNA-Pipelines, die auch Indikationen jenseits von Infektionskrankheiten umfassen. Moderna entwickelt beispielsweise therapeutische mRNA-Kandidaten gegen Methylmalonazidämie³⁸³ und arbeitet mit Merck an individualisierten Tumorimpfstoffen.³⁸⁴ Auch BioNTech erprobt unter anderem personalisierte mRNA-Medikamente und individualisierte Tumorimpfstoffe bei verschiedenen Krebsindikationen.³⁸⁵

Ein weiterer wichtiger Akteur mit Sitz in Deutschland ist CureVac, der gemeinsam mit GSK³⁸⁶ an einer neuen Generation von mRNA-Impfstoffen mit optimierten Formulierungen arbeitet. (Hinweis: Am 12. Juni 2025³⁸⁷ hat BioNTech eine geplante Übernahme CureVacs im Rahmen eines öffentlichen Umtauschangebots angekündigt [Stand 4. September 2025]).³⁸⁸ Pfizer, vormals und zum Teil noch aktuell in Partnerschaft mit BioNTech, verfolgt parallel eigene mRNA-Plattformen, unter anderem für prophylaktische Impfstoffe gegen Influenza.³⁸⁹ Weitere große forschungsintensive Pharmaunternehmen investieren in RNA-Technologien – durch Inhouse-Programme, strategische Allianzen oder gezielte Akquisitionen. Dazu gehören beispielsweise Sanofi (Übernahme von Translate Bio³⁹⁰) und AstraZeneca (Investitionen in VaxEquity³⁹¹).

Viele weitere mit mRNA-Impfstoffen und zum Teil auch -Therapien befassende Unternehmen haben ihren Hauptsitz in den USA (wie Arcturus Therapeutics) oder Asien (z.B. Stemirna in China, Daiichi Sankyo in Japan, SK Bioscience in Südkorea).³⁹²

Deutschlands Position

Deutschland verfügt im Bereich mRNA über eine starke industrielle Ausgangsbasis. Die internationale Wettbewerbsposition hängt jedoch nicht allein von einzelnen Forschungsdurchbrüchen oder Unternehmenserfolgen ab, sondern vor allem von der Fähigkeit, durch die gezielte Adressierung aller sechs Handlungsfelder ein leistungsfähiges, robustes und zukunftsorientiertes Innovationsökosystem dauerhaft zu etablieren.

Strategie und Zielsetzung. In Deutschland existiert bisher keine nationale Vision zur strukturellen Integration von mRNA als Schlüsseltechnologie in das Gesundheitswesen. Eine ressortübergreifende Roadmap mit Investitionszielen, regulatorischem Ordnungsrahmen und Infrastrukturausbau liegt bislang nicht vor.

Die 2023 veröffentlichte Pharmastrategie³⁹³ des BMG benennt lediglich technologieübergreifend die Förderung von Innovations- und Forschungsprojekten, ohne mRNA als strukturelles Handlungsfeld über 2025 hinaus zu berücksichtigen. Die Nationale Strategie für Gen- und zellbasierte Therapien (Nationale Strategie GCT)³⁹⁴ bezieht mRNA im Kontext gen- und zellbasierter therapeutischer Verfahren ein, verzichtet jedoch auf eine technologieeigene Analyse, etwa zu den in Tabelle 1 genannten Anwendungsfeldern, sowie auf eine entsprechende quantifizierte Ambitionssetzung. Auch die im Juli 2025 verabschiedete Hightech Agenda adressiert zwar die Biotechnologie, formuliert bislang aber keine klaren Ziele oder Positionierungen mit direktem Bezug zu mRNA-Medikamenten.

Auf europäischer Ebene existiert bis heute ebenfalls keine gesonderte mRNA-Strategie. Die Technologie ist lediglich in umfassende EU-Initiativen wie die Pharmaceutical Strategy for Europe³⁹⁵ eingebettet.

Ökosystem-Infrastruktur. Deutschland verfügt über eines der weltweit dichtesten mRNA-Ökosysteme, geprägt unter anderem durch renommierte Forschungs- und Unternehmensstandorte in Mainz, München, Berlin, Tübingen und Hannover. Ergänzt wird es durch eine leistungsfähige Industrie- und Zulieferstruktur, zu der Unternehmen wie BioNTech, CureVac und

³⁸³ Moderna (2024).

³⁸⁴ Moderna (2025).

³⁸⁵ BioNTech (2025a).

³⁸⁶ Reuters (2024b).

³⁸⁷ BioNTech (2025b).

³⁸⁸ CureVac (2025).

³⁸⁹ Pfizer (2025).

³⁹⁰ Sanofi (2021).

³⁹¹ Nasdaq (2021).

³⁹² VFA (2025).

³⁹³ BMG (2023).

³⁹⁴ BMBF und BIH (2024).

³⁹⁵ EC (2023/2024).

Evotec gehören. Insgesamt sind über 60 aktive industrielle und akademische Standorte entlang der mRNA-Wertschöpfungskette verortet – von der präklinischen und klinischen Forschung und Plattformentwicklung bis hin zur Herstellung. Darüber hinaus existieren zahlreiche Standorte für andere RNA-basierte Medikamente, deren Expertise auch für mRNA-Medikamente wertvoll ist.³⁹⁶

Trotz dieses umfangreichen Ökosystems decken Deutschland und Europa nicht die gesamte Wertschöpfungskette ab. Es bestehen klare Abhängigkeiten von außereuropäischen Lieferketten, insbesondere bei essenziellen Komponenten wie Enzymen und RNA-Vektoren. Eine vollständige Unabhängigkeit von internationalen Lieferketten ist weder realistisch noch in jedem Fall wünschenswert, da globale Kooperationen Effizienz- und Innovationsvorteile bieten können. Bestehende Abhängigkeiten von außereuropäischen Zulieferern können jedoch in besonderen Situationen wie globalen Gesundheitskrisen zu erheblichen Herausforderungen für die klinische Entwicklung und industrielle Skalierung von mRNA-Medikamenten in Deutschland führen.

Der regulatorische Rahmen und die infrastrukturelle Landschaft für mRNA-Medikamente in Deutschland sind noch nicht optimal auf neuartige Medikamentenformen ausgerichtet. Zwar existieren etablierte Verfahren und Zulassungswege über Institutionen wie das Paul-Ehrlich-Institut (PEI) und die European Medicines Agency (EMA), jedoch fehlen insbesondere bei modularen, adaptiven oder personalisierten mRNA-Anwendungen – etwa in der Onkologie oder bei seltenen Erkrankungen – klar definierte regulatorische Pfade. Die vorhandenen Strukturen sind sowohl föderal als auch europäisch stark fragmentiert und stellen Unternehmen und Forschungseinrichtungen vor zusätzliche Herausforderungen.

Im internationalen Vergleich agieren Regulierungsbehörden teils proaktiver: Die Food and Drug Administration (FDA) nutzt Master-Files³⁹⁸ für Plattformkomponenten und bietet über Fast-Track- und Breakthrough-Designationen beschleunigte Zulassungspfade,³⁹⁹ die bereits in der Nationalen Strategie GCT als Positivbeispiel hervorgehoben wurden.⁴⁰⁰ Die Medicines and Healthcare Products Regulatory Agency (MHRA, UK)

setzt mit dem Innovative Licensing and Access Pathway (ILAP) ein zentrales Verfahren ein, das regulatorische und gesundheitsökonomische Bewertung verbindet und frühzeitige Beratung ermöglicht – auch für mRNA-Produkte.⁴⁰¹

Bildung und Fachkräfte. Deutschland verfügt über eine breite akademische Expertise und Talentbasis im Bereich mRNA, insbesondere in der Molekularbiologie, im RNA-Design sowie in der klinischen Forschung. Gleichzeitig zeigt sich in der industriellen Skalierung und Good Manufacturing Practice (GMP)-nahen Anwendung ein wachsender Bedarf an spezifisch qualifiziertem Personal – etwa in der Bioprozessentwicklung, in der Automatisierung oder im regulatorischen Chemistry, Manufacturing and Controls (CMC)-Management. Abgesehen vom niedersächsischen Graudiertenkolleg "RNApp"⁴⁰² und dem Doktorandenkolleg "RNAmed"⁴⁰³ des Elite Network Bavaria sind bestehende Weiterbildungsangebote bislang nicht systematisch auf die Anforderungen der mRNA-Wertschöpfungsketten ausgerichtet. Die Nationale Strategie GCT sieht den Aufbau modularer Fortbildungsformate vor, bisher jedoch ohne mRNA-spezifische Umsetzung.⁴⁰⁴ Im internationalen Vergleich existieren gezielte Programme, etwa die britische Advanced Therapies Apprenticeship Community (ATAC).⁴⁰⁵

Es besteht nicht nur Bedarf an fachlicher Qualifizierung, sondern auch erheblicher Aufklärungs- und Informationsbedarf – insbesondere aufgrund der komplexen öffentlichen Debatte rund um die mRNA-Technologie seit der COVID-19-Pandemie. Die öffentliche Wahrnehmung ist stark geprägt von der Impfstoffdiskussion, die durch hohe Informationsdichte, widersprüchliche Kommunikation und die Verbreitung von Fehlinformationen teilweise zu gesellschaftlichen Unsicherheiten und Polarisierung geführt hat. Dies könnte langfristig die Akzeptanz neuer mRNA-Medikamente beeinträchtigen. Besonders im medizinischen Alltag besteht in Zukunft zusätzlicher Aufklärungs- und Fortbildungsbedarf, insbesondere bei therapeutischen Anwendungen jenseits der Infektionskrankheiten – etwa in der Onkologie oder bei Autoimmunerkrankungen. Zwar sieht die Nationale Strategie GCT Webformate und ärztliche Fortbildung für Gen- und Zelltherapien vor, eine koordinierte, bundesweite Kommunikationsstrategie speziell für mRNA existiert jedoch

³⁹⁶ VFA (2023).

³⁹⁷ BDI (2024b).

³⁹⁸ FDA (2019).

³⁹⁹ FDA (2023a).

⁴⁰⁰ BMBF und BIH (2024).

⁴⁰¹ UK Government (2025).

⁴⁰² MWK Niedersachsen (2024).

⁴⁰³ HIRI (2025).

⁴⁰⁴ BMBF und BIH (2024).

⁴⁰⁵ ATAC (2025).

⁴⁰⁶ BMBF und BIH (2024).

bislang nicht.⁴⁰⁶ Internationale Beispiele wie RNA Canada ARN⁴⁰⁷ zeigen, wie erfolgreiche Standorte Wissenschaftskommunikation und Patienteninformation systematisch verzahnen.

Technologietransfer und -skalierung. Deutschland verfügt über international sichtbare mRNA-Akteure in Wissenschaft und Industrie. Die Translation in wirtschaftliche Nutzung erfolgt bislang jedoch nicht systematisch. Die öffentliche Innovationsförderung für mRNA-Technologien in Deutschland ist überwiegend projektbasiert und weist keine durchgängige strategische Ausrichtung von der präklinischen Forschung bis zur industriellen Skalierung auf. Programme wie GO-Bio,⁴⁰⁸ SPRIND⁴⁰⁹ oder curATime⁴¹⁰ adressieren Einzelprojekte; es fehlt jedoch an einer kohärenten, innovationsfördernden Infrastruktur, die eine nahtlose Translation von Forschungsergebnissen in marktfähige Anwendungen ermöglicht.

Besonders deutlich zeigt sich dies im Start-up-Bereich: Laut BDI bestand im Bereich Health-Tech zwischen 2017 und 2021 eine Investitionslücke von über 180 Mrd. € zwischen Deutschland und den USA.^{411,412}

Zudem existieren kaum zentrale Unterstützungsformate, und Wissenschaftler werden in ihren Ausgründungsbemühungen häufig durch uneinheitliche Lizenzstandards gebremst.⁴¹³

Internationale Beispiele wie das UK NHS Innovation Ecosystem Programme (IEP)⁴¹⁴ zeigen, wie durch koordinierte Dialogformate zwischen Regierung, Wissenschaft und Privatwirtschaft erfolgreiche Transferpfade entstehen. Die Nationale Strategie GCT schlägt mit einer Product-Development-Unit – die bei Projektplanung, Produktion und regulatorischer Produktentwicklung systematisch unterstützen soll – sowie verbesserten Beteiligungs- und Lizenzierungsbedingungen für Start-ups erste Bausteine vor⁴¹⁵, die bisher jedoch noch nicht gesamtheitlich umgesetzt sind.

Kooperation. Die Bundesregierung unterstützt gezielt Kooperationen im Bereich mRNA-Technologien, insbesondere durch die Förderung einzelner Konsortialprojekte. Beispiele sind das vom BMWK unterstützte

Konsortium mRNA (KmR), das die Entwicklung von Speziallipiden vorantreibt und eine strukturierte Vernetzung von Akteuren aus Forschung, Entwicklung und Produktion schafft.⁴¹⁶ Ergänzend fördert das BMFTR Projekte wie das „Cluster for Nucleic Acid Therapeutics Munich“ (C-NATM). Initiativen wie diese ermöglichen einen effektiven und kontinuierlichen Austausch zwischen den Akteuren und fördern die Harmonisierung gemeinsamer Ziele. Industriepartnerschaften stärken zudem die industrielle Wertschöpfung und den Aufbau robuster Produktionskapazitäten für mRNA-Impfstoffe.⁴¹⁷

Darüber hinaus hat die Bundesregierung mit mehreren Unternehmen Pandemiebereitschaftsverträge abgeschlossen, die die Bereithaltung von Produktionskapazitäten für mRNA-Impfstoffe sicherstellen und eine schnelle Versorgung im Falle neuer pandemischer Erreger gewährleisten⁴¹⁸ sollen.

Ergänzend dazu unterstützen Programme auf europäischer Ebene wie COST Actions und Projekte im europäischen Forschungsraum transnationale Kooperationen und fördern den europaweiten Austausch von Expertise und Ressourcen.⁴¹⁹

Innovation, Forschung und Entwicklung. Deutschland verfügt über eine international sichtbare Grundlagenforschung im Bereich mRNA: Universitäten sowie Max-Planck-, Helmholtz- und Leibniz-Institute zählen zur Weltspitze.

Trotz dieser Stärke ist die Forschungsinfrastruktur für mRNA-Technologien unzureichend. Insbesondere fehlen offene Innovationsplattformen sowie Test-, Validierungs- und Pilotproduktionszentren, die gleichermaßen von Start-ups, KMUs und Forschungsverbünden genutzt werden könnten, um innovative Produkte schnell und regulatorisch sicher bis zur Marktreife zu bringen.⁴²⁰ Internationale Benchmarks setzen hingegen auf öffentlich finanzierte, modulare Plattformzentren: Das britische Cell and Gene Therapy Catapult (CGT Catapult) bietet Forschern offenen Zugang zu Laborausstattung, regulatorischer Expertise und GMP-naher Entwicklungsumgebung.

⁴⁰⁷ RNA Canada ARN (2025).

⁴⁰⁸ BMBF (2025b).

⁴⁰⁹ SPRIND (2025).

⁴¹⁰ curATime (2025).

⁴¹¹ BDI (2024b).

⁴¹² European Pharmaceutical Review (2025).

⁴¹³ BMBF und BIH (2024).

⁴¹⁴ NHS (2025).

⁴¹⁵ BMBF und BIH (2024).

⁴¹⁶ KmR (2025).

⁴¹⁷ Wacker (2024).

⁴¹⁸ BMG (2022).

⁴¹⁹ COST (2025).

⁴²⁰ BMBF und BIH (2024).

Auch bei der finanziellen Förderung von Forschung setzt das Vereinigte Königreich Maßstäbe: Dort investiert BioNTech gemeinsam mit der Regierung 1,15 Mrd. € über zehn Jahre – flankiert von 150 Mio. € öffentlicher Förderung – und errichtet neue Research-&Development-(R&D-)Zentren in Cambridge und London. So wird Grundlagenforschung direkt mit moderner Infrastruktur und industrieller Entwicklung verknüpft.^{421,422}

6.4 Gen- und zellbasierte Therapien

6.4.1 Definition und Reifegrad: Gen- und zellbasierte Therapien

GCT sind biomedizinische Verfahren, bei denen genetisches Material oder lebende Zellen gezielt therapeutisch eingesetzt werden, um Krankheitsprozesse auf molekularer Ebene zu modulieren oder zu korrigieren.⁴²³ Ziel ist die Wiederherstellung, Ergänzung oder Modifikation dysfunktionaler biologischer Steuerungssysteme. Im Unterschied zu klassischen Arzneimitteln greifen GCT direkt und teils patientenindividuell in körpereigene Steuerungsprozesse ein – etwa durch die Integration funktioneller Gene oder die programmierte Modifikation körpereigener Immunzellen.

GCT umfassen eine Bandbreite an Modalitäten, die sich primär in drei Anwendungstypen gliedern lassen:

1. **Direkte Gentherapien:** Einmalige Infusion genetischen Materials, etwa bei Spinaler Muskeltrophie (SMA)⁴²⁴ oder erblichen Netzhauterkrankungen.
2. **Personalisierte GCT**, z. B. CAR-T-Zellen bei hämatologischen Indikationen.⁴²⁵
3. **Allogene Zelltherapien:** Universell einsetzbare Stammzellprodukte oder immunmodulierte Zelllinien (z. B. induced pluripotent stem cell Derivate [iPSC Derivate]).⁴²⁶

Ähnlich wie im Bereich mRNA unterscheiden sich die Reifegrade der einzelnen gen- und zelltherapeutischen Ansätze deutlich voneinander. **Direkte Gentherapien**, bei denen genetisches Material unmittelbar und standardisiert in den Organismus eingebracht wird, sind heute bereits in Anwendung und kommen teilweise routiniert in der klinischen Praxis zum Einsatz. Gentherapien, die in die Keimbahn eingreifen sind in Deutschland allerdings verboten.⁴²⁷ **Personalisierte GCT** (insbesondere chimäre Antigenrezeptor-T-Zellen [CAR-T-Zellen]) sind teils zugelassen, in der Breite jedoch logistisch und regulatorisch anspruchsvoll, was ihre Verfügbarkeit und Anwendung begrenzt. Allogene Zelltherapien befinden sich überwiegend in präklinischer oder früher klinischer Entwicklung.

⁴²¹ The Times (2025).

⁴²² European Pharmaceutical Review (2025).

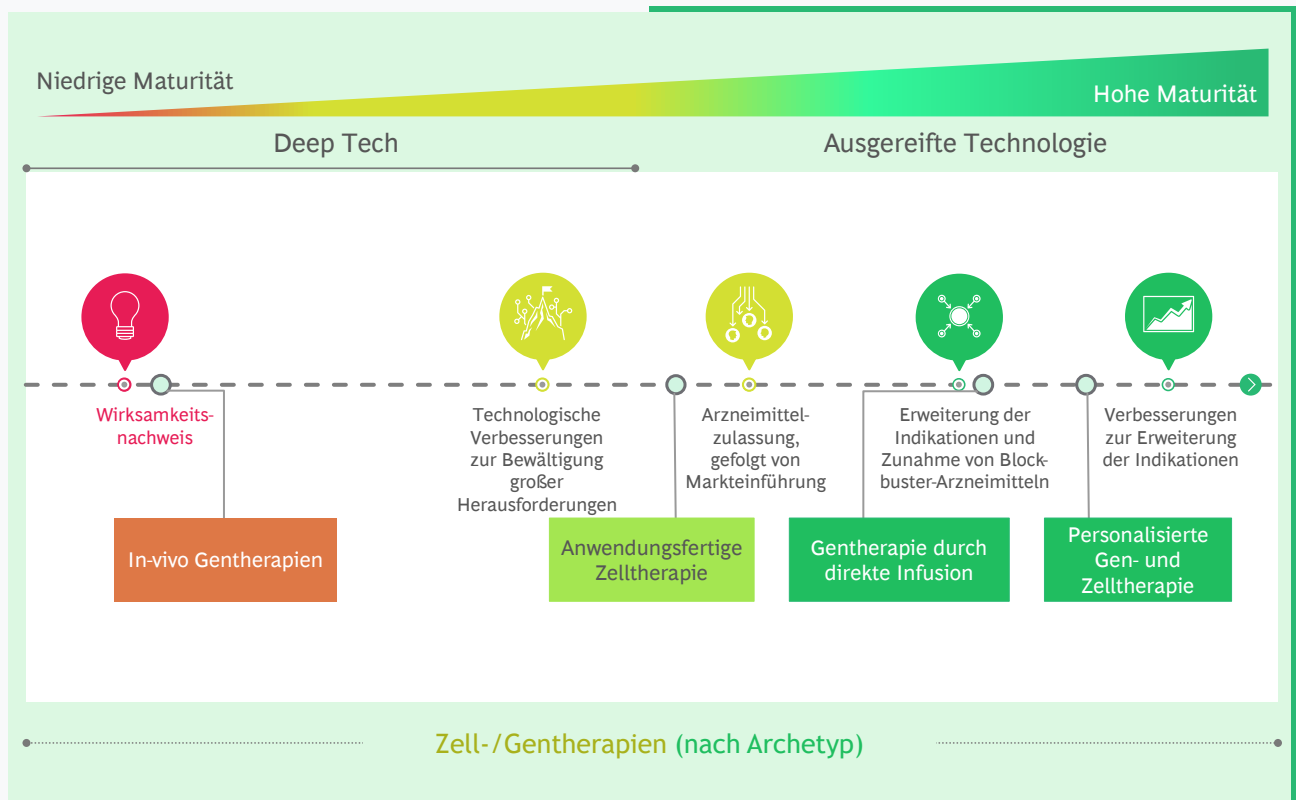
⁴²³ EMA (2025b).

⁴²⁴ Zolgensma (2025).

⁴²⁵ Deutsche Krebsgesellschaft (2021).

⁴²⁶ Bayer (2022).

⁴²⁷ BMJV (2024).



Quelle: BCG-Analyse

6.4.2 Anwendungsfelder und Marktpotenzial von Gen- und Zelltherapien

Anwendungsfelder

Durch ihre personalisierbare Wirkweise und ihren gezielten Wirkmechanismus eröffnen GCT ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten – insbesondere in Indikationsfeldern, in denen bislang nur begrenzte oder keine kurativen Optionen verfügbar waren.

Am weitesten fortgeschritten ist die Anwendung in der **Onkologie**: CAR-T-Zelltherapien erzielen bei bestimmten hämatologischen Indikationen hohe Remissionsraten und werden derzeit auf solide Tumoren ausgeweitet.

Aktuelle Studien belegen zudem erste klinische Erfolge bei Autoimmunerkrankungen wie systemischem Lupus erythematodes.⁴²⁸

Großes Potenzial zeigen GCT auch bei seltenen monogenetischen Erkrankungen: Sie ermöglichen erstmals kausale Therapien – etwa bei SMA⁴²⁹ oder Sichelzellanämie.⁴³⁰ Hier erlauben GCT gezielte Eingriffe in pathologische Mechanismen, etwa durch Gensatz, gezielte Basenkorrektur oder Editing über virale Vektoren.

⁴²⁸ Lupus Foundation of America (2024).

⁴²⁹ National Library of Medicine (2022).

⁴³⁰ National Library of Medicine (2024b).

Exkurs: CAR-T als Beispiel für die Translation von Deep-Tech in breite Anwendung

CAR-T-Therapien („Chimeric Antigen Receptor“-T-Zellen) zählen zu den bedeutendsten Entwicklungen im Bereich GCT. Erste Forschungsarbeiten zu CAR-T-Zellen reichen bis in die frühen 1990er-Jahre zurück, als Immunzellen erstmals genetisch so verändert wurden, dass sie gezielt Krebszellen bekämpfen können. Getrieben wurde diese Entwicklung durch die enge Verzahnung von akademischer Grundlagenforschung und klinischer Anwendung in den USA. Über viele Jahre galt CAR-T als typische Deep-Tech-Innovation – hochkomplex, forschungsintensiv und weit entfernt von einer breiten klinischen Anwendung.

Einen entscheidenden Durchbruch markierte 2018 die erste Zulassung einer CAR-T-Zelltherapie in Europa: Kymriah (Tisagenlecleucel) zur Behandlung bestimmter Formen der Leukämie wurde von der EU-Kommission nach Zulassungsempfehlung durch die Europäische Arzneimittel-Agentur genehmigt.⁴³¹ Kurz darauf folgte die Zulassung von Yescarta (Axicabtagen-Ciloleucel) für aggressive B-Zell-Lymphome.⁴³² Seit-her hat die CAR-T-Zelltherapie den Sprung aus dem Labor in die klinische Praxis geschafft und erzielt

heute beeindruckende Erfolge, insbesondere bei Blutkrebserkrankungen wie Leukämien und Lymphomen. Seit 2021 wird CAR-T in Pionierprojekten auch zur Behandlung von Autoimmunerkrankungen wie Lupus erythematodes erprobt.

Allerdings stößt der breite Einsatz von CAR-T-Zelltherapien noch auf strukturelle Hürden. Regulatorische Rahmenbedingungen sowie die bestehenden Strukturen der Gesundheitssysteme in Deutschland und anderen Ländern sind bislang nicht optimal auf diese personalisierte Therapieform ausgerichtet. Langwierige Genehmigungsverfahren, unzureichende Produktionskapazitäten sowie fehlende Flexibilität bei Vergütungsmodellen und Kostenerstattungen erschweren vielen Patienten den Zugang zu dieser innovativen Behandlung. Weitere Details finden sich in Kapitel 6.4.3.^{433,434}

Marktpotenzial: Aufgrund ihrer vielfältigen Translationsmöglichkeiten zählt GCT zu den dynamischsten Wachstumsfeldern der globalen Gesundheitswirtschaft. Bis 2030 soll das weltweite Marktvolumen von derzeit rund 13 Mrd. € auf 81 Mrd. € steigen.⁴³⁵ Diese Entwicklung wird vor allem durch die zunehmende technologische Reife innovativer Therapieansätze, durch regulatorische Fortschritte sowie durch den Markteintritt mehrerer „First-in-Class“-Therapien vorangetrieben. Es ist davon auszugehen, dass GCT in den kommenden Jahren zunehmend auch bei komplexen und häufigeren Erkrankungen Anwendung finden. Damit wächst nicht nur das Marktpotenzial, sondern auch die strategische Relevanz als Schlüsseltechnologie in der Gesundheitsversorgung.

⁴³¹ Novartis (2018).

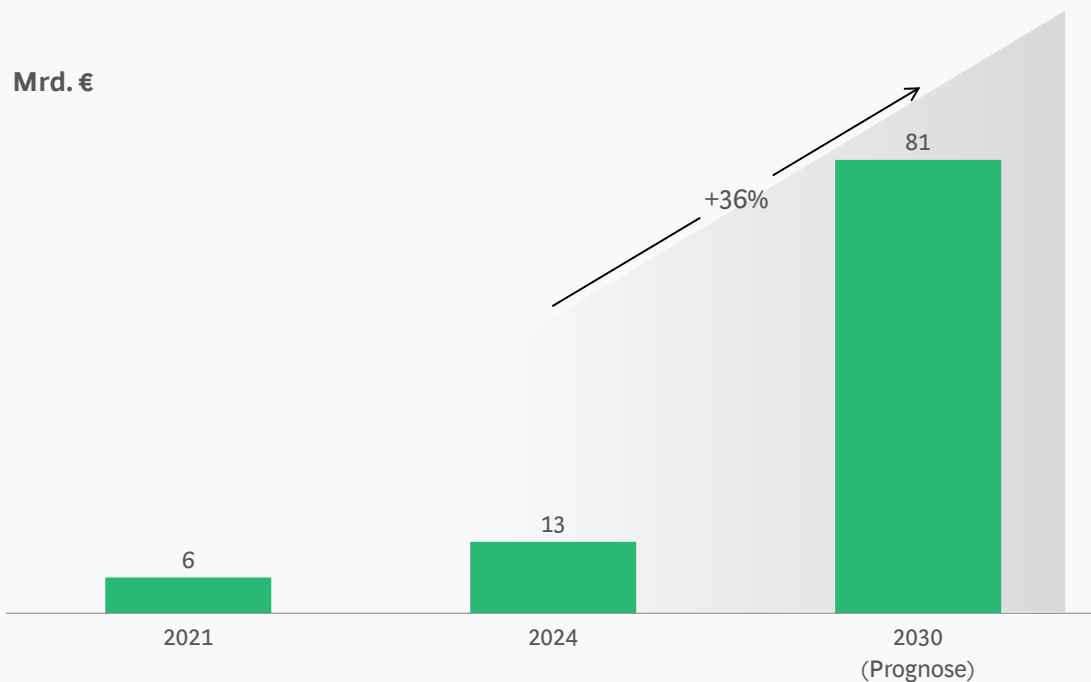
⁴³² Gilead (2018).

⁴³³ FAU (2024).

⁴³⁴ VFA (2024).

⁴³⁵ EvaluatePharma; BCG-Analyse (2025).

Weltweites Marktvolumen für Zell- und Gentherapien



Quelle: EvaluatePharma (Febr. 2025); Experteninterviews; BCG-Analyse

6.4.3 Globale Wettbewerbslandschaft und Position Deutschlands hinsichtlich Gen- und Zelltherapien

Die Ausgangslage Deutschlands im Bereich GCT ähnelt in wesentlichen Zügen der in Kapitel 6.3.3 beschriebenen Situation bei mRNA-Technologien: Starke wissenschaftliche Grundlagen, industrielle Leuchttürme und in der Therapieentwicklung aktive Universitätskliniken stehen erheblichen Herausforderungen bei der breiten Skalierung und Anwendung dieser Technologie gegenüber. Hinzu kommen technologiespezifische Besonderheiten – etwa in Herstellung, klinischer Umsetzung und regulatorischer Bewertung –, die ergänzend berücksichtigt werden müssen.

Deutschlands Position

Strategie und Zielsetzung. Während auf europäischer Ebene derzeit keine eigenständige Strategie für GCT existiert, hat Deutschland mit der im Juni 2024 veröffentlichten Nationalen Strategie GCT erstmals eine

ressortübergreifende Zielsetzung formuliert. Die Strategie adressiert acht Handlungsfelder und positioniert GCT als Teil der Medizin von morgen.⁴³⁶ Ergänzend verankert die im Juli 2025 verabschiedete Hightech Agenda die Biotechnologie als eine von sechs prioritären Schlüsseltechnologien und schafft damit einen nationalen Rahmen mit übergeordneten Zielsetzungen (vgl. Kapitel 6.5). Im internationalen Vergleich kommen diese Schritte spät: Die USA haben etwa bereits 2016 mit dem 21st Century Cures Act⁴³⁷ und später mit dem RMAT designation program⁴³⁸ der FDA die GCT explizit priorisiert.

Ökosystem-Infrastruktur. Deutschland verfügt im Bereich GCT über eine leistungsfähige wissenschaftliche Infrastruktur und mehrere etablierte Universitätsstandorte mit GMP-Erfahrung. Dies ist eine gute Grundlage, um auch die industrielle Skalierung und Versorgungsperspektive langfristig abzusichern.

⁴³⁶ BMBF und BIH (2024).

⁴³⁷ FDA (2020).

⁴³⁸ FDA (2023b).

National bestehen jedoch Schwächen bei öffentlich zugänglicher, industrienaher Infrastruktur: Die Dichte an Vektorproduktionsstätten ist gering. Die Nationale Strategie GCT betont deshalb ausdrücklich die Notwendigkeit der „Schaffung einer zentralen nationalen Produktionseinrichtung für die Herstellung kritischer Ausgangsstoffe für GCT“.⁴³⁹

Wie bereits in Kapitel 6.3.3 (mRNA-Position Deutschlands) beschrieben, ist auch im Bereich GCT der regulatorische Rahmen in Deutschland fragmentiert: Genehmigungen liegen bei PEI, BfArM, Landesbehörden und Ethikkommissionen. Die Nationale Strategie GCT benennt diese Fragmentierung explizit und schlägt die Einrichtung eines Regulatorikgremiums, den Einsatz von Sandbox-Verfahren und eine Harmonisierung vor.⁴⁴⁰ Internationale Benchmarks zeigen, dass andere Länder teils schneller agieren: Die MHRA (UK) und die FDA (USA) bieten mit Fast-Track-Verfahren und festen Ansprechpartnern beschleunigte und kohärentere Zulassungswege. Ein weiteres Beispiel internationaler Dynamik ist China, das insbesondere im Bereich CAR-T-Therapien zunehmend attraktiv für Investitionen und klinische Studien wird. Durch unkomplizierte und schnelle Verfahren zur Eröffnung sogenannter Investigator Initiated Studies (IIS) schafft China derzeit regulatorische Vereinfachungen und zieht damit verstärkt internationale Forschungsaktivitäten an.⁴⁴¹

Ein wesentliches Defizit ist die bislang fehlende durchgehende, auf GCT ausgerichtete Förderarchitektur, die alle Phasen von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Skalierung kohärent abbildet.

Die Nationale Strategie GCT benennt die Etablierung neuer Förderformate, bleibt jedoch bislang ohne finanzielle Hinterlegung oder verbindliches Förderprogramm. Auch eine Beteiligung am EU-weiten IPCEI Programm (Med4Cure⁴⁴²) erfolgte nicht – anders als bei Mikroelektronik⁴⁴³ oder Batterien.⁴⁴⁴

Bildung und Fachkräfte. Obwohl Deutschland im internationalen Vergleich über viele qualifizierte Fachkräfte verfügt, bleibt der Mangel an spezialisiertem Personal auch hierzulande eine zentrale Herausforderung. Besonders in regulatorischen Funktionen bestehen laut Expertenbefragung Lücken.⁴⁴⁵ Die Nationale

Strategie GCT schlägt dafür berufsbegleitende Zusatzqualifikationen, Masterstudiengänge und Trainingszentren vor.⁴⁴⁶

Im internationalen Vergleich haben andere Länder bereits konkrete Maßnahmen zur Fachkräftequalifizierung im Bereich GCT umgesetzt. Beispiele sind das Cellular Therapies Certificate Program (AABB/George Washington University, USA) und das Certified Advanced Biotherapies Professional (CABP) credentialing program (berufsbezogene Zertifizierung mit Prüfung durch AABB, USA),⁴⁴⁸ die modular aufgebaute und zertifizierte Weiterbildungsformate anbieten. Zudem hat Irland mit dem National Institute for Bioprocessing Research and Training (NIBRT) ein GMP-kompatibles Trainingszentrum etabliert, das Ausbildung, Auftragsforschung und regulatorisches Training bündelt und heute als internationales Referenzmodell gilt.⁴⁴⁹

Neben der Verfügbarkeit von Fachkräften ist die Akzeptanz ein zentraler Erfolgsfaktor für GCT – bei Patienten und Kostenträgern sowie in Fachkreisen. Die Nationale Strategie GCT sieht hierfür den „Aufbau einer zentralen Kommunikationsplattform mit Webpräsenz zur Bereitstellung von Informationen für die verschiedenen relevanten Zielgruppen“ vor.⁴⁵⁰ In der Praxis fehlen bislang jedoch nationale Informationskampagnen für Patienten und Fachkreise. Internationale Vorbilder wie das National Institute for Health and Care Excellence (NICE, UK) integrieren strukturierte Schulungsmaterialien, indikationsspezifische Entscheidungshilfen und patientenorientierte Informationsformate systematisch in den Prozess der Nutzenbewertung.⁴⁵¹

Technologietransfer und -skalierung. Europa – insbesondere Frankreich, die Niederlande und Deutschland – zeigt zwar wissenschaftliche Exzellenz, bleibt jedoch in Translation und ökonomischer Skalierung aufgrund der fehlenden Verzahnung von Forschung und Klinik deutlich hinter den USA zurück. Die Nationale GCT-Strategie erkennt diese strukturellen Defizite an und nennt als Ziel die „Verbesserung der strukturellen Voraussetzungen für translationale Forschung und Entwicklung“.⁴⁵² Internationale Beispiele wie das Centre for Commercialization of Regenerative Medicine (CCRM, Kanada)⁴⁵³ zeigen, wie eine institutionalisierte,

⁴³⁹ BMBF und BIH (2024).

⁴⁴⁰ BMBF und BIH (2024).

⁴⁴¹ Clarivate (2024).

⁴⁴² EC (2025a).

⁴⁴³ EC (2023c).

⁴⁴⁴ EC (2021b).

⁴⁴⁵ Vintura (2025).

⁴⁴⁶ BMBF und BIH (2024).

⁴⁴⁷ NIIMBL (2025).

⁴⁴⁸ AABB (2025).

⁴⁴⁹ NIBRT (2025).

⁴⁵⁰ BMBF und BIH (2024).

regulatorisch versierte und industrienähe Transferarchitektur zur Brücke zwischen Forschung und Versorgung werden kann.

Kooperation. Kooperationen zwischen Industrie, Wissenschaft und öffentlichen Institutionen sind entscheidend, um Innovationen im Bereich der GCT schnell zur Marktreife zu bringen und Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern. Die deutsche Ausgangslage ist dabei ambivalent: Einerseits bestehen etablierte wissenschaftliche Netzwerke und starke industrielle Cluster, etwa an Standorten wie Mainz, München, Leipzig und Berlin (BioNTech, Fraunhofer-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft, Saxocell). Andererseits fehlen bislang verbindliche, systematische und nachhaltige Kooperationsformate, die Wirtschaft, Kapitalgeber sowie weitere Akteure wie Nichtregierungsorganisationen (NGOs) und Interessengruppen vernetzen. Solche Formate könnten doppelt wirken, indem sie sowohl den Dialog über Forschungs- und Investitionsbedarfe als auch die Verbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse fördern. Die Nationale Strategie GCT benennt diese Schwäche explizit und empfiehlt unter anderem die Einrichtung industrieübergreifender Product-Development-Units. Zudem betont die Strategie, den Austausch mit Bundesoberbehörden wie dem PEI und spezialisierten Ethikkommissionen durch regelmäßige gemeinsame Veranstaltungen und Netzwerkkongresse zu stärken, um regulatorische Aspekte praxisnah zu diskutieren.⁴⁵⁴

Auch auf europäischer Ebene besteht Potenzial, Kooperationen systematisch und nachhaltig auszubauen. Initiativen wie das European Consortium for Communicating Gene and Cell Therapy Information (EuroGCT)⁴⁵⁵ schaffen dabei bereits erste wertvolle paneuropäische Strukturen für die Kooperation im Bereich Kommunikation und Aufklärung. Analog dazu braucht es Formate, die sich gezielt auf die praktische Translation von Forschungsergebnissen konzentrieren.⁴⁵⁶

Innovation, Forschung und Entwicklung. Eine starke Innovationslandschaft und exzellente Forschungsstrukturen bilden die Grundlage, um im Bereich GCT eine internationale Führungsrolle einzunehmen und technologische Durchbrüche schnell in die klinische Anwendung zu übertragen. Deutschland verfügt dabei über eine starke Ausgangsposition: Mit zahlreichen renommierten Forschungseinrichtungen, exzellenten

Universitäten und international anerkannten Instituten wie dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ), den Fraunhofer-Instituten und dem Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung (HZI) zählt Deutschland in der Grundlagenforschung zur internationalen Spitze. Allerdings gelingt es bisher nur bedingt, die Ergebnisse aus dieser Grundlagenforschung bis zur Marktreife weiterzuentwickeln – insbesondere aufgrund fehlender Wagniskapitalmittel und fragmentierter Förderstrukturen.

Eine transparente Evaluierung und kontinuierliche Weiterentwicklung bestehender und neuer Förderprogramme ist in der Nationalen Strategie GCT vorgesehen, ihre Umsetzung steht jedoch noch aus. Positiv ist hervorzuheben, dass insbesondere neue und agile Förderformate wie Fast-Track-Grants oder Trampolin-Grants entwickelt werden, die eine schnelle und unbürokratische Bereitstellung von Ressourcen für translationale Vorhaben ermöglichen.⁴⁵⁷

Trotz Deutschlands hervorragender Ausgangslage und Erfolgsbeispielen wie der weltweit ersten Anwendung von CAR-T-Therapien in der Immunologie⁴⁵⁸ verdeutlichen die zuvor beschriebenen Herausforderungen, dass der Standort sein Potenzial im Bereich GCT bislang nicht voll ausschöpft. Gemessen an Forschungsinfrastruktur, Publikationsleistung in der Wissenschaft, klinischer Studienaktivität, Kapitalinvestitionen, Unternehmensdichte, industriellen Partnerschaften sowie Zulassungs- und Erstattungsdynamik liegen China und die USA im GCT-Markt weiterhin deutlich vorn.⁴⁵⁹

Ein Blick auf die Marktverteilung (vgl. Abb. 35) unterstreicht diese Dynamik: Der US-Markt bleibt therapieübergreifend führend und wird bis 2029 voraussichtlich größer sein als die Märkte Europas und der übrigen Welt (ROW) zusammen. Für den Zelltherapiemarkt wird in den USA ein jährliches Wachstum von 32 % auf ein Volumen von 12 Mrd. € erwartet, bei Gentherapien sogar ein jährliches Plus von 51 % auf 11 Mrd. €. Europa verzeichnet zwar mit 61 % das höchste jährliche Wachstum im Gentherapiesektor, bleibt mit 5 Mrd. € Marktgröße jedoch deutlich hinter den USA zurück.⁴⁶⁰

⁴⁵¹ NICE (2025).

⁴⁵² BMBF und BIH (2024).

⁴⁵³ NCE (2011).

⁴⁵⁴ BMBF und BIH (2024).

⁴⁵⁵ EC (2021).

⁴⁵⁶ EuroGCT (2021c).

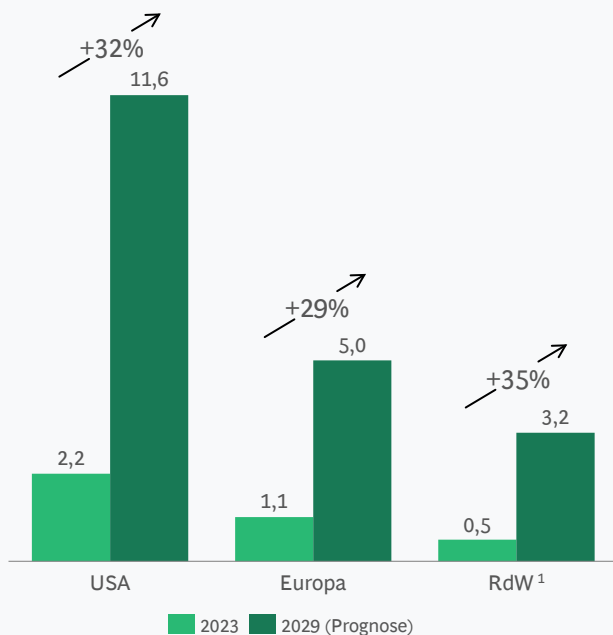
⁴⁵⁷ BMBF und BIH (2024).

⁴⁵⁸ FAU (2024).

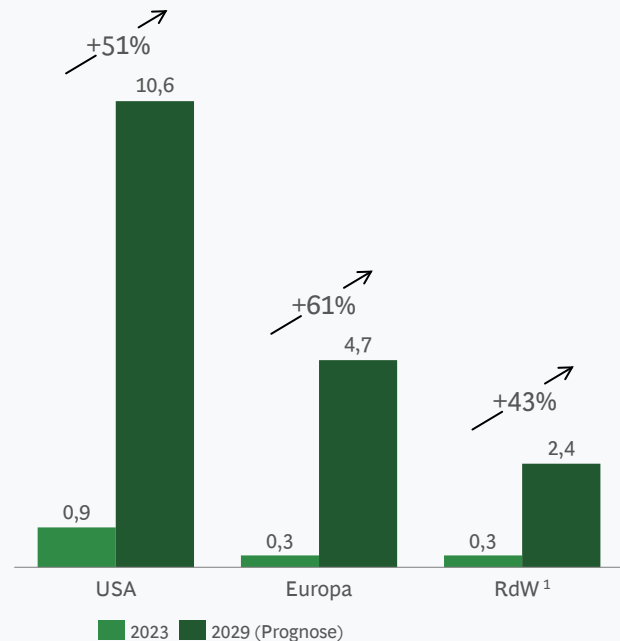
⁴⁵⁹ Vintura (2025).

ABBILDUNG 35 | USA bleiben größter Markt für Zell- und Gentherapien – starkes Wachstum weltweit

Pharma-Endmarkt Zelltherapie (Mrd. €)



Pharma-Endmarkt Gentherapie (Mrd. €)



Anmerkung: Für die Berechnung der geografischen Verteilung wurde der prozentuale geografische Anteil aus dem Kalorama-Bericht mit den EP-Endmarktdaten multipliziert

1. RdW = Rest der Welt, umfasst hauptsächlich Kanada, Australien, Südkorea, Japan, Brasilien und China

Quelle: Bericht "Evaluate Pharma" von 2024; Kalorama-Bericht von 2024 zu Zelltherapien und dem Genmarkt (nur für geografische Verteilung); BCG-Analyse

6.5 Handlungsempfehlungen, Herausforderungen und Risiken

Deutschland befindet sich im Bereich mRNA-Medikamente und GCT in einer sehr guten Ausgangsposition: Mit international führenden Unternehmen, wissenschaftlicher Exzellenz sowie etablierten Regulierungs- und Zulassungsbehörden sind viele Voraussetzungen gegeben, um eine globale Führungsrolle in diesen hochdynamischen Feldern einzunehmen. Gleichzeitig bestehen im internationalen Vergleich klare Rückstände und Aufholbedarf: Die USA und China treiben den systematischen Aufbau skalierbarer Innovations- und Versorgungssysteme deutlich prioritärer voran und profitieren unter anderem von einer weniger fragmentierten und kapitalstärkeren Förderlandschaft.

Aufgrund dieser Herausforderungen droht Deutschland trotz starker Grundlagenforschung in den translativen und industriellen Stufen der Wertschöpfung zurückzufallen. Deutschland benötigt eine klare, technologieadäquate Gesamtstrategie, die konkrete Maßnahmen sowohl zur Stärkung bestehender Exzellenzfelder als auch zum systematischen Abbau struktureller Defizite

entlang der gesamten Wertschöpfungskette definiert. Diese sollte der Tatsache Rechnung tragen, dass es sich bei mRNA-Medikamenten und GCT nicht um klassische Arzneimittel handelt, sondern um Deep-Tech-Innovationen mit Game-Changer-Charakter, die neue Anforderungen an Entwicklung, Zulassung, Finanzierung und Markteinführung stellen. Ziel sollte es sein, die langfristige Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im Bereich mRNA-Medikamente und GCT nachhaltig abzusichern sowie international führende Innovations-, Produktions- und Versorgungsstrukturen aufzubauen.

Bezug zur Hightech Agenda Deutschland der Bundesregierung

Die Bundesregierung hat die strategische Bedeutung biotechnologischer Schlüsseltechnologien erkannt und mit der kürzlich verabschiedeten Hightech Agenda Deutschland vier übergeordnete Ziele für den Bereich Biotechnologie formuliert, wovon drei direkten Bezug zu mRNA-Medikamenten und GCT haben:

⁴⁶⁰ EvaluatePharma; BCG-Analyse (2025).


- „Wir werden durch Biotechnologie Deutschlands Souveränität in der Entwicklung der Medizin von morgen stärken und damit Deutschland zu einem Spitzenstandort für die Gesundheitsforschung machen.“
- „Wir werden Deutschland zum weltweit innovativsten Standort für die Biotechnologie ausbauen und so eine ressourceneffiziente, wettbewerbsfähige Industrie gestalten sowie die Wertschöpfung Deutschlands erhöhen.“
- „Wir werden für eine zunehmend prädiktive und präventive Medizin von morgen die innovative Medizintechnik voranbringen.“⁴⁶¹

Diese Maßnahmen decken sich in wichtigen Punkten mit den zentralen Handlungsfeldern, die in der vorliegenden Studie identifiziert wurden, und werden ausdrücklich unterstützt. Ziel der aktuellen Studie ist es daher, die Handlungsempfehlungen konkret und fokussiert für mRNA-Medikamente und GCT zu ergänzen und zu detaillieren, um die Lücke zwischen übergeordneter strategischer Zielsetzung und konkreter Umsetzung einzelner Technologien zu schließen.

Zusätzlich definiert das BMFTR ausgewählte Maßnahmen zur Erreichung dieser übergeordneten Ziele – etwa den Aufbau eines nationalen Translationszentrums für GCT, die gezielte Förderung interdisziplinärer KI-Projekte zur Beschleunigung der Arzneimittelentwicklung sowie den Ausbau von Genomsequenzierungskapazitäten.

⁴⁶¹ BMFTR (2025a).

ABBILDUNG 36 | mRNA-Medikamente, Zell- und Gentherapien | Empfehlungen entlang der sechs Handlungsfelder

Handlungsfeld	Handlungsempfehlung
Strategie und Zielsetzung 	B1 - Klare staatliche Positionierung zu relevanten Deep-Tech-Medikamenten und deren Förderung
Ökosystem-Infrastruktur 	B2 - Unterstützung der Standardfinalisierung hinsichtlich Herstellung und Qualität von ATMPs (ASTM, ISO) B3 - Weiterentwicklung und Stärkung von Förderlandschaft sowie Finanzierungs- und Erstattungsmodellen B4 - Förderung gemeinsamer, zugänglicher und lokaler Produktionsinfrastruktur mit Fokus auf mRNA-Medikamente und GCT
Bildung und Fachkräfte 	B5 - Erhöhung der Standortattraktivität für Fach- und Führungskräfte im Bereich Biotechnologie B6 - Initiierung gesellschaftlicher Aufklärung, Bildung und ethischer Debatten zu innovativen Medikamenten B7 - Definition von Kompetenzprofilen und Aufbau passgenauer Bildungsprogramme
Technologie-transfer und -skalierung 	B8 - Förderung von Spin-off-Ökosystemen und Vereinfachung der Rahmenbedingungen für Ausgründungen im Biotechnologiebereich B9 - Förderung und Zusammenführung von Produktions- und Innovationszentren mit translationalen Nutzungsmöglichkeiten
Kooperation 	B10 - Intensivierung europäischer Integration zur Förderung von Wissensaustausch und Netzwerkeffekten B11 - Aktive Ansprache und Vernetzung von Biotech-Start-ups durch die Industrie
Innovation, Forschung und Entwicklung 	B12 - Regulatorische Vereinfachung zur Pilotierung von „Game-Changer“-Medikamenten und Realisierung von Reallaboren B13 - Frühzeitige Analyse der potenziellen Versorgungsrealität für Deep-Tech-Medikamente B14 - Etablierung einer nationalen Biodatenbank und zugehöriger Zugangsstrukturen, um die Forschung an ATMPs gezielt zu fördern

Quelle: BCG-Analyse

B1 - Strategie und Zielsetzung: Klare staatliche Positionierung zu relevanten Deep-Tech-Medikamenten und deren Förderung.

Damit mRNA-Medikamente und GCT als Chancenfeld wirksam erschlossen werden können, genügt eine High-Level-Strategie allein nicht. Erforderlich ist ein konkreter und nachhaltiger Umsetzungsplan. Deutschland benötigt daher eine ressortübergreifend abgestimmte Roadmap für mRNA-Medikamente und GCT, die über die Nationale Strategie GCT hinausgeht. Diese sollte auf einer umfassenden Deep-Tech-Agenda (vgl. Kapitel 1.2) aufbauen und konkrete Investitionsziele bis mindestens 2030, regulatorische Rahmenbedingungen wie die Einführung adaptiver Zulassungsverfahren für innovative Medikamente sowie Infrastrukturausbautufen definieren und terminieren. Dabei sollte Deutschland parallel zu europäischen Initiativen einen eigenständigen nationalen Handlungsansatz verfolgen, der ausdrücklich Bereiche adressiert, die auf europäischer Ebene nicht ausreichend abgedeckt sind – etwa eine nationale Koordinations- und Entwicklungsstruktur für modulare mRNA-Medikamente.

Die Agenda sollte darauf abzielen, Deutschland nicht nur als Entwicklungs- und Produktionsstandort für heimische Unternehmen attraktiv zu halten, sondern auch als Standort für international führende Biotechnologieunternehmen zu positionieren. Die Einrichtung eines kontinuierlichen Monitorings sowie eines Steuerungsgremiums – etwa eines ständigen Expertenrats unter Leitung von BMG und BMFT, besetzt mit Vertretern aus Industrie, Wissenschaft, Behörden und Patientenorganisationen – kann die Roadmap institutionell verstetigen und bei Bedarf an neue technologische Entwicklungen anpassen. Eine gut abgestimmte Arbeitsweise des Gremiums – unterstützt durch regelmäßige ressortübergreifende Koordination – kann dazu beitragen, strategische Ziele effizient umzusetzen.

B2 - Ökosystem-Infrastruktur: Unterstützung der Standardfinalisierung hinsichtlich Herstellung und Qualität von ATMPs (ASTM, ISO).

Deutschland sollte sich aktiv an der Festlegung und Implementierung internationaler Standards für die Herstellung und Qualitätssicherung von Advanced Therapy Medicinal Products (ATMPs) beteiligen und so gezielt die Expertise und Anforderungen aus Wirtschaft und Wissenschaft einbringen. Derzeit arbeiten internationale Organisationen wie Advancing Standards Transforming Markets (ASTM) und die ISO intensiv an global einheitlichen Spezifikationen und Normen, etwa für Prüfmethoden, Materialien und Maschinenqualifikationen. Parallel dazu entwickelt die EMA spezifische regulatorische Standards im europäischen Kontext.

Damit diese Standards den Anforderungen deutscher Unternehmen entsprechen und deren Expertise berücksichtigen, sollten sich verstärkt sowohl öffentliche Einrichtungen wie das PEI als auch Industrieunternehmen proaktiv in die laufenden internationalen Normungsprozesse einbringen. Die Politik sollte diesen Prozess aktiv durch das gezielte Setzen von Anreizen für die wirtschaftliche Teilnahme an der Gremienarbeit unterstützen.

B3 - Ökosystem-Infrastruktur: Weiterentwicklung und Stärkung von Förderlandschaft sowie Finanzierungs- und Erstattungsmodellen.

Trotz international anerkannter Forschungsleistungen gelingt es Deutschland bislang nur unzureichend, biotechnologische Durchbrüche in wirtschaftliche und industrielle Wertschöpfung zu übertragen. Um diese strukturelle Schwäche zu adressieren, ist eine gezielte Stärkung und Neuausrichtung der Förderarchitektur an kritischen Stellen der Innovationskette erforderlich. Die Politik kann durch steuerliche Anreize wie Wagniskapitalfreibeträge oder gezielte Verlustverrechnungsmodelle sowie durch regulatorisch flankierte Co-Investitionsprogramme von nationaler oder Länderseite mit privaten Kapitalgebern (Public-Private-Partnerships, PPPs) aktiv dazu beitragen.

Um institutionelle Investoren langfristig in strategisch relevante Deep-Tech-Biotech-Fonds zu lenken, sollte eine nationale Anlagestrategie öffentlicher Fonds (z. B. KfW Capital) entwickelt werden. Richten öffentlich gemanagte Fonds wie KfW Capital ihre Portfolios entsprechend aus, fließen häufig nicht nur Bundesmittel in Deep-Tech, sondern auch die Investitionen institutioneller Kapitalgeber, die über Co-Investments mit der KfW verbunden sind. Ergänzend könnte die Einrichtung eines eigenständigen Deep-Tech-Wachstumsfonds oder der Ausbau des bestehenden DeepTech & Climate Fonds gezielt technologieintensive Biotechnologieunternehmen in der kritischen und kapitalintensiven Entwicklungs- und Skalierungsphase adressieren (vgl. Kapitel 7 – übergreifende Handlungsempfehlungen).

Um Unternehmen zur Entwicklung neuartiger Medikamente zu motivieren, ist es zudem wichtig, deren Wirtschaftlichkeit bei erfolgreicher Zulassung sicherzustellen. Besonders Einmalanwendungen wie mRNA-Medikamente und GCT sind herausfordernd: Sie verursachen hohe initiale Forschungskosten, während die Erlösströme für Unternehmen oftmals unregelmäßig bleiben. Hinzu kommen Unsicherheiten über die langfristige Kostenentwicklung durch Nachsorgeverpflichtungen oder klinische Begleitforschung. Innovative Finanzierungs- und Erstattungsmodelle müssen daher sowohl Entwicklungs- als auch Folgekosten angemessen berücksichtigen, um wirtschaftliche Anreize und eine nachhaltige Versorgung zu gewährleisten.

B4 - Ökosystem-Infrastruktur: Förderung gemeinsamer, zugänglicher und lokaler Produktionsinfrastruktur mit Fokus auf mRNA-Medikamente und GCT.

Ein leistungsfähiges Innovationsökosystem benötigt offene, lokal verankerte Produktionsinfrastrukturen, die unterschiedlichen Akteuren Zugang zu kritischen Technologien und Komponenten ermöglichen. Deutschland sollte daher den Aufbau einer national koordinierten Produktionsinitiative vorantreiben – insbesondere für essenzielle Bausteine wie virale Vektoren oder Enzyme –, um Importabhängigkeiten zu verringern.

Bereits bestehende Zentren wie Evonik (Lipide, Hanau und Dossenheim), Lipoid (Lipide, Ludwigshafen), Merck KGaA (Lipide, Darmstadt bzw. mRNA, Hamburg) WACKER Biotech (mRNA/LNP, Halle), Biospring (mRNA, Frankfurt a. M.), PlasmidFactory (Plasmide, Bielefeld) und ProBioGen (virale Vektoren, Berlin) bilden hierfür eine wichtige Grundlage und sollten im Rahmen einer national koordinierten Initiative systematisch einbezogen werden. Ergänzend braucht es interinstitutionelle Kooperationsformate, die eine koordinierte und effiziente Nutzung über Organisationsgrenzen hinweg fördern. Staatliche Akteure, Unternehmen, Branchenverbände und wissenschaftliche Einrichtungen sind gleichermaßen gefordert, diese Strukturen aktiv mitzugestalten, ihre Nutzung zu verstetigen und die überregionale Vernetzung der Standorte sicherzustellen.

B5 - Bildung und Fachkräfte: Erhöhung der Standortattraktivität für Fach- und Führungskräfte im Bereich Biotechnologie.

Für ein leistungsfähiges Deep-Tech-Ökosystem in der Biotechnologie ist eine ausreichende Verfügbarkeit hochqualifizierter Fachkräfte entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich. Ein koordiniertes Maßnahmenpaket kann dem aktuellen Engpass entgegenwirken und Deutschland als Arbeitsort für deutsche sowie internationale Fach- und Führungskräfte attraktiver machen.

Derzeit stellen komplexe und langwierige Anerkennungsverfahren ein zentrales bürokratisches Hindernis bei der Anstellung internationaler Fachkräfte dar, insbesondere für kleinere Unternehmen ohne große Verwaltungskapazitäten. Die Vereinfachung von Visa- und Anerkennungsverfahren sowie die Einrichtung von Welcome-Zentren an zentralen Biotechnologiestandorten können kurzfristig dazu beitragen, qualifizierte internationale Talente gezielt für Deutschland zu gewinnen.

Strukturierte Rückholprogramme für im Ausland tätige Fachkräfte – etwa über Stipendien, Umzugspakete und Dual-Career-Angebote – können zudem die Verfügbarkeit deutschsprachiger Fachkräfte verbessern.

Ein weiterer zentraler Baustein zur Überwindung des strukturellen Fachkräftemangels ist die gemeinsame Entwicklung internationaler Anwerbeprogramme durch staatliche Stellen, Spitzenverbände und regionale Cluster. Diese Programme lassen sich über internationale Rekrutierungskampagnen, gezielte Partnerschaften mit renommierten Ausbildungseinrichtungen im Ausland sowie bilaterale Kooperationen im Rahmen strategischer Talentinitiativen umsetzen.

B6 - Bildung und Fachkräfte: Initiierung gesellschaftlicher Aufklärung, Bildung und ethischer Debatten zu innovativen Medikamenten.

Die gesellschaftliche Akzeptanz disruptiver Medikamente ist entscheidend für ihren klinischen und wirtschaftlichen Erfolg. Deutschland benötigt daher eine koordinierte Aufklärungsstrategie zu Deep-Tech-Biotechnologien, die Chancen und Risiken klar vermittelt. Neben gezielten Informationskampagnen sind partizipative Formate wie Bürgerräte und ethische Dialogforen hilfreich, um Vertrauen aufzubauen und gesellschaftliche Fragen frühzeitig zu adressieren. Darüber hinaus kann die curriculare Verankerung bioethischer und biotechnologischer Themen von der schulischen bis zur medizinischen Ausbildung langfristig dazu beitragen, das Verständnis dieser Technologien in der Bevölkerung zu vertiefen.

B7 - Bildung und Fachkräfte: Definition von Kompetenzprofilen und Aufbau passgenauer Bildungsprogramme.

Die biotechnologische Wertschöpfung im Bereich mRNA-Medikamente und GCT erfordert hochspezialisierte Kompetenzen, die in den bestehenden Ausbildungs- und Weiterbildungsstrukturen bislang nicht systematisch abgebildet sind. Besonders in GMP-nahen Bereichen wie Bioprozessentwicklung, Automatisierung und regulatorischem CMC-Management wächst der Bedarf an klar definierten Qualifikationsprofilen. Um die langfristige Fachkräftebasis zu sichern, sollten gemeinsam mit Industrie, Hochschulen und Berufsverbänden neue oder angepasste Kompetenzprofile entwickelt werden, die spezifische Anforderungen entlang der biotechnologischen Entwicklungskette berücksichtigen.

Parallel braucht es attraktive, auf diese Kompetenzprofile spezialisierte Aus- und Weiterbildungsformate für Fachkräfte am Beginn ihrer Karriere – etwa durch nationale Branchenakademien, zertifizierte GMP-nahe Schulungsprogramme sowie spezialisierte Masterstu-

diengänge mit Fokus auf Regulatorik, Produktion und translationale Entwicklung. Hochschulen, Unternehmen und Forschungseinrichtungen können durch Talentwettbewerbe, MINT-Förderformate und Schulkooperationen Nachwuchs frühzeitig für das Feld begeistern und die Resonanz der relevanten Zielgruppen auf neue akademische Angebote steigern.

Darüber hinaus kann durch flexiblere Karrierewege und gezielte Anreizsysteme der regelmäßige Know-how- und Personalaustausch zwischen Wissenschaft und Industrie gefördert werden – etwa durch duale Karriereprogramme, die Forschern zeitlich befristete Industriepositionen eröffnen, durch strukturierte Sabbaticals zur Unterstützung industrieller Ausgründungen oder durch flexible Teilzeitmodelle für gemeinsame Industrie- und Hochschulstellen.

B8 - Technologietransfer und -skalierung: Förderung von Spin-off-Ökosystemen und Vereinfachung der Rahmenbedingungen für Ausgründungen im Biotechnologiebereich.

Die Gründungstätigkeit aus Wissenschaft und Klinik gilt es gezielt zu erleichtern und systematisch zu unterstützen. Dazu bedarf es klarer und transparenter Verwertungsstrukturen sowie niedrigschwelliger rechtlicher Rahmenbedingungen. Ergänzend sind Coaching- und Qualifizierungsformate erforderlich, die Gründungsteams bei den ersten Schritten begleiten.

Um die Translation in Richtung klinischer Anwendung zu sichern, müssen durchgehende Förderlinien zwischen präklinischer Validierung und GMP-Produktion etabliert werden. In der Projektförderung sind verbindliche Transfervorgaben, Gründungsstipendien und gezielte Seed-Instrumente zu verankern.

Öffentliche Förderprogramme sind stärker auf die Frühphase von Spin-offs auszurichten – etwa durch Seed-Fonds, Matching-Mechanismen oder öffentlich-private Frühphasenplattformen. Insbesondere im Bereich innovativer Biotechnologien ist die zentrale Herausforderung zu berücksichtigen, dass die typischen Investitionszyklen von Venture-Capital-Gebern und die langen regulatorischen Zulassungsprozesse zeitlich oftmals nicht zusammenpassen, was zu Finanzierungslücken und erschwerten Skalierungsbedingungen führt. Diese Herausforderung ist nicht auf Deutschland beschränkt, sondern betrifft die Finanzierung innovativer Medikamente weltweit. In den USA und Großbritannien stehen jedoch größere, auf Life Sciences spezialisierte VC-Fonds zur Verfügung, die längere Entwicklungszyklen tragen können. In Deutschland fällt das Problem daher stärker ins Gewicht, weshalb in den kommenden Jahren eigene Lösungen entwickelt werden sollten, um Ausgründungen zu stärken.

Hohe Transfer- und Ausgründungserfolge setzen voraus, dass diese Instrumente wirksam eingesetzt werden und die Prozesse an Hochschulen und Universitäten so gestaltet sind, dass Ausgründungen gezielt gefördert und als relevante Leistungskennzahlen sowie Karrierepfade verankert werden. Eine weitere zentrale Voraussetzung ist der Abbau struktureller Hürden im Zusammenspiel von Wissenschaft und Wirtschaft. Starre Karrierewege erschweren derzeit den Übergang von Wissenschaftlern in die Industrie, wodurch Transferpotenziale nicht voll ausgeschöpft werden. Hier sollte die Politik Rahmenbedingungen schaffen, die eine größere Durchlässigkeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft fördern.

B9 - Technologietransfer und -skalierung: Förderung und Zusammenführung von Produktions- und Innovationszentren mit gemeinsamen und translationalen Nutzungsmöglichkeiten.

Ein leistungsfähiges Innovationsökosystem erfordert offene, skalierbare Infrastrukturplattformen für Entwicklung, Validierung und Produktion. Um den Ausbau der für Technologietransfer und -skalierung kritischen Infrastruktur in Deutschland voranzutreiben, sollten bestehende Produktions- und Testkapazitäten ebenso wie bestehende Innovationszentren gezielt in national koordinierte Technologie-Hubs zusammengeführt und durch Investitionen in GMP-nahe Strukturen gefördert werden, etwa nach dem Vorbild des CGT Catapult im Vereinigten Königreich. Diese Hubs sollten regulatorische Beratung, technologische Infrastruktur und industriennahe Skalierungsangebote mit anwendungsorientierter Forschung zusammenbringen und als zentrale Knotenpunkte für Wissenschaft, Industrie und klinische Anwendung dienen.

Durch ihre Zusammenführung in eine überschaubare Zahl spezialisierter, national koordinierter Technologie-Hubs mit gezielter Förderung können sie weiter gestärkt werden. Um Skaleneffekte zu nutzen und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern, sind systematische Konzepte zur gemeinsamen Nutzung dieser Infrastruktur (z. B. öffentlich geförderte Zugangskonzepte oder interinstitutionelle Kooperationsformate) notwendig. Diese sollten insbesondere Start-ups, KMUs und interdisziplinäre Forschungsvorhaben aktiv einbeziehen. Die Industrie ist aufgefordert, sich mit Co-Finanzierungen und praxisnahen Projekten zu beteiligen, während Forschungseinrichtungen ihre methodische Expertise einbringen und die Zentren für transnationale Kooperationen nutzen. So können die Hubs zusätzlich als Inkubatoren für neue Produkte, Verfahren und Kooperationen wirken.

B10 - Kooperation: Intensivierung europäischer Integration zur Förderung von Wissensaustausch und Netzwerkeffekten.

Zur Stärkung der europäischen Integration und des Wissensaustauschs bedarf es des gezielten Ausbaus internationaler Partnerschaften, gemeinsamer Innovationsnetzwerke und offener Plattformen für regulatorische und technische Erkenntnisse. Dies ist ein Prozess, den Deutschland mitgestalten kann und von dem es zugleich unmittelbar profitiert. Der Biotechnologiesektor sollte dabei als industrieller Kernbereich europäisch gedacht und gefördert werden. Dem europäischen Gesundheitsmarkt fehlt derzeit jedoch eine kohärente Innovationslogik – auch weil Kostenträger und andere Akteure sich oftmals nicht als Teil eines gemeinsamen europäischen Innovationsraums begreifen. Perspektivisch könnte eine integrierte, europäische Governance-Struktur, die alle relevanten Akteure – darunter Krankenkassen, Unternehmen und Regulierungsbehörden – adressiert, zu einem Umdenken beitragen.

B11 - Kooperation: Aktive Ansprache und Vernetzung von Biotech-Start-ups durch die Industrie.

Um das volle Innovationspotenzial von Deep-Tech-Medikamenten auszuschöpfen, braucht es eine enge Zusammenarbeit zwischen etablierten Industrieakteuren und forschungsnahen Start-ups. Zwar verfügen viele junge Unternehmen über herausragende wissenschaftliche Ansätze, doch fehlt ihnen oftmals der Zugang zu industriellen Entwicklungsressourcen, regulatorischer Expertise und Kapital für die Skalierung. Gleichzeitig profitieren große Unternehmen von externer Innovationsdynamik, technologischem Pioniergeist und der Flexibilität agiler Teams. Um diese Synergien gezielt zu fördern, sollten politische Rahmenbedingungen geschaffen werden, die den Aufbau von Corporate-Venture-Fonds, gemeinsamen Entwicklungsprogrammen und Mentoring-Initiativen unterstützen. Ergänzend sind Austauschformate erforderlich, in denen Start-ups und etablierte Unternehmen frühzeitig potenzielle Anwendungsfelder, Machbarkeiten und regulatorische Herausforderungen neuer medikamentöser Ansätze gemeinsam evaluieren können. Ziel ist der Aufbau einer systematischen Kooperationskultur entlang der gesamten biotechnologischen Entwicklungskette – von der präklinischen Idee bis zur marktnahen Umsetzung –, wie beispielsweise im Rahmen des „BRIDGES“ Konzepts von Evotec, das Kooperationen zwischen Forschung und Industrie zur gemeinsamen Entwicklung innovativer Medikamente fördert.⁴⁶²

B12 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Regulatorische Vereinfachung zur Pilotierung von „Game-Changer“-Medikamenten und Realisierung von Reallaboren.

Die regulatorische Landschaft in Deutschland ist bislang nicht optimal auf modulare, adaptive oder personalisierte Therapieplattformen ausgerichtet. Durch gezielte nationale Vereinfachungen und angepasste Verfahren lässt sich die Entwicklung und Produktion innovativer Medikamente im industriellen Maßstab besser fördern und absichern. Dabei gilt es zu gewährleisten, dass regulatorische Entlastungen sowohl großen Industrieakteuren als auch kleinen und mittleren Biotechnologieunternehmen zugutekommen. Gerade für wachstumsstarke Start-ups sollten Verfahren nachvollziehbar, zugänglich und ressourcenschonend ausgestaltet sein. Zudem sollten nachgelagerte Prozesse wie Audits und Inspektionen von Herstell- und Studienstätten konsequent mitgedacht und kapazitär mitentwickelt werden. Ein positives Beispiel ist die Ausnahme nach § 4b Arzneimittelgesetz: Sie erlaubt den Einsatz individuell hergestellter GCT in patientenspezialisierten Einrichtungen – auch ohne reguläre Vollzulassung. Dadurch erhalten Entwickler einen niedrigschwelligen regulatorischen Zugang – ein Good-Practice-Ansatz für eine innovationsfreundliche und mittelstandsgeeignete Regulierung.

Die Einführung von „One-Stop“-Strukturen mit zentraler Zuständigkeit und enger Begleitung durch das PEI oder BfArM kann einen wertvollen Beitrag zur regulatorischen Vereinfachung leisten. Bundesländer mit relevanter Verwaltungsexpertise sollten dabei als Expertenstandorte fungieren und regulatorische Standards für spezifische Anwendungsfelder entwickeln, auf die andere Länder zurückgreifen können.

Darüber hinaus ist es wichtig, die Rahmenbedingungen für den Versorgungseintritt neuartiger mRNA-Medikamente und GCT zu verbessern. Dazu zählt unter anderem die Anerkennung besonderer Therapiesituationen im Arzneimittelmarktneuordnungsgesetz (AMNOG)-Verfahren – dieses wirkt als strategischer Standortfaktor: Die Anerkennung besonderer Therapiesituationen sowie die Klarheit und Geschwindigkeit des Prozesses sind entscheidend dafür, ob international tätige Unternehmen und Investoren Deutschland für die Entwicklung und Markteinführung innovativer Medikamente auswählen.

Zudem sollte die Regulatorik die Einrichtung von Experimentierräumen in Form von Reallaboren ermöglichen – etwa für personalisierte onkologische mRNA-Medikamente oder autologe Zellprodukte.

⁴⁶² Evotec (2025).

Mit der Umsetzung dieser Maßnahmen lassen sich Doppelstrukturen vermeiden, der Koordinationsaufwand reduzieren und einheitliche Rahmenbedingungen schaffen, die Unternehmen klare Anreize für die Entwicklung und Pilotierung innovativer Medikamentenansätze in Deutschland bieten.

B13 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Frühzeitige Analyse der potenziellen Versorgungsrealität für Deep-Tech-Medikamente.

Der Markteintritt neuartiger mRNA-Medikamente und GCT stellt hohe Anforderungen an das Gesundheitssystem (z. B. an Logistik, Infrastruktur und Nachsorge), die sich in wichtigen Punkten von klassischen Arzneimitteln unterscheiden. Um Versorgungsbrüche zu vermeiden und eine flächendeckende Anwendbarkeit sicherzustellen, müssen potenzielle Versorgungshürden frühzeitig erkannt und adressiert werden.

Politik und Förderinstitutionen sind gefordert, klare Anreize zu setzen, um Forschungsvorhaben frühzeitig und systematisch mit gesundheitsökonomischen und versorgungspraktischen Aspekten zu verknüpfen. Konkret gilt es, kliniknahe Modellregionen einzurichten und finanziell zu unterstützen, in denen neue Medikamente unter realistischen Versorgungsbedingungen getestet werden können. Zudem ist der Aufbau interdisziplinärer Therapieentscheidungs-Boards an Kliniken erforderlich, damit Patienten bereits in frühen Phasen – etwa First-in-Human-Studien, Einzelfallanträgen und Pre-Zulassungs-Settings – aktiv eingebunden werden und so eine patientenorientierte Versorgungsplanung gelingt.

Forschungseinrichtungen können die methodische Begleitung und Evaluation übernehmen, insbesondere im Hinblick auf Patientenakzeptanz, Entscheidungslogiken und ethische Fragestellungen. Industrieunternehmen sind aufgefordert, kliniknahe Versorgungspfade frühzeitig zu simulieren und regulatorische

Anforderungen proaktiv zu adressieren. Ergänzend ist durch staatlich geförderte Stellen die Schaffung öffentlich zugänglicher, datengestützter Analyseinstrumente notwendig, die klinische Pipeline-Analysen, Prävalenzdaten und Versorgungsbedarfe transparent machen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollten konsequent mit Kliniken, Versorgern und Industrieunternehmen geteilt werden, um Infrastrukturplanung, Schulungsbedarfe und Produktionskapazitäten rechtzeitig und bedarfsgerecht abzustimmen.

B14 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Etablierung einer nationalen Biodatenbank und zugehöriger Zugangsstrukturen, um die Forschung an ATMPs gezielt zu fördern.

Der koordinierte Zugang zu qualitativ hochwertigen, datenschutzkonformen Gesundheits- und Studieninformationen ist eine wesentliche Voraussetzung, um datenbasierte Translation zu ermöglichen, neue Medikamente schneller zu validieren sowie klinische Studien effizient zu planen und durchzuführen. Die Verfügbarkeit entsprechender Datenbanken ist ein wichtiger Anreiz für Biotechnologieunternehmen, ihre Forschung in Ländern anzusiedeln, die solche Strukturen bieten.

Zur Förderung des deutschen Ökosystems für innovative Medikamente sollte der strukturierte Zugang zu klinisch relevanten Daten regulatorisch ermöglicht werden. Deutschland sollte den Aufbau und die Vernetzung nationaler Patienten- und Biodatenbanken daher konsequent vorantreiben und dafür klare rechtliche Rahmenbedingungen sowie standardisierte Schnittstellen für Forschung und Industrie schaffen.



7. Übergreifende Handlungsempfehlungen

Aus den technologiespezifischen Handlungsempfehlungen für KI, (KI-basierte) Robotik, Quantentechnologien sowie mRNA-Medikamente und GCT lassen sich eine Reihe übergreifender Empfehlungen ableiten (vgl. Abb. 37), die allen betrachteten Technologien zugutekommen und das Deep-Tech-Ökosystem in Deutschland insgesamt stärken.

Diese Maßnahmen haben ein besonders hohes Potenzial, die Deep-Tech-Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im europäischen und internationalen Kontext nachhaltig zu stärken. Sie können das Land in die Lage versetzen, technologische Entwicklungen aktiv mitzugestalten und globale Trends zu prägen, anstatt lediglich auf sie zu reagieren. Entsprechend sind die Empfehlungen in diesem Kapitel generalisiert und zusammengefasst dargestellt.

ABBILDUNG 37 | Technologieübergreifende Empfehlungen zur Stärkung des Deep-Tech-Ökosystems in Deutschland

Handlungsfeld		Handlungsempfehlung
Strategie und Zielsetzung		U1 - Rückwärtsplanung von Deep-Tech-Technologie-Roadmaps anhand klar definierter Zielzustände sowie konsequente Umsetzungskontrolle
		U2 - Entwicklung und Umsetzung ressortübergreifender nationaler Strategien für IP und Standardisierung
		U3 – Frühzeitige Besetzung von Schlüsselpositionen in Deep-Tech-Wertschöpfungsketten durch die Industrie
Ökosystem-Infrastruktur		U4 - Praxisnahe und innovationsfreundliche Ausgestaltung der Deep-Tech-Regulierung
		U5 - Ausbau interoperabler Daten- und Produktionsinfrastruktur
		U6 - Stärkung und Neuausrichtung der Deep-Tech-Fördermaßnahmen zur Skalierung von Schlüsseltechnologien
Bildung und Fachkräfte		U7 - Förderung gezielter gesellschaftlicher Aufklärungskampagnen über verschiedene Kommunikationsformate und -plattformen
		U8 - Schaffung gezielter Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten und Anreizsysteme
		U9 - Rekrutierung von (internationalen) Fachkräften
Technologie-transfer und -skalierung		U10 - Übersetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in wirtschaftliche Wirkung durch Spin-offs, IP-Transfer und Anreizsetzung
		U11 - Stärkung von Kooperationen zwischen etablierten Unternehmen, Start-ups, Forschungseinrichtungen und politischen Institutionen
Kooperation		
Innovation, Forschung und Entwicklung		U12 - Zusammenführung von Innovationsstrukturen und regulatorischen Experimentierräumen in leistungsfähige Technologie-Hubs

Quelle: BCG-Analyse

U1 - Strategie und Zielsetzung: Strategische Rückwärtsplanung von Deep-Tech-Technologie-Roadmaps anhand klar definierter Zielzustände sowie konsequente Umsetzungskontrolle.

Zur Stärkung des Deep-Tech-Sektors ist eine verbindliche, ressortübergreifende nationale Positionierung erforderlich, die bis mindestens 2030 reicht und klar messbare strategische Ziele für zentrale Innovationsfelder (z. B. KI, KI-basierte Robotik, Quantentechnologie, Biotechnologie) definiert. Auf Basis dieser Ziele sollten umfassende Technologie-Roadmaps entwickelt werden, die zeitkritische Zielpfade festlegen und den deutschen Innovationsstandort nachhaltig wettbewerbsfähig machen. Diese Roadmaps sollten durch strategische Rückwärtsplanung entstehen: Ausgehend von den angestrebten Ergebnissen werden die dafür benötigten technologischen und wirtschaftlichen Meilensteine identifiziert und mit klaren zeitlichen Vorgaben versehen, die die Entwicklungsschritte der kommenden Jahre definieren.

Bei der Definition strategischer Ziele sind für einzelne Technologien bereits wichtige Schritte getan. Die High-tech Agenda definiert beispielsweise für Quantentechnologien wie Quantencomputing („Im Quantencomputing wollen wir bis zum Jahr 2030 mindestens

zwei fehlerkorrigierte Quantencomputer auf europäischem Spitzenniveau realisieren und diese Nutzern zugänglich machen“) und Quantensensorik („Wir sorgen dafür, dass bis 2030 mithilfe von Quantensensoren Krankheiten frühzeitiger erkannt werden und erschließen mindestens ein weiteres Anwendungsfeld für die Technologie“) klare und messbare Ziele.

Klar definierte und messbare Ziele sind eine zentrale Voraussetzung für die darauf aufbauende Rückwärtsplanung konkreter, fokussierter Zielpfade mit relevanten Meilensteinen sowie deren konsequente Umsetzung und Nachverfolgung. Darüber hinaus sollten die Ziele einen eindeutigen Bezug entweder zur Technologieführerschaft oder zur Anwendung der Technologien herstellen und damit beide relevanten „Rennen“ in den einzelnen Technologiefeldern adressieren – sowohl die Entwicklung der Technologien selbst als auch die Wertschöpfung durch ihren Einsatz (vgl. Kapitel 1). Nur unter dieser Bedingung können die Ziele maßgeblich zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands beitragen.

Zur Umsetzung und regelmäßigen Überprüfung dieser Roadmaps ist eine zentrale Koordinierungsstelle auf Bundesebene erforderlich – etwa angesiedelt beim BMFT. Diese Institution sollte klare politische

Zuständigkeiten bündeln, den Fortschritt aktiv überwachen und bei Bedarf Anpassungen der Strategie an neue technologische oder marktbezogene Entwicklungen ermöglichen. Agile Missionsteams mit Vertretern aus Industrie und Wissenschaft sollten die Umsetzung der Roadmaps eng begleiten und sie regelmäßig evaluieren sowie Empfehlungen zur Anpassung zeitkritischer Zielpfade aussprechen.

Industrie und Verbände übernehmen in diesem Prozess die Rolle aktiver Mitgestalter und Impulsgeber, die durch gezielte Beteiligung an der Entwicklung der strategischen Roadmaps zu Kohärenz und Praxistauglichkeit beitragen. Wissenschaftliche Einrichtungen und Innovationsakteure sind insbesondere als fachliche Inputgeber gefragt, die mit ihrer Expertise und technologischen Einschätzungen zur inhaltlichen Entwicklung der Roadmaps beitragen.

U2 - Strategie und Zielsetzung: Entwicklung und Umsetzung ressortübergreifender nationaler Strategien für IP und Standardisierung.

Der Schutz geistigen Eigentums (IP) sollte bei der strategischen Förderung von Deep-Tech-Technologien von Beginn an mitgedacht und – ebenso wie in der High-tech Agenda der Bundesregierung – fest verankert werden. IP und dessen Schutz bilden das Fundament für Technologieführerschaft, Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschlands und seiner Innovationskraft.

IP schafft rechtliche Rahmenbedingungen für kreative Leistungen und technische Erfindungen und ist damit ein strategisches Gut. Gut ausgestaltete IP-Regelungen stärken nicht nur die Investitionssicherheit, sondern fördern auch den Technologietransfer sowie die Zusammenarbeit von Unternehmen und Wissenschaft (vgl. Handlungsempfehlung U11).

Um im weltweiten Innovationswettbewerb bestehen zu können, sollte – wie bereits im Koalitionsvertrag vereinbart – ressortübergreifend eine umfassende nationale IP-Strategie ausgearbeitet und umgesetzt werden. Maßgebliches Ziel sollte es sein, ein breites gesellschaftliches Verständnis für die Bedeutung von IP-Rechten zu schaffen (IP-IQ) und deren strategische Nutzung zu fördern.

Besonderes Augenmerk sollte auf die Verfügbarkeit und Qualität geeigneter Schutzrechte für Zukunftstechnologien gelegt werden. Leistungsfähige Institutionen auf nationaler und europäischer Ebene sind hierfür essenziell. Neben dem Schutz ist auch die wirtschaftli-

che Verwertung von IP entscheidend – sei es im Technologietransfer oder als Finanzierungsinstrument. Nur wenn IP optimal nutzbar ist, lässt sich Innovationskraft in nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg überführen.⁴⁶³

Die deutsche Industrie hat bereits Eckpunkte einer nationalen IP-Strategie⁴⁶⁴ entwickelt, die im Rahmen eines IP-Masterplans der Bundesregierung als Input dienen sollten.

Ergänzend dazu braucht Deutschland eine nationale Standardisierungsstrategie, um Innovationen nicht nur über IP abzusichern, sondern auch international als Standards zu setzen. Durch eine aktive Rolle in nationalen und internationalen Standardisierungsorganisationen (z. B. DIN, ISO) und deren Fachgremien kann Deutschland seine technologischen Stärken frühzeitig in verbindliche Normen übersetzen und so die Marktdurchdringung von Deep-Tech-Innovationen beschleunigen. Die Politik sollte hierfür geeignete Anreizstrukturen schaffen, die Industrie und Forschung zur aktiven Teilnahme an Normungsprozessen motivieren. Standardisierung wird damit zu einem strategischen Hebel, der IP-Schutz ergänzt und internationale Wettbewerbsfähigkeit dauerhaft sichert.

U3 - Strategie und Zielsetzung: Frühzeitige Besetzung von Schlüsselpositionen in Deep-Tech-Wertschöpfungsketten durch die Industrie.

Deutschland verfügt über eine international einzigartige industrielle Basis mit führender Kompetenz in kritischen Bereichen wie Maschinenbau, Mikroelektronik und Photonik. Europas Wertschöpfungsmodell hat gezeigt, dass Exzellenz in spezialisierten Schlüsseltechnologien internationale Wettbewerbsstärke ermöglicht. Diese Stärken gilt es nun systematisch mit Deep-Tech-Innovationen zu verbinden und gezielt auszubauen. Entscheidend ist, strategische Positionen in global notwendigen Enabler- und Schlüsseltechnologien für Deep-Tech-Gesamtlösungen einzunehmen und damit unverzichtbarer Partner in internationalen Wertschöpfungsketten zu bleiben. Zugleich schafft dies die Möglichkeit, Technologien, Anwendungen und Standards aktiv mitzugestalten. In Verbindung mit ausgewählten Full-Stack- und Plattformlösungen eröffnet dieser Ansatz die Chance, gegenüber den kapitalintensiven Plattform-Ökosystemen und Full-Stack-Strategien anderer Länder nachhaltig wettbewerbsfähig zu sein.

⁴⁶³ BDI-Eckpunkte einer nationalen IP-Strategie, Bibliothek: Publikationen, Stellungnahmen und Positionspapiere | BDI.

⁴⁶⁴ BDI (2024a).

U4 - Ökosystem-Infrastruktur: Praxisnahe und innovationsfreundliche Ausgestaltung der Deep-Tech-Regulierung.

Durch gezielte Anpassung und Straffung der regulatorischen Rahmenbedingungen an den relevanten Stellen lässt sich ein dynamisches und innovationsfreundliches Deep-Tech-Ökosystem fördern. Regulatorische Anforderungen sollten nach dem Prinzip der Proportionalität gestaltet und je nach Kontext – Technologie, Entwicklungs- und Reifephase, Risikoprofil, Unternehmensgröße – differenziert umgesetzt werden.

Start-ups und KMUs würden besonders von vereinfachten oder beschleunigten Verfahren profitieren, die finanzielle und administrative Hürden deutlich senken. Die Einrichtung koordinierter Anlaufstellen (One-Stop-Shops) innerhalb der Behörden- und Förderstruktur könnte hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, da regulatorische Unsicherheiten und langwierige Prozesse reduziert werden. Diese Stellen sollten behördenübergreifend Entscheidungen bündeln und Genehmigungsverfahren vereinfachen.

Darüber hinaus kann eine gezielte Anpassung der Regulatorik vielfältige Impulse setzen – etwa für die Fachkräfteverfügbarkeit und den Umgang mit Daten. Um hochqualifizierte Fachkräfte zu gewinnen, die an Innovationen mit hoher technologischer und wirtschaftlicher Unsicherheit mitwirken, müssen Mitarbeiterbeteiligungen (Employee Stock Option Plans, ESOPs) deutlich attraktiver gestaltet werden. Das Zukunftsfinanzierungsgesetz⁴⁶⁵ stellt hierfür einen wichtigen ersten Schritt dar, dennoch gelten die deutschen Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich weiterhin als standortschwächend, etwa im Vergleich zum Vereinigten Königreich und zu den USA.

Ein weiterer zentraler Hebel zur Innovationsförderung ist die Schaffung eines klaren regulatorischen Rahmens, der den Aufbau und die Nutzung relevanter Datenbanken für die Deep-Tech-Forschung und -Entwicklung ermöglicht. Dafür braucht es sektorübergreifende Leitlinien und eindeutige rechtliche Rahmenbedingungen, die Rechtssicherheit gewährleisten und datengetriebene Innovationen effizient voranbringen. Ein Beispiel ist der Aufbau einer nationalen Biodatenbank, die die Entwicklung von mRNA-Medikamenten und GCT in Deutschland erheblich erleichtern würde.

Auf europäischer Ebene sollte die deutsche Politik aktiv regulatorische Vereinfachungen und Harmonisierung vorantreiben, um förderliche Innovationsstandards europaweit zu sichern und Deutschlands Position im globalen Wettbewerb nachhaltig zu stärken.

Nationale Anpassungen sollten frühzeitig mit europäischen Vorhaben abgestimmt werden, um Inkonsistenzen zu vermeiden, Doppelregulierungen vorzubeugen und sicherzustellen, dass auf nationaler Ebene umgesetzte Vereinfachungen auch auf europäischer Ebene anerkannt werden können.

Sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene sind Industrie und Forschung systematisch und regelmäßig von der Politik in die Gestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen einzubinden – beispielsweise über sektorspezifische Expertenbeiräte, die sicherstellen, dass Regulierungen praxisgerecht, technologisch aktuell und innovationsfördernd sind.

U5 - Ökosystem-Infrastruktur: Ausbau interoperabler Daten- und Produktionsinfrastruktur.

Um den Markteintritt neuer Akteure zu erleichtern, Entwicklungskosten zu senken, Innovationen zu beschleunigen und Kooperationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette deutlich zu erleichtern, sollte die Politik gezielt Maßnahmen und Rahmenbedingungen schaffen, die zur Standardisierung und Interoperabilität zentraler Infrastrukturen sowie weiterer Elemente des Deep-Tech-Ökosystems beitragen. Dazu gehören insbesondere die Entwicklung offener und standardisierter Rahmenwerke und Komponenten, der Ausbau interoperabler Infrastrukturen für Entwicklung, Validierung und Produktion sowie der Aufbau vertrauenswürdiger, gemeinsam nutzbarer Datenökosysteme, die für die Entstehung neuer Innovationen erforderlich sind.

In Bereichen wie dem Datenökosystem, in denen bereits relevante Initiativen und Plattformen existieren, sollte deren Förderung gezielt ausgebaut und an die Anforderungen spezifischer Fachbereiche (z. B. [KI-basierte] Robotik oder Biotech-Medikamentenentwicklung) angepasst werden. Entscheidend ist, jene Ursachen zu analysieren und zu beheben, die die Nutzung und Wertschöpfung dieser Plattformen bislang stark einschränken. Um die Bereitstellung und Nutzung relevanter Daten voranzutreiben, ist die Industrie gefordert, sich aktiv an bestehenden Initiativen zu beteiligen, diese mitzugestalten und sie weiterzuentwickeln. Forschungseinrichtungen leisten dabei einen zentralen Beitrag, indem sie methodische Innovationen und technologische Expertise in die Weiterentwicklung dieser Datenräume einbringen.

Im Bereich der Produktion sollten interoperable Infrastrukturen von allen relevanten Akteuren – einschließlich großer Industrieunternehmen, KMUs und Start-ups – gezielt ausgebaut werden. So lassen sich

⁴⁶⁵ BMF (2023b).

eine engere Verzahnung und einfachere Kooperation entlang der Wertschöpfungskette erreichen, die Synergien schaffen und damit die Innovationskraft sowie die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Deep-Tech-Ökosystems nachhaltig stärken. Konkret könnten große Unternehmen ihre Produktionskapazitäten gezielt für Start-ups öffnen, um Innovationen gemeinsam schneller zu validieren und zu skalieren.

Um Interoperabilität in der Produktion zu ermöglichen, braucht es offene und standardisierte Rahmenwerke sowie gemeinsame Komponenten. Dazu gehören der gezielte Ausbau bestehender, öffentlich geförderter Normungsinfrastrukturen, die finanzielle Unterstützung von Open-Source-Projekten sowie strategische Partnerschaften zwischen Industrie und Forschung zur Erarbeitung einheitlicher Standards. Etablierte Tools, Plattformen und Umgebungen sind konsequent einzubinden und weiterzuentwickeln. Die Politik sollte die (Weiter-)Entwicklung relevanter Rahmenwerke und Komponenten aktiv vorantreiben, während die Industrie diese in Entwicklung und Produktion anwenden und verbreiten muss. Selbst Start-ups sollten von Beginn an auf Interoperabilität und offene Standards setzen, um ihre Integration in bestehende industrielle Wertschöpfungsketten zu erleichtern.

U6 - Ökosystem-Infrastruktur: Stärkung und Neuausrichtung der Deep-Tech-Fördermaßnahmen zur Skalierung von Schlüsseltechnologien.

Die Förderung strategisch relevanter Deep-Tech-Schlüsseltechnologien in der kritischen Skalierungsphase erfordert eine Stärkung und Neuausrichtung der bestehenden Förderinstrumente – dazu gehört eine signifikante Erweiterung bestehender Finanzierungsinstrumente wie des Zukunftsfonds oder des Deutschlandfonds.

Deutlich größere Finanzierungstickets sind erforderlich, um den hohen Kapitalbedarf innovativer Deep-Tech-Unternehmen zu decken und den Rückstand gegenüber Ländern wie den USA zu verringern. Um die Effektivität und Schlagkraft der Fördermaßnahmen zu erhöhen, sollten bestehende Instrumente in weniger, dafür risikotragfähigere Fonds gebündelt werden. Zudem braucht es eine gezielte Neuausrichtung, die große und mutige Einzelförderungen ermöglicht, statt kleinteilige Investitionen über Technologiefelder und Wettbewerber hinweg breit zu verteilen.

Konkret empfiehlt sich der Ausbau des Deep-Tech-Schwerpunkts im Zukunftsfonds – etwa im Rahmen eines potenziellen Zukunftsfonds II –, der großvolumige Investitionen für führende, wachstumsstarke Start-ups und Scale-ups bereitstellt. Perspektivisch sind die Finanzierungsvolumina deutlich anzuheben.

Hohe Volumina je Investment sind notwendig, um der Dynamik und dem Kapitalbedarf von Deep-Tech-Innovationen gerecht zu werden und langfristig die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zu sichern.

Auf europäischer Ebene ist die deutsche Politik gefordert, proaktiv konkrete Vorschläge zur Etablierung großvolumiger, europaweiter Fördervehikel einzubringen. Diese Instrumente können sich an internationalen Best Practices orientieren, sollten jedoch zugleich klar auf die spezifischen Bedürfnisse Europas zugeschnitten sein. Ergänzend sollten bestehende EU-Programme wie der European Defence Fund (EDF) gezielt ausgebaut werden.

Industrie und Forschung sollten in diesem Prozess zentrale Partner sein. Es ist ihre Aufgabe, klare Bedarfsanalysen zu formulieren und Investitionsvolumina zu beziffern, um politische Entscheidungen zu erleichtern und sicherzustellen, dass die Ausgestaltung der Förderinstrumente praxisnah und wirksam erfolgt.

U7 - Bildung und Fachkräfte: Förderung gezielter gesellschaftlicher Aufklärungskampagnen über verschiedene Kommunikationsformate und -plattformen.

Um das Verständnis von und die Akzeptanz für Deep-Tech-Schlüsseltechnologien in der Bevölkerung zu stärken – eine zentrale Voraussetzung für deren künftige breite Nachfrage und Anwendung –, braucht es gezielte, politisch unterstützte Informations- und Aufklärungskampagnen. Im Fokus sollten Technologien stehen, die derzeit besonders erklärungsintensiv sind und mit Informationsdefiziten oder Vorbehalten verbunden werden – etwa KI, personalisierte Medizin oder Quantencomputing.

Es sollten unterschiedliche Medien und Formate eingesetzt werden, um objektiv und verständlich über Chancen, Risiken und gesellschaftliche Implikationen zu informieren und verschiedene Zielgruppen zu erreichen. Die Kampagnen sollten konkrete Anwendungsszenarien und Mehrwerte aufzeigen. Ergänzend sind partizipative Formate wie Bürgerräte und Dialogforen wichtig, um eine offene gesellschaftliche Diskussion zu fördern, Vorbehalte frühzeitig aufzugreifen und Vertrauen aufzubauen. Ziel ist es, nicht nur Ängste, Missverständnisse und Fehlinformationen abzubauen, sondern im Idealfall auch Begeisterung für diese Technologien zu wecken und Interesse an ihrer Entwicklung zu stärken.

Unternehmen und Industrieverbände sind gefordert, die öffentliche Kommunikation aktiv zu unterstützen, indem sie technologische Entwicklungen transparent darstellen und deren Nutzen klar vermitteln. Brancheninitiativen könnten zudem Plattformen schaffen

– etwa regelmäßige Deep-Tech-Gipfel –, auf denen Start-ups, Mittelständler, Großindustrie, Investoren sowie politische Akteure zusammenkommen und neue Entwicklungen verständlich und interaktiv für ein breites Publikum aufbereiten.

Zudem sollten Unternehmen und Verbände die Erfolgsgeschichten deutscher Deep-Tech-Pioniere stärker sichtbar machen, um Vorbilder für junge Talente zu schaffen und das Image des Innovationsstandorts zu stärken. Ebenso wichtig ist eine offene Kommunikation über Risiken und Misserfolge – zur Förderung einer konstruktiven Fehlerkultur, in der Rückschläge als Lernchancen verstanden werden.

Wissenschaftliche Einrichtungen bilden hierbei eine wichtige unabhängige Informationsquelle, indem sie kontinuierlich faktenbasierte Inhalte bereitstellen und so Desinformation wirksam begegnen. Langfristig sollten technologische und ethische Fragestellungen zudem stärker sowohl in schulische als auch in außerschulische Bildungsformate integriert werden.

U8 - Bildung und Fachkräfte: Schaffung gezielter Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten und Anreizsysteme.

Um dem akuten Fachkräftemangel in den Deep-Tech-Bereichen wirksam zu begegnen, muss die Politik gezielte Bildungsformate entlang der gesamten Bildungskette unterstützen. Ziel ist es, sowohl technologische Grundlagen als auch spezialisierte Kompetenzen systematisch zu fördern. Bereits in Schulen sind spezifische Programme einzuführen, die frühzeitig Kompetenzen in Deep-Tech-Schlüsseltechnologien vermitteln und Interesse an diesen Themen wecken.

Darüber hinaus braucht es neue, interdisziplinäre Angebote auf Bachelor-, Master- und Promotionsstufe, die nicht nur einzelne Deep-Tech-Schlüsseltechnologien wie Quantencomputing abdecken, sondern auch relevante Enabler-Technologien sowie weitere synergetische Ansätze integrieren. Ergänzend sind modulare, anwendungsorientierte Weiterbildungsprogramme sowie duale Studien- und Ausbildungsformate erforderlich, die insbesondere Nachwuchskräfte und Quereinsteiger ansprechen.

Die Wissenschaft ist maßgeblich in die inhaltliche Ausgestaltung einzubinden, um ein hohes fachliches Niveau sicherzustellen. Industrieunternehmen wiederum sind gefordert, zur Praxisnähe beizutragen, beispielsweise durch gemeinsame Curricula, Industrieprojekte, Praktika und Mentoring-Programme.

U9 - Bildung und Fachkräfte: Rekrutierung von (internationalen) Fachkräften.

Um den akuten Fachkräftemangel im deutschen Deep-Tech-Sektor wirksam zu adressieren, braucht es neben Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen eine gezielte Rekrutierung internationaler Talente mit Expertise in Schlüsseltechnologien. Ziel ist es, diese Fachkräfte nicht nur kurzfristig zu gewinnen, sondern auch langfristig in Deutschland zu halten.

Dafür sind attraktive Rahmenbedingungen entscheidend: Arbeitsvisa sollten durch Zentralisierung der Verfahren für Visa- und Aufenthaltstitel bei der geplanten Work-and-Stay-Agentur in beschleunigten Verfahren innerhalb weniger Wochen erteilt werden, flankiert von gut strukturierten Willkommens- und Integrationsangeboten an zentralen Innovationsstandorten. Ergänzend können Rückholprogramme für im Ausland tätige deutsche Fachkräfte – etwa durch Stipendien, Umzugspakete oder Dual-Career-Angebote – zusätzliche Potenziale erschließen.

Ein wichtiger Baustein ist dabei die gemeinsame Entwicklung internationaler Anwerbeprogramme durch staatliche Stellen, Branchenverbände und Technologie-Hubs. Diese Programme sollten durch gezielte Rekrutierungskampagnen, Partnerschaften mit renommierten Bildungseinrichtungen im Ausland und bilaterale Talentinitiativen umgesetzt werden.

Die Rekrutierung internationaler Fachkräfte hat den Vorteil, bei effektiver Umsetzung schneller Wirkung zu entfalten als der alleinige Ausbau nationaler Ausbildungsprogramme.

U10 - Technologietransfer und -skalierung: Übersetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in wirtschaftliche Wirkung durch Spin-Offs, IP-Transfer und Anreizsetzung.

Deutschland investiert jährlich Milliarden in exzellente Forschung und zählt unter anderem aufgrund seiner vier großen Wissenschaftsorganisationen – Fraunhofer, Helmholtz, Max-Planck und Leibniz – zu den weltweit führenden Forschungsstandorten. Damit diese wissenschaftliche Stärke auch zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit beiträgt, müssen Forschungsinvestitionen systematisch in wirtschaftliche und gesellschaftliche Wirkung überführt werden – insbesondere im Bereich Deep Tech.

Erforderlich ist dafür ein integrierter Maßnahmenrahmen, der den Technologietransfer konsequent vereinfacht, forschungsnahe Ausgründungen erleichtert und wissenschaftliche Karrierepfade für unternehmerische Aktivitäten öffnet. Nur wenn rechtliche, institutionelle

und individuelle Voraussetzungen gemeinsam adressiert werden, kann aus exzellenter Forschung nachhaltige wirtschaftliche Wertschöpfung entstehen.

Bürokratische Hürden, uneinheitliche IP-Regelungen und langwierige Verhandlungen sind derzeit häufig Hemmnisse für innovative Ausgründungen.

Die Politik sollte diese Hürden gezielt abbauen und klare, praxisnahe Rahmenbedingungen für Wissens- und Technologietransfer schaffen. Zentral ist dabei eine deutliche Vereinfachung und bundesweite Vereinheitlichung der IP-Regelungen für Ausgründungen aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Einheitliche Musterverträge und Leitlinien – etwa nach dem Vorbild der „IP-Transfer 3.0“-Initiative der SPRIND sowie erfolgreicher internationaler Modelle – können Transparenz schaffen, Verhandlungen beschleunigen und Innovationsprozesse deutlich verkürzen.

Darüber hinaus sollten Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen über professionell ausgestattete Transferstellen verfügen, die von Bund und Ländern langfristig finanziert werden. Diese Einrichtungen können Gründungsinteressierte beraten, rechtlich unterstützen und gezielt mit Industrie und Investoren vernetzen.

Ein weiterer Hebel liegt in der gezielten Öffnung wissenschaftlicher Karrierepfade: Neben Publikationen und Drittmitteln sollten künftig auch Spin-offs, Patente und Lizenzen als gleichwertige Erfolgskriterien anerkannt werden. Praktische Unterstützungsmaßnahmen wie Urlaubssemester für Gründer, reduzierte Lehrverpflichtungen in der Gründungsphase oder zentrale Rechtsberatung können zusätzliche Gründungsimpulse setzen.

U11 - Kooperation: Aufbau und Stärkung von Kooperationen zwischen etablierten Unternehmen, Start-ups, Forschungseinrichtungen und politischen Institutionen.

Ein leistungsstarkes und wettbewerbsfähiges Deep-Tech-Ökosystem erfordert eine dynamische Zusammenarbeit innerhalb und zwischen Politik, Wissenschaft und Industrie – einschließlich Großunternehmen, KMUs und Start-ups. Durch koordinierte Partnerschaften lassen sich Synergien heben, Doppelstrukturen vermeiden und Forschungsergebnisse effizient bis zur Marktreife transferieren, validieren und skalieren. Besonders drei Kooperationsformen sind hierfür entscheidend und sollten gezielt gefördert werden.

Industriekooperationen mit Deep-Tech-Start-ups

beschleunigen Innovationsprozesse und reduzieren Entwicklungskosten. Der Grund: Junge Unternehmen verfügen häufig über exzellente wissenschaftliche Ansätze, doch fehlt ihnen meist der Zugang zu industriellen Entwicklungsressourcen, regulatorischem Know-how und Kapital für die Skalierung. Etablierte Unternehmen wiederum profitieren von der Innovationsdynamik, dem technologischen Pioniergeist und der Agilität dieser Start-ups. Strategische Partnerschaften, Corporate-Venturing-Modelle und Co-Creation-Ansätze eröffnen beiden Seiten den Zugang zu neuen Technologien und ermöglichen deren praxisnahe Erprobung sowie Skalierung bis zur Marktreife. Entscheidend ist, dass diese Kooperationen nicht punktuell bleiben, sondern den gesamten Produktentwicklungsprozess kontinuierlich begleiten.

Industriekooperationen mit der Wissenschaft schlagen die Brücke von der Grundlagenforschung zur industriellen Anwendung. Gemeinsame Forschungsprojekte, Netzwerkformate und langfristige PPPs ermöglichen systematischen Wissenstransfer und treiben praxisnahe Deep-Tech-Lösungen voran. Politik und Förderinstitutionen können diese Prozesse entscheidend unterstützen – etwa durch den Aufbau von Technologie-Hubs, gezielte Förderinstrumente, den Abbau administrativer Hürden sowie regulatorische Erleichterungen.

Forschungspartnerschaften innerhalb etablierter Industrieakteure

sind ebenfalls zentral, um Deep-Tech-Technologien schneller in marktrelevante Anwendungen zu überführen. Unternehmen aller Größen sind gefordert, sich aktiv in Konsortien, Innovationsclustern und branchenübergreifenden Projekten zu engagieren, um gemeinsam Anwendungsfelder mit hohem wirtschaftlichem Potenzial zu identifizieren und zu erschließen. Ein interdisziplinärer Ansatz (z. B. die Integration von KI in Quantensysteme, Robotiklösungen oder Medikamentenentwicklung) sollte dabei im Vordergrund stehen. Die Politik kann diesen Prozess durch branchenspezifische Technologie-Hubs oder industrieübergreifende Arbeitsgruppen unterstützen, die Bedarfe systematisch analysieren, Use-Cases priorisieren und technologische Roadmaps koordinieren.

Durch die gezielte Förderung solcher Kooperationsformen werden der Technologietransfer beschleunigt, die industrielle Anschlussfähigkeit gesichert und die internationale Wettbewerbsposition deutscher Unternehmen nachhaltig gestärkt.

U12 - Innovation, Forschung und Entwicklung: Zusammenführung von Innovationsstrukturen und regulatorischen Experimentierräumen in leistungsfähige Technologie-Hubs.

Deutschland verfügt mit über 120 regionalen Clustern über eine breite und engagierte Innovationslandschaft. Diese Vielfalt zeigt den hohen Stellenwert von Forschung und Entwicklung im Land, führt aber auch zu Fragmentierung, Doppelstrukturen und begrenzter Wirkung.

Damit die deutsche Innovationslandschaft ihre volle Wirkung entfalten kann, sollten bestehende Strukturen gezielt gebündelt und zu Technologie-Hubs weiterentwickelt werden. Diese Hubs sollten sich auf prioritäre Zukunftsfelder wie Künstliche Intelligenz, (KI-basierte) Robotik, Quanten- und Biotechnologien konzentrieren und durch Skalen- und Netzwerkeffekte sowie die Bündelung von Kapital jene kritische Masse an Know-how, Talenten und Ressourcen schaffen, die kleinere Cluster allein nicht erreichen können und die für globale Sichtbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit entscheidend ist.

Integrale Bestandteile dieser Hubs sollten praxisnahe Forschungs- und Entwicklungsumgebungen sowie Reallabore sein, in denen neue Technologien frühzeitig erprobt und regulatorische Anforderungen validiert werden können.

Ein weiteres zentrales Element ist die Bereitstellung regulatorischer Beratungsservices, insbesondere zur Unterstützung von Spin-offs in Fragen zu IP- und Technologietransfer. Start-ups sind in kritischen Phasen gezielt zu entlasten, indem ihr Umgang mit regulatorischen Anforderungen so einfach und ressourcenschonend wie möglich gestaltet wird. Solche Beratungsangebote können in den spezialisierten Technologie-Hubs integriert oder als eigenständige zentrale Anlaufstellen eingerichtet werden.

Damit diese Maßnahmen wirken, muss die Bundesregierung gemeinsam mit Industrieakteuren einheitliche und transparente Zugangsregelungen zu der Infrastruktur der Technologie-Hubs für Start-ups, Mittelständler und Großunternehmen etablieren. Industrieunternehmen sind aufgefordert, eigene Ressourcen, Infrastrukturen und technologische Kompetenzen in die Hubs einzubringen. Wissenschaftliche Einrichtungen wiederum sollten ihre Expertise und Forschungskapazitäten stärker auf anwendungsorientierte Fragestellungen ausrichten und so zur praxisnahen Weiterentwicklung neuer Technologien beitragen.

Fazit: Vom starken Industriestandort zum führenden Deep-Tech-Standort

Deutschland steht im globalen Deep-Tech-Wettbewerb vor einer doppelten Herausforderung: bestehende Stärken konsequent auszubauen und strukturelle Defizite rasch zu überwinden. Die vorliegende Studie zeigt, dass die Potenziale immens sind – Deep Tech kann nicht nur neue Märkte erschließen, sondern auch zentrale wirtschaftliche, gesellschaftliche und sicherheitspolitische Fragen beantworten. Zugleich ist klar, dass einzelne Akteure diesen Weg nicht allein gehen können: Politik, Wirtschaft und Wissenschaft müssen gemeinsam handeln, um das Zeitfenster für eine führende Position zu nutzen.

Die Voraussetzungen sind vorhanden: international anerkannte Forschung, eine starke industrielle Basis und solide Kompetenzen in zentralen Enabler-Technologien. Doch es fehlt an Kapital in ausreichender Höhe, an schlanken Transferwegen, an innovationsfreundlicher Regulierung und an einer Kultur, die Mut zu Risiko und Unternehmertum belohnt. Hier setzen die Empfehlungen dieser Studie an. Sie zeigen konkrete Maßnahmen, wie Deutschland seine Rahmenbedingungen stärken, Deep-Tech-Innovationen beschleunigen und die Skalierung in marktfähige Anwendungen sichern kann.

Wenn es gelingt, die vorhandenen Stärken gezielt zu aktivieren und die bestehenden Schwächen zu überwinden, kann Deutschland nicht nur im Wettbewerb mithalten, sondern in strategisch entscheidenden Zukunftsfeldern an die Spitze gelangen. Deep Tech wird damit nicht nur zur wirtschaftlichen Erfolgsgeschichte des nächsten Jahrzehnts, sondern auch zu einem zentralen Baustein technologischer Souveränität und internationaler Gestaltungsfähigkeit.

Jetzt ist der Moment, entschlossen zu handeln. Die kommenden Jahre entscheiden, ob Deutschland zum Gestalter globaler Deep-Tech-Standards wird – oder zum Nachzügler. Der Weg ist anspruchsvoll, die Chance jedoch einzigartig: Mit Mut, klaren Prioritäten und gemeinsamer Anstrengung kann Deutschland den Schritt vom starken Industriestandort zum führenden Deep-Tech-Standort gehen.⁴⁶⁶

⁴⁶⁶ MÜNCHNER KREIS (2024).

Quellen

- [AABB] Association for the Advancement of Blood & Biotherapies (2025). Certified Advanced Biotherapies Professional (CABP) Credential. Erreichbar unter: <https://www.aabb.org/education-career/career/certified-advanced-biotherapies-professional-credential>. [08.07.2025]
- [AA/Fazit] Auswärtiges Amt & Fazit Communication GmbH (2025). Deutschland.de – Your link to Germany. Erreichbar unter: <https://www.deutschland.de/en>. [08.07.2025]
- [Acatech] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2020). acatech HORIZONTE: Quantentechnologie. Erreichbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/acatech-horizonte-quantentechnologie/download-pdf/download-pdf?lang=de>. [08.07.2025]
- Adra-e (2023). Strategic orientation towards an AI, Data, Robotics roadmap 2025 – 2027. Erreichbar unter: <https://adra-e.eu/publications/strategic-orientation-towards-ai-data-robotics-roadmap-2025-2027>. [08.07.2025]
- AI Verify Foundation (2023). AI Verify. Erreichbar unter: AI Verify Foundation - Building Trustworthy AI. [08.07.2025]
- [ATAC] Advanced Therapies Apprenticeship Community (2025). Driving the Future Workforce for Advanced Therapies and Complex Medicines. Erreichbar unter: <https://advancedtherapiesapprenticeships.co.uk/about/>. [08.07.2025]
- Bayer (2022). Die Zeit für Krankheiten zurückdrehen: Induzierte pluripotente Stammzellen. Erreichbar unter: <https://www.bayer.com/de/news-stories/induced-pluripotent-stem-cells>. [08.07.2025]
- [BA-Statistik] Bundesagentur für Arbeit, Statistik/Arbeitsmarktberichterstattung (2024). Berichte: Arbeitsmarkt kompakt – Arbeits- und Fachkräftemangel trotz Arbeitslosigkeit. Nürnberg, März 2024. Erreichbar unter: https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Statischer-Content/Statistiken/Themen-im-Fokus/Fachkraeftebedarf/Generische-Publikationen/Arbeits-und-Fachkraeftemangel-trotz-Arbeitslosigkeit.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2022). The Power of AI in Manufacturing. Erreichbar unter: <https://web-assets.bcg.com/5b/c4/344d85cf4a29892ce7aef8581cea/110-weekly-brief-the-power-of-ai-in-manufacturing.pdf> [18.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2023a). An Investors Guide to Deep Tech. Erreichbar unter: <https://web-assets.bcg.com/a8/e4/d3f2698b436aa0f23aed168cd2ef/bcg-an-investors-guide-to-deep-tech-nov-2023-1.pdf>. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2023b). Die Zukunftsoffensive – Wie Deutschland sein Innovationspotenzial freisetzen kann. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2023/how-germany-can-unleash-its-innovation-potential> [05.09.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2023c). Making Sense of Quantum Sensing. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2023/making-sense-of-quantum-sensing>. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2023d). Quantum Computing Is Becoming Business Ready. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2023/enterprise-grade-quantum-computing-almost-ready>. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2024a). Artificial General Intelligence: Demystifying AI's Next Frontier. Erreichbar unter: <https://media-publications.bcg.com/BCG-Artificial-General-Intelligence-Whitepaper.pdf>. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2024b). From Lab to Leader: Unlocking Europe's €8 Trillion Deep Tech Opportunity. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2024/germany-unlocking-europes-8-trillion-deep-tech-opportunity>. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2024c). Frontier Technologies in Industrial Operations: The Rise of AI Agents. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/about/partner-ecosystem/world-economic-forum/ai-project-survey#frontier-technologies-in-industrial-operations-the-rise-of-ai-agents>. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2024d). How CEOs Can Navigate the New Geopolitics of GenAI. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2024/how-ceos-navigate-new-geopolitics-of-genai>. [08.07.2025]
- [BCG] Boston Consulting Group (2024e). Quantum Computing On Track to Create Up to \$850 Billion of Economic Value By 2040. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/press/18july2024-quantum-computing-create-up-to-850-billion-of-economic-value-2040>. [08.07.2025]

[BCG] Boston Consulting Group (2024f). The AI Maturity Matrix: Which Economies Are Ready for AI?. Erreichbar unter: <https://web-assets.bcg.com/fe/61/6962e74b44328f148c8a9ac1002d/ai-maturity-matrix-nov-2024.pdf>. [08.07.2025]

[BCG/vfa] Boston Consulting Group / Verband Forschender Arzneimittelhersteller (2024). Biotech-Report 2024. Erreichbar unter: <https://www.vfa.de/download/biotech-report-2024.pdf>. [Zugriff am: 02.09.2025]

[BDI] Bundesverband der Deutschen Industrie (2024a). Eckpunkte einer IP-Strategie für Deutschland. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/eckpunkte-einer-ip-strategie-fuer-deutschland>. [20.08.2025]

[BDI] Bundesverband der Deutschen Industrie (2024b). Industrielle Gesundheitswirtschaft als Zukunftsindustrie verankern. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/industrielle-gesundheitswirtschaft-als-zukunftsindustrie-verankern>. [08.07.2025]

[BDI] Bundesverband der Deutschen Industrie (2024c). Mit Risikokapital Innovationen hervorbringen: Zur Weiterentwicklung der Wachstumsfinanzierung in Deutschland. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/artikel/news/mit-risikokapital-innovationen-hervorbringen>. [08.07.2025]

[BDI] Bundesverband der Deutschen Industrie (2024d). Unternehmensumfrage zum Innovationsstandort Deutschland: Abwanderung von Forschung und Entwicklung bedroht Wertschöpfung der Zukunft. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/artikel/news/unternehmensumfrage-zum-innovationsstandort-deutschland-abwanderung-von-forschung-und-entwicklung-bedroht-wertschoepfung-der-zukunft>. [05.08.2025]

[BDI] Bundesverband der Deutschen Industrie (2024e). 5G: Wie sicher werden unsere Netze sein?. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/artikel/news/5g-wie-sicher-werden-unsere-netze-sein>. [08.07.2025]

[BDI, BCG und IW] Bundesverband der Deutschen Industrie, Boston Consulting Group & Institut der deutschen Wirtschaft (2024). Transformationspfade für das Industrieland Deutschland 2024. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/artikel/news/transformationspfade-fuer-das-industrieland-deutschland-studie-langfassung>. [08.07.2025]

[BDI, BCG und IW] Bundesverband der Deutschen Industrie, Boston Consulting Group & Institut der deutschen Wirtschaft (2025). Transformationspfade: In die Zukunft investieren. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/artikel/news/transformationspfade-in-die-zukunft-investieren>. [08.07.2025]

[Berlin Quantum] Berlin Quantum (2025). Berlin Quantum – die gemeinsame Initiative Berliner Wirtschaft, Forschungseinrichtungen und Universitäten zur Förderung von Quantentechnologien. Erreichbar unter: <https://berlin-quantum.de/>. [05.08.2025]

BioNTech (2021). Press release: BioNTech Publishes Data on Novel mRNA Vaccine Approach to Treat Autoimmune Diseases in Science. Erreichbar unter: <https://investors.biontech.de/news-releases/news-release-details/biontech-publishes-data-novel-mrna-vaccine-approach-treat/>. [08.07.2025]

BioNTech (2025a). Therapiefelder. Erreichbar unter: <https://www.biontech.com/de/de/home/research-and-innovation/therapeutic-areas.html>. [08.07.2025]

BioNTech (2025b). Pressemitteilung: BioNTech kündigt strategische Transaktion zur Übernahme von CureVac im Rahmen eines öffentlichen Umtauschangebots an. Erreichbar unter: <https://investors.biontech.de/de/news-releases/news-release-details/biontech-kuendigt-strategische-transaktion-zur-uebernahme-von>. [08.07.2025]

Bitkom (2022). Presseinformation: Jedes achte Großunternehmen plant Einsatz von Quantencomputern. Erreichbar unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Jedes-achte-Grossunternehmen-plant-Quantencomputer-Einsatz>. [08.07.2025]

Bitkom (2023). Presseinformation: Rekord-Fachkräftemangel: In Deutschland sind 149.000 IT-Jobs unbesetzt. Erreichbar unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Rekord-Fachkraeftemangel-Deutschland-IT-Jobs-unbesetzt#:~:text=,Experten>. [08.07.2025]

Bitkom (2024). Presseinformation: Mangel an IT-Fachkräften droht sich dramatisch zu verschärfen. Erreichbar unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mangel-an-IT-Fachkraefte-droht-sich-zu-verschaerfen>. [08.07.2025]

Bitkom Research (2024). Künstliche Intelligenz in Deutschland – Status quo und Ausblick. Erreichbar unter: https://bitkom-research.de/KI-in-deutschland-status-quo?utm_

[BMAS] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2020). Deutschland ist Gründungsmitglied der Global Partnership on Artificial Intelligence (GPAI). Erreichbar unter: <https://www.bmas.de/DE/Service/Presse/Pressemitteilungen/2020/deutschland-ist-gruendungsmitglied-der-global-partnership-on-artificial-intelligence.html> [08.09.2025]

[BMAS] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2023). Kabinett beschließt neues Fachkräfteeinwanderungsgesetz. Erreichbar unter: <https://www.bmas.de/DE/Service/Presse/Pressemitteilungen/2023/kabinett-beschliesst-neues-fachkraefteeinwanderungsgesetz.html>. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018). Nachwuchsprogramm Quantum Future. Erreichbar unter: <https://www.quantentechnologien.de/nachwuchs.html>. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022a). Forschungsprogramm Quantensysteme: Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten. Erreichbar unter: https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publicationen/BMBF-Forschungsprogramm-Quantensysteme_web_bf_C1.pdf. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022b). Projekt QuExplained Quantentechnologien für Schüler_innen Unterrichtsmaterialien und Hackathon. Erreichbar unter: <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-aktiv/quexplained.html>. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022c). Verbundprojekt QuE-MRT Hyperpolarisierte Magnetresonanz-Tomographie zur Krebsdiagnos. Erreichbar unter: https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Projekte/220905_BMBF_QuanTech_Projektumrisse_QuE-MRT-Korr2024-05_C1.pdf. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023a). BMBF-Aktionsplan Künstliche Intelligenz: Neue Herausforderungen chancenorientiert angehen. Erreichbar unter: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/DE/2023/230823-executive-summary-ki-aktionsplan.pdf?__blob=publicationFile&v=1. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023b). Handlungskonzept Quantentechnologien vorgestellt. Erreichbar unter: <https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/04/26042023-Quantentechnologie.html>. [12.08.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023c). Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung. Erreichbar unter: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/DE/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.pdf?__blob=publicationFile&v=4. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2024). Bundesbericht Forschung und Innovation 2024 – Datenband: Daten und Fakten zum deutschen Forschungs- und Innovationssystem 2024. Erreichbar unter: https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Publicationen/DE/1/886132_BUFI_2024_Datenband.pdf?__blob=publicationFile&v=5. [04.09.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2025a). Aktionsplan Robotikforschung. Erreichbar unter: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publicationen/DE/5/846858_Aktionsplan_Robotikforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=7. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2025b). Go-Bio. Erreichbar unter: https://www.go-bio.de/go-bio/de/home/home_node.html. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2025c). Innovation & Strukturwandel. Erreichbar unter: https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/de/home/home_node.html. [07.08.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2025d). KMU-innovativ: Biomedizin-4: Kurative mRNA-Therapie für primäre Ziliendyskinesie (cuRNA-PCD). Erreichbar unter: <https://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/de/kmui-biomedizin-4-kurative-mrna-therapie-fur-primare-ziliendyskinesie-curna-pcd-18280.php>

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2025e). Richtlinie zur Förderung von KMU „KMU-innovativ: Elektronik und autonomes Fahren; High Performance Computing“, Bundesanzeiger. Erreichbar unter: <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2025/05/2025-05-14-bekanntmachung-kmu-innovativ.html>. [08.07.2025]

[BMBF] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2025f). Projektlandkarte: Anwendungsnetzwerk für das Quantencomputing. Erreichbar unter: <https://www.quantentechnologien.de/projektlandkarten/anwendungsnetzwerk-fuer-das-quantencomputing.html>. [08.07.2025]

[BMBF und BIH] Bundesministerium für Bildung und Forschung und Berlin Institute of Health at Charité (2024). Nationale Strategie für gen- und zellbasierte Therapien. Erreichbar unter: https://www.bihealth.org/fileadmin/GZT/NationaleStrategie_GCT_DE.pdf. [08.07.2025]

[BMF] Bundesministerium für Finanzen (2023a). BMF-Schreiben vom 7. Februar 2023 zur Gewährung von Forschungszulage nach dem Gesetz zur steuerlichen Förderung von Forschung und Entwicklung (Forschungszulagengesetz - FZulG). Erreichbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/BMF_Schreiben/Weitere_Steuerthemen/Forschungszulagen/2023-02-07-gewaehrung-von-forschungszulage-nach-dem-gesetz-zur-steuerlichen-foerderung-von-forschung-und-entwicklung.pdf. [08.07.2025]

[BMF] Bundesministerium der Finanzen (2023b). Gesetz zur Finanzierung von zukunftssichernden Investitionen (Zukunftsfinanzierungsgesetz – ZuFinG), BGBl. I Nr. 354 vom 14. Dezember 2023. Erreichbar unter: <https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2023/354/VO.html>. [09.09.2025]

[BMF] Bundesministerium der Finanzen (2025). Zukunftsfond. Erreichbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Internationales_Finanzmarkt/zukunftsfonds.html. [08.07.2025]

[BMFTR] Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (2025a). Hightech Agenda Deutschland. Erreichbar unter: https://www.bmftr.bund.de/DE/Forschung/HightechAgenda/HightechAgenda_node.html [03.09.2025]

[BMFTR] Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (2025b). Innovation & Strukturwandel – Programmübersicht und Förderinitiative „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“. Erreichbar unter: https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/de/home/home_node.html. [05.08.2025]

[BMFTR] Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (2025c). Neues Ministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt. Erreichbar unter: https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/2025/05/neues_ministerium.html. [05.08.2025]

[BMG] Bundesministerium für Gesundheit (2022). Kabinett beschließt Verträge für Impfstoffversorgung im Pandemiefall. Erreichbar unter: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/presse/pressemitteilungen/vertraege-fuer-impfstoffversorgung.html> [31.08.2025]

[BMG] Bundesministerium für Gesundheit (2023). Nationale Pharmastrategie beschlossen. Erreichbar unter: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/presse/pressemitteilungen/nationale-pharmastrategie-beschlossen-pm-13-12-23.html>. [08.07.2025]

[BMJV] Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2024) Gesetz zum Schutz von Embryonen (Embryonenschutzgesetz - ESchG) Erreichbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eschg/_5.htm [30.08.2025]

[BMV] Bundesministerium für Verkehr (2025). Deutsches Zentrum – Mobilität der Zukunft. Erreichbar unter: BMV - Deutsches Zentrum - Mobilität der Zukunft. [08.07.2025]

[BMWE] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019). Das Projekt GAIA-X. Erreichbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/das-projekt-gaia-x-executive-summary.pdf>. [08.07.2025]

[BMWE] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2024). Zukunftsfonds: DeepTech & Climate Fonds investiert in Quantencomputing Start-up planqc. Erreichbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/07/20240708-investition-quantencomputing-start-up-planqc.html>. [08.07.2025]

[BMWE] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2025a). Mehr Mut zum Ausprobieren – den Innovationsstandort Deutschland stärken: Reallabore-Gesetz schafft attraktive Rahmenbedingungen für innovative Unternehmen. Erreichbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2025/20250519-reallabore-gesetz-schafft-attraktive-rahmenbedingungen-fuer-innovative-unternehmen.html>. [08.07.2025]

[BMWE] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2025b). Förderprogramm „Manufacturing-X“. Erreichbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Dossier/manufacturing-x.html>. [08.07.2025]

[BMWK] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024). Zukunftsfonds: DeepTech & Climate Fonds investiert in Quantencomputing Start up planqc. Erreichbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/07/20240708-investition-quantencomputing-start-up-planqc.html> [08.07.2024]

[BSI] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2024). BSI fordert mit Partnern aus 17 EU-Mitgliedsstaaten zum Übergang zur Post-Quanten-Kryptographie auf. Erreichbar unter: https://www.bsi.bund.de/DE/Service-Navi/Presse/Pressemitteilungen/Presse2024/241127_PQC-Joint-Statement.html [31.08.2025]

[BSI] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2025). Quantum Technologies and Quantum-Safe Cryptography. Erreichbar unter: https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Quantentechnologien-und-Post-Quanten-Kryptografie/quantentechnologien-und-post-quanten-kryptografie_node.html. [08.07.2025]

BT Group (2021). BT and Toshiba to build world's first commercial quantum-secured metro network across London. Erreichbar unter: <https://newsroom.bt.com/bt-and-toshiba-to-build-worlds-first-commercial-quantum-secured-metro-network-across-london/>. [08.07.2025]

Bundesregierung (2021). BMBF Strategie „Künstliche Intelligenz“ – Fortschreibung 2020. Bulletin Nr. 53 2 vom 16. April 2021. Erreichbar unter: https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975954/1891526/d4ee171637020c111cd-9b1a217e5ddd4/53-2-bmbf-strategie-ki-data.pdf?download=1&utm_s. [11.08.2025]

Bundesregierung (2023). Das neue Fachkräfteeinwanderungsgesetz auf einen Blick. Erreichbar unter: <https://www.make-it-in-germany.com/de/visum-aufenthalt/fachkraefteeinwanderungsgesetz>. [08.07.2025]

Bundesregierung (2024). Gemeinsame Erklärung über die strategische Partnerschaft zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Singapur 2024. Erreichbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/2196306/2321188/4ddae14c456784c47721157fee7b1656/2024-11-19-gemeinsame-erklaerung-deu-sin-data.pdf?download=1>. [16.07.2025]

Bundesregierung (2025a). Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD: Verantwortung für Deutschland. Erreichbar unter: https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav_2025.pdf. [08.07.2025]

Bundesregierung (2025b). Nationale KI-Strategie der Bundesregierung. Erreichbar unter: <https://www.ki-strategie-deutschland.de/>. [08.07.2025]

Bundeszentrale für politische Bildung (2024). Welt-Bruttoinlandsprodukt. Erreichbar unter: <https://www.bpb.de/kurzknapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52655/welt-bruttoinlandsprodukt/>. [22.07.2025]

Capital (2024). Wirtschaftsministerium plant Crashtests für KI-Roboter. Erreichbar unter: <https://www.capital.de/wirtschaft-politik/ki-wirtschaftsministerium-plant-crashtests-fuer-ki-roboter-34533998.html>. [08.07.2025]

Capvisory (2025). Überregionale Förderprogramme für Tech-Startups: Ein Überblick über Finanzierungsmöglichkeiten des BMWK in Deutschland. Erreichbar unter: <https://capvisory.de/uberregionale-forderprogramme-fur-tech-startups-in-deutschland-bmwk/>. [08.07.2025]

[Catapult] Catapult Medicines Discovery (2025). Cell and Gene Therapy Catapult. Erreichbar unter: <https://md.catapult.org.uk/partners/cell-and-gene-therapy-catapult/>. [08.07.2025]

CEN & CENELEC (2025). Data Act: Standardization Request Officially Accepted by CEN and CENELEC. Erreichbar unter: <https://www.cenelec.eu/news-events/news/2025/brief-news/2025-07-11-data-act-standardization-request/>. [08.09.2025]

China Curated (2017). China's New Generation of Artificial Intelligence Development Plan (State Council Document [2017] No. 35). Erreichbar unter: https://www.chinacurated.com/2017/07/30/chinas-new-generation-of-artificial-intelligence-development-plan-state-council-document-2017-no-35-flia/?utm_s. [08.09.2025]

CIO Dive (2025). Cloud's big 3 continue to rule infrastructure services. Erreichbar unter: <https://www.ciodive.com/news/cloud-infrastructure-services-iaas-growth-aws-microsoft-google/757343/>. [08.09.2025]

Clarivate (2024). BioWorld by Clarivate Explores the Future of CAR T Therapy in Mainland China in Special Report. Erreichbar unter: <https://clarivate.com/news/bioworld-by-clarivate-explores-the-future-of-car-t-therapy-in-mainland-china-in-special-report/>. [22. Juli 2025]

COST (2025) COST | European Cooperation in Science and Technology. Erreichbar unter: <https://www.cost.eu/> [17.07.2025]

Cryptomathic (2025). HQC Selected for PQC Standardization by NIST. Erreichbar unter: <https://www.cryptomathic.com/blog/hqc-chosen-for-nists-post-quantum-cryptography-standardization>. [08.07.2025]

CurATime (2025). Über uns. Erreichbar unter: <https://curatime.org/ueber-uns>. [08.07.2025]

CureVac (2025). Pipeline: Entdecken Sie, wohin die Reise geht. Erreichbar unter: <https://www.curevac.com/pipeline/>. [08.07.2025]

[DARPA] Defense Advanced Research Projects Agency (2025a). DARPA launches Robust Quantum Sensors (RoQS) program to enable resilient field-ready quantum sensing. Erreichbar unter: <https://www.darpa.mil/news/2025/quantum-sensors-defense-platforms>. [12.08.2025]

[DARPA] Defense Advanced Research Projects Agency (2025b). Programs. Erreichbar unter: <https://www.darpa.mil/research/programs>. [08.07.2025]

[DARPA] Defense Advanced Research Projects Agency (2025c). RoQS: Robust Quantum Sensors. Erreichbar unter: <https://www.darpa.mil/research/programs/roqs-robust-quantum-sensors>. [14.07.2025]

[DARPA] Defense Advanced Research Projects Agency (2025d). Taking quantum sensors out of the lab and into defense platforms. Erreichbar unter: <https://www.darpa.mil/news/2025/quantum-sensors-defense-platforms>. [08.07.2025]

Deep Tech Alliance (2025). Joining forces to unleash the full potential of European science-based innovation for global impact. Erreichbar unter: The one-point entry to Europe's leading deep tech ecosystems. [16.07.2025]

Deep Tech Berlin (2025). Deep Tech Award. Erreichbar unter: <https://www.berlin.de/deeptech/>. [08.07.2025]

Defence Science and Technology Laboratory (2019). Quantum Sensing for Defence and Security. Erreichbar unter: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5c1bbd65ed915d73360e2cb4/20181218-Quantum_Col_Announcement_for_publishing-O__2_.pdf. [08.07.2025]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2025a). Erdgas- und Stromdurchschnittspreise. Erreichbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/_inhalt.html. [08.07.2025]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2025b). Bevölkerungsvorausberechnung. Erreichbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html. [08.07.2025]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2025c). The main German export product: motor vehicles Erreichbar unter: <https://www.destatis.de/EN/Themes/Economy/Foreign-Trade/trading-goods.html>. [04.09.2025]

Deutsche Krebsgesellschaft (2021). Fragen und Antworten zur CAR-T-Zell-Therapie. Erreichbar unter: <https://www.krebsgesellschaft.de/onko-internetportal/basis-informationen-krebs/krebsarten/non-hodgkin-lymphome/car-t-zell-therapie-wichtige-fragen-antworten.html>. [08.07.2025]

Deutscher Bundestag (2020). Umsetzung deutsch-französischer KI-Projekte. Erreichbar unter: https://www.bundestag.de/webarchiv/presse/hib/2020_10/802196-802196. [08.09.2025]

Deutscher Bundestag (2023a). Gesundheit – Kleine Anfrage -hib 76/2023: Unterstützung neuer Formen der mRNA-Immuntherapien. Erreichbar unter: <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-932206>. [08.07.2025]

Deutscher Bundestag (2023b). Unterrichtung durch die Bundesregierung: Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung. Erreichbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/066/2006610.pdf#:~:text=Deutschland%20hat%20in%20den%20Quantentechnologien,Diese%20starke>. [22.07.2025]

[Deutschland.de] (2025) Germany as an industrialised country – the main facts. Erreichbar unter: <https://www.deutschland.de/en/topic/business/germanys-industry-the-most-important-facts-and-figures>. [04.09.2025]

Dexory (2024). Trends Explained: The impact of robotics in logistics will result in up to 40% reduction of costs by 2025. Erreichbar unter: <https://www.dexory.com/insights/trends-explained-the-impact-of-robotics-in-logistics-will-result-in-up-to-40-reduction-of-costs-by-2025>. [08.07.2025]

[DFKI] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (2020). CLAIRE receives broad mandate and funding for shaping "AI made in Europe". Erreichbar unter: <https://www.dfki.de/en/web/news/claire-receivesbroadmandate-ai-made-in-europe/>. [08.09.2025]

[DFKI] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (2024). Synergizing sub-symbolic and symbolic AI – hybrid approach for safe and verifiable humanoid robotics. Erreichbar unter: <https://www.dfki.de/en/web/news/synergizing-sub-symbolic-and-symbolic-ai>. [08.09.2025]

[DFKI] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (2025). Spin-offs. Erreichbar unter: <https://www.dfki.de/web/anwendungen-industrie/transfer/spin-offs>. [08.07.2025]

[Digital Strategy AI] Digital Strategy AI (2024). China's AI Strategy into 2025. Erreichbar unter: <https://digitalstrategy.ai.com/2024/09/30/chinas-ai-strategy-into-2025/>. [07.08.2025]

[DIN] Deutsches Institut für Normung (2023). Quantentechnologie: Neue Roadmap hilft Normen auf die Sprünge. Erreichbar unter: <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/quantentechnologie-neue-roadmap-hilft-normen-auf-die-spruenge-907598>. [08.07.2025]

[DIN, DKE] Deutsches Institut für Normung und Deutsche Kommission Elektrotechnik (2022). Deutsche Normungsroadmap Künstliche Intelligenz (Ausgabe 2). Erreichbar unter: www.din.de/go/normungsroadmapki. [08.07.2025]

[DLR] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2025a). QYRO - A Quantum-Based Gyroscope. Erreichbar unter: <https://www.dlr.de/en/gk/research-transfer/projects-missions/qyro>. [08.07.2025]

[DLR] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Institut für Kommunikation und Navigation (2025b). QuNET - abhörsichere, quantenbasierte Kommunikationsnetzwerke. Erreichbar unter: <https://www.dlr.de/de/kn/forschung-transfer/projekte/qkd-quantentechnologien/qunet-satellitenbasierte-quantentechnologie-fuer-sichere-kommunikation>. [08.07.2025]

[DLR] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2025c). Quantencomputing-Initiative. Erreichbar unter: <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/digitalisierung/quantencomputing-initiative>.

[EC] European Commission (2021a). France AI Strategy Report. Erreichbar unter: France AI Strategy Report - European Commission. [08.07.2025]

[EC] European Commission (2021b). State aid: Commission approves €2.9 billion public support by twelve Member States for a second pan-European research and innovation project along the entire battery value chain. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip_21_226/IP_21_226_EN.pdf. [08.07.2025]

[EC] European Commission (2021c). European consortium for communicating gene- and cell-based therapy information (EuroGCT). CORDIS EU-Forschungsergebnisse. Erreichbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/965241>. [15.08.2025]

[EC] European Commission (2021d). EU-Israel Association Agreement (Horizon Europe Participation). Erreichbar unter: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-research-and-innovation/europe-world/international-cooperation/association-horizon-europe/israel_en [08.09.2025]

[EC] European Commission (2021e). EU-US Trade and Technology Council. Erreichbar unter: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/stronger-europe-world/eu-us-trade-and-technology-council_en [08.09.2025]

[EC] European Commission (2022). The New European Innovation Agenda. Erreichbar unter: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/support-policy-making/shaping-eu-research-and-innovation-policy/new-european-innovation-agenda_en. [08.07.2025]

[EC] European Commission (2023a). AI Watch: France AI strategy report – networking in AI research. Erreichbar unter: https://ai-watch.ec.europa.eu/countries/france/france-ai-strategy-report_en [08.09.2025]

[EC] European Commission (2023b). Memorandum of Cooperation with Japan on Semiconductors, HPC, Quantum and Artificial Intelligence. Erreichbar unter: <https://www.eu-japan.eu/news/eu-and-japan-advance-joint-work-digital-identity-semiconductors-artificial-intelligence> [08.09.2025]

[EC] European Commission (2023c). State aid: Commission approves up to €8.1 billion of public support by fourteen Member States for an Important Project of Common European Interest in microelectronics and communication technologies. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip_23_3087/IP_23_3087_EN.pdf. [08.07.2025]

[EC] European Commission (2023/24). Reform of the EU pharmaceutical legislation – modernising legal framework governing medicinal products for human use. Erreichbar unter: https://health.ec.europa.eu/medicinal-products/legal-framework-governing-medicinal-products-human-use-eu/reform-eu-pharmaceutical-legislation_en. [05.08.2025]

[EC] European Commission (2024a). Approved IPCEI Med4Cure. Erreichbar unter: https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis/health_en. [08.07.2025]

[EC] European Commission (2024b). Developing standards and interoperability: a call for a stronger European digital standardisation strategy. Erreichbar unter: https://commission.europa.eu/content/developing-standards-and-interoperability_en. [05.08.2025]

[EC] European Commission (2024c). New Horizon Europe Funding Boosts European Research in AI and Quantum Technologies. Erreichbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/new-horizon-europe-funding-boosts-european-research-ai-and-quantum-technologies> [08.09.2025]

[EC] European Commission (2024d). Sectoral Digital Skills Academies – Quantum Skills Digital Academy. Erreichbar unter: https://pact-for-skills.ec.europa.eu/stakeholders-and-business/funding-opportunities/sectoral-digital-skills-academies-quantum-skills-digital-academy_en [08.09.2025]

[EC] European Commission (2025a). Approved IPCEIs in the Health value chain. Erreichbar unter: https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis/health_en. [28.08.2025]

[EC] European Commission (2025b). European Chips Act. Erreichbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act>. [08.07.2025]

[EC] European Commission (2025c). European Quantum Communication Infrastructure - EuroQCI. Erreichbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>. [08.07.2025]

[EC] European Commission (2025d). Quantum-Europa-Strategie. Erreichbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/library/quantum-europe-strategy>. [14.07.2025]

[EC] European Commission (2025e). Roadmap to fully end EU dependency on Russian energy. Erreichbar unter: https://commission.europa.eu/news-and-media/news/roadmap-fully-end-eu-dependency-russian-energy-2025-05-06_en [08.09.2025]

[ECFR] European Council on Foreign Relations, Herman Quarles van Ufford. (2024). From niche innovations to global powerhouse: An EU quantum strategy. Erreichbar unter: <https://ecfr.eu/article/from-niche-innovations-to-global-powerhouse-an-eu-quantum-strategy/>. [08.07.2025]

[EIB] European Investment Bank Group (2025). TechEU – EU's largest ever financing programme to support Europe's innovators from idea to IPO. Erreichbar unter: <https://www.eib.org/en/projects/topics/innovation-digital-and-human-capital/techeu/index>. [05.08.2025]

[EIC] European Innovation Council (2025a). About the European Innovation Council. Erreichbar unter: https://eic.ec.europa.eu/about-european-innovation-council_en. [08.07.2025]

[EIC] European Innovation Council (2025b). EIC Transition. Erreichbar unter: https://eic.ec.europa.eu/eic-funding-opportunities/eic-transition_en. [08.07.2025]

[EIT] European Institute of Innovation & Technology (2025). About our communities. Erreichbar unter: <https://www.eit.europa.eu/global-challenges/about-our-communities>. [08.07.2025]

Eleqtron (2025). We are Eleqtron. Erreichbar unter: <https://eleqtron.com/en/company/>. [08.07.2025]

ELLIS (o. J.). ELLIS – European Laboratory for Learning and Intelligent Systems. Erreichbar unter: <https://ellis.eu/>. [08.09.2025]

[EMA] European Medicines Agency (2024). EPAR – mResvia. Erreichbar unter: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/mresvia>. [02.09.2025]

[EMA] European Medicines Agency (2025a). Guideline on the quality aspects of mRNA vaccines. Erreichbar unter: https://www.ema.europa.eu/en/documents/scientific-guideline/draft-guideline-quality-aspects-mrna-vaccines_en.pdf. [08.07.2025]

[EMA] European Medicines Agency (2025b). Advanced therapy medicinal products: Overview. Erreichbar unter: <https://www.ema.europa.eu/en/human-regulatory-overview/advanced-therapy-medicinal-products-overview>. [08.07.2025]

Ensun (2025). Top Quantum Computing Companies in Germany. Erreichbar unter: <https://ensun.io/search/quantum-computing/germany>. [08.07.2025]

[EPRS] European Parliamentary Research Service (2021). China's ambitions in artificial intelligence. Erreichbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2021/696206/EPRS_ATA\(2021\)696206_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2021/696206/EPRS_ATA(2021)696206_EN.pdf). [16.07.2025]

[ESA] European Space Agency (2025). ESA and European Commission partner to develop secure quantum communication infrastructure. Erreichbar unter: <https://connectivity.esa.int/news/esa-and-european-commission-partner-develop-secure-quantum-communication-infrastructure>. [08.07.2025]

[ESA EAGLE-1] European Space Agency (2025). EAGLE-1: Europe's first space-based quantum key distribution system – advancing Europe's leadership in quantum communications. Erreichbar unter: https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Eagle-1. [05.08.2025]

[ETHRIS] Ethris GmbH (2025). ETH47 Phase 2a First Patient Dosing. Erreichbar unter: <https://www.ethris.com/news/eth47-phase-2a-first-patient-dosing/>.

EuRobotics (2024). A Unified Vision for European Robotics. Erreichbar unter: <https://eu-robotics.net/strategy/>. [08.07.2025]

[EuroHPC JU] European High Performance Computing Joint Undertaking (2023). Procurement contract for JUPITER, the first European exascale supercomputer, is signed. Erreichbar unter: https://eurohpc-ju.europa.eu/procurement-contract-jupiter-first-european-exascale-supercomputer-signed-2023-10-03_en. [08.07.2025]

[EuroHPC JU] European High Performance Computing Joint Undertaking (2024). Boosting Europe's Quantum Computing Infrastructure. Erreichbar unter: https://eurohpc-ju.europa.eu/boosting-europes-quantum-computing-infrastructure-2024-12-02_en. [08.07.2025]

[Euronews] Kroet, Cynthia. (2024). Commission plans robotics strategy early 2025. Erreichbar unter: <https://www.euronews.com/next/2024/01/22/commission-plans-robotics-strategy-early-2025>. [08.07.2025]

European Pharmaceutical Review (2025). BioNTech pledges major UK investment. Erreichbar unter: <https://www.europeanpharmaceuticalreview.com/news/256462/biontech-pledges-major-uk-investment/>. [03.09.2025]

[Evotec] Evotec SE (2025). Academic BRIDGES: Integriertes Fund- und Award-Rahmenwerk zur Beschleunigung der Translation von akademischer Forschung in pharmazeutische Wirkstoffentwicklung. Erreichbar unter: <https://www.evotec.com/company/our-partners/evotec-ventures/academic-bridges>. [05.09.2025]

[Factory-X] BMWK / Plattform Industrie 4.0 / Fraunhofer (o. J.). Factory-X – Die Datenökonomie der Zukunft gestalten. Erreichbar unter: <https://factory-x.org/de/>. [07.08.2025]

[Factory-X] Factory-X (2024). Factory-X – ein offenes, souveränes Datenökosystem für Maschinen- und Anlagenbau (Leuchtturmprojekt Manufacturing-X, gefördert durch BMWK). Erreichbar unter: <https://factory-x.org/de/>. [05.08.2025]

[FAU] Friedrich Alexander Universität (2024). Weltweit erste CAR-T-Zell-Therapie bei einem Kind mit Lupus. Erreichbar unter: <https://www.med.fau.de/2024/07/03/weltweit-erste-car-t-zell-therapie-bei-einem-kind-mit-lupus/>. [22.07.2025]

[FAZ] Frankfurter Allgemeine Zeitung; Köcher, R. (2023). Diffuse Ängste. Erreichbar unter: https://www.ifd-allensbach.de/fileadmin/kurzberichte_dokumentationen/FAZ_Juli2023_KuenstlicheIntelligenz.pdf. [08.07.2025]

[FDA] U.S. Food and Drug Administration (2020). 21st Century Cures Act. Erreichbar unter: <https://www.fda.gov/regulatory-information/selected-amendments-fdc-act/21st-century-cures-act>. [08.07.2025]

[FDA] U.S. Food and Drug Administration (2023a). Fast Track, Breakthrough Therapy, Accelerated Approval, Priority Review. Erreichbar unter: <https://www.fda.gov/patients/learn-about-drug-and-device-approvals/fast-track-breakthrough-therapy-accelerated-approval-priority-review>. [08.07.2025]

[FDA] U.S. Food and Drug Administration (2023b). Regenerative Medicine Advanced Therapy Designation. Erreichbar unter: <https://www.fda.gov/vaccines-blood-biologics/cellular-gene-therapy-products/regenerative-medicine-advanced-therapy-designation>. [08.07.2025]

FINSMES (2024). Figure Raises \$675M in Series B; at \$2.6B Valuation. Erreichbar unter: <https://www.finsmes.com/2024/02/figure-raises-675m-in-series-b-at-2-6b-valuation.html>. [08.07.2025]

Fischer, C., Haspl, T., Rathmair, M., & Schlund, S. (2023). Sichere roboterbasierte Produktion: Trends und Revisionen in Europäischen Normen und Richtlinien. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 140(6), 551–561. Erreichbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00502-023-01155-z>. [08.07.2025]

[FLI] Future of Life Institute (2025). EU AI Act, Article 57: AI Regulatory Sandboxes. Erreichbar unter: <https://artificialintelligenceact.eu/article/57/>. [08.07.2025]

Forbes (2025). Meta invests \$14 billion in Scale AI to strengthen model training. Erreichbar unter: <https://www.forbes.com/sites/janakirammsv/2025/06/23/meta-invests-14-billion-in-scale-ai-to-strengthen-model-training/>. [08.09.2025]

Forschungszentrum Jülich (2025). HPC-Technologie und modulare Architektur für exascale Supercomputer. Erreichbar unter: <https://www.fz-juelich.de/en/research/research-fields/information/supercomputing>. [08.09.2025]

[Fraunhofer] Wulf, J., et al. (2024). Vertrauenswürdige KI und verwandte Konzepte verstehen und anwenden. Erreichbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/00535c9b-c608-4078-a662-97cc6214b9c2>. [08.07.2025]

- Fraunhofer (2025a). Quantencomputing. Erreichbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/artikel-2025/quantenforschung/quantencomputing.html>. [08.07.2025]
- Fraunhofer (2025b). Quantenkommunikation. Erreichbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/artikel-2025/quantenforschung/quantenkommunikation.html>. [08.07.2025]
- Fraunhofer (2025c). Quantensensorik und -bildgebung. Erreichbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/artikel-2025/quantenforschung/quantensensorik-und-bildgebung.html>. [08.07.2025]
- [Fraunhofer IAF] (2025). Erster Quantenbeschleuniger seiner Art in Europa ist einsatzbereit. Erreichbar unter: <https://www.iaf.fraunhofer.de/de/medien/pressemitteilungen/erster-quantenbeschleuniger-in-europa.html>. [08.07.2025]
- [Fraunhofer IGD] Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (2025). Zentrum für Angewandtes Quantencomputing (ZAQC). Erreichbar unter: <https://www.igd.fraunhofer.de/de/forschung/kernkompetenzen/angewandtes-quantencomputing.html>. [08.07.2025]
- [Fraunhofer IOF] Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (2022). Quantenschlüssel erfolgreich ausgetauscht – Faserstrecke über 75 km ermöglicht neue QKD-Experimente. Erreichbar unter: <https://www.iof.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2022/quantenschluessel-erfolgreich-ausgetauscht.html>. [05.08.2025]
- [Fraunhofer IPA] (2025). Fraunhofer IPA: Humanoide Roboter - Gamechanger oder Irrweg?. Erreichbar unter: <https://www.smart-production.de/digital-factory-journal/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/fraunhofer-ipa-humanoide-roboter-gamechanger-oder-irrweg>. [08.07.2025]
- [Fraunhofer IPA] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2021). Mass production of fuel cells becomes a reality. Erreichbar unter: https://www.ipa.fraunhofer.de/en/press-media/press_releases/mass-production-of-fuel-cell-becomes-a-reality.html. [11.08.2025]
- [Fraunhofer IPMS] (2022). Pressemitteilung: Intelligente Sensorlösungen für die Industrie 4.0. Erreichbar unter: <https://www.ipms.fraunhofer.de/de/press-media/press/2022/Intelligent-sensor-solutions-for-Industry.html>. [08.07.2025]
- [Fraunhofer ISI] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2025). TRANSENTIVE – Akteursorientierte Transferanreize in Forschungseinrichtungen. Erreichbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/regionale-transformation-innovationspolitik/projekte/transentive.html>. [29.07.2025]
- [Fraunhofer ISI] (2025). ELSA Forschung. Erreichbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/themen/technikfolgenabschaetzung/elsa-elsi-forschung.html>. [08.07.2025]
- Georgetown University (2023). The Global Distribution of STEM Graduates. Erreichbar unter: <https://cset.georgetown.edu/article/the-global-distribution-of-stem-graduates-which-countries-lead-the-way/>. [10.09.2025]
- [GI] Gesellschaft für Informatik (2025). Reise in die Quantenzeit. Erreichbar unter: <https://gi.de/turing-bus/>. [08.07.2025]
- Gilead (2018). Yescarta (Axicabtagene Ciloleucel) Receives European Marketing Authorization for the Treatment of Relapsed or Refractory DLBCL and PMBCL, After Two or More Lines of Systemic Therapy. Erreichbar unter: https://www.gilead.com/news/news-details/2018/yescarta-axicabtagene-ciloleucel-receives-european-marketing-authorization-for-the-treatment-of-relapsed-or-refractory-dlbcl-and-pmbcl-after-two-or-more-lines-of-systemic-therapy?utm_. [08.07.2025]
- Google (2024). AlphaQubit tackles one of quantum computing's biggest challenges Erreichbar unter: <https://blog.google/technology/google-deepmind/alphaqubit-quantum-error-correction/>. [09.09.2025]
- Google Quantum AI (2025). Cirq – Python-Framework für Quantenprogramme. Erreichbar unter: <https://quantumai.google/cirq> [09.09.2025]
- GovData (2025). Das Datenportal für Deutschland: Open Government: Verwaltungsdaten transparent, offen und frei nutzbar. Erreichbar unter: <https://www.govdata.de/>. [08.07.2025]
- Government of Canada (2025). Hire a top foreign talent through the Global Talent Stream. Erreichbar unter: <https://www.canada.ca/en/employment-social-development/services/foreign-workers/global-talent.html>. [08.07.2025]
- [GSMA] Global System for Mobile Communications Association (2025). Post Quantum Government Initiatives by Country and Region. Erreichbar unter: <https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads//Post-Quantum-Government-Initiatives-by-Country-and-Region-02-Mar-2025.pdf>. [08.07.2025]

G7/Japan (2023). Hiroshima AI Process. Erreichbar unter: https://www.japan.go.jp/kizuna/2024/02/hiroshima_ai_process.html. [08.09.2025]

Harvard Gazette (2025). Harvard seeks restoration of research funds. Erreichbar unter: <https://news.harvard.edu/gazette/story/2025/07/harvard-seeks-restoration-of-research-funds/>. [05.08.2025]

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf / Silicon Saxony (2024–25). Our path to brain-inspired computing. Erreichbar unter: <https://silicon-saxony.de/en/hzdr-our-path-to-brain-inspired-computing/>. [08.09.2025]

[HIRI] Helmholtz Institute for RNA-based Infection Research (2025). Graduate Program RNAmEd – Future Leaders in RNA-based Medicine. Erreichbar unter: <https://www.helmholtz-hiri.de/en/jobs-talents/rnamed/>. [29.08.2025]

Homburg1 (2022). Zukunftsrat des Bundeskanzlers diskutiert Impulse für den Innovationsstandort Deutschland. Erreichbar unter: <https://homburg1.de/zukunftsrat-des-bundeskanzlers-diskutiert-impulse-fuer-den-innovationsstandort-deutschland-154481/>. [08.07.2025]

Horizon Europe (2025). Horizon Europe. Erreichbar unter: <https://horizoneurope.ie/#>. [08.07.2025]

[HowToRobot] Lundström, Elias (2023). Global ‘robotics race’ intensifies with proposal for German robotics strategy. Erreichbar unter: <https://howtorobot.com/expert-insight/global-robotics-race-intensifies-proposal-german-robotics-strategy>. [08.07.2025]

HQS Quantum Simulations (2025). Materials science applications for quantum computing on the QuCUN platform - HQS receives an order from BASF. Erreichbar unter: <https://quantumsimulations.de/news/materials-science-applications-for-quantum-computing-on-the-qucun-platform-hqs-receives-an-order-from-basf>. [08.07.2025]

Humboldt Stiftung (2025). Die Preisträger*innen der Humboldt-Professur. Erreichbar unter: <https://www.humboldt-foundation.de/entdecken/newsroom/dossier-alexander-von-humboldt-professur/alle-humboldt-professuren>. [08.07.2025]

[HPCQS] HPCQS – High Performance Computer and Quantum Simulator hybrid (2021–2025). Federated European hybrid HPC-QS infrastructure integrating ≥ 100 -qubit quantum simulators with Tier-0 supercomputers. Erreichbar unter: <https://hpcqs.eu/>. [05.08.2025]

[IBM Newsroom] Wendt, W. (2024). Mit Bundeskanzler Olaf Scholz: Erstes IBM Quantum Data Center in Europa eröffnet. Erreichbar unter: <https://de.newsroom.ibm.com/quantum-datacenter>. [08.07.2025]

IBM (2025). Qiskit – Open-Source SDK für Quanten-Workloads. Erreichbar unter: <https://www.ibm.com/quantum/qiskit>. [09.09.2025]

[IFR] International Federation of Robotics (2023). World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas. Erreichbar unter: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>. [08.07.2025]

[IFR] International Federation of Robotics (2024a). Global Robot Density in Factories Doubled in Seven Years. Erreichbar unter: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-density-in-factories-doubled-in-seven-years>. [09.09.2025]

[IFR] International Federation of Robotics (2024b). Record 4 Million Robots Operating in Factories Worldwide. World Robotics 2024 Report – Global Market. Erreichbar unter: https://ifr.org/downloads/press2018/2024-SEP-24_IFR_press_release_World_Robotics_2024_-_global_market.pdf. [09.09.2025]

[IFR] International Federation of Robotics (2025). China to invest 1 trillion yuan in robotics and high-tech industries. Erreichbar unter: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/china-to-invest-1-trillion-yuan-in-robotics-and-high-tech-industries>. [04.09.2025]

[IMDA] Infocomm Media Development Authority (2025). National Quantum Safe Network Plus. Erreichbar unter: <https://www.imda.gov.sg/about-imda/emerging-technologies-and-research/national-quantum-safe-network-plus>. [08.07.2025]

[IMF] International Monetary Fund (2025). AI Preparedness Index (APII). Erreichbar unter: <https://www.imf.org/external/datamapper/datasets/APII>. [08.07.2025]

[India Today] Tripathi, S. K. (2025). China makes big quantum satellite breakthrough with South Africa. Erreichbar unter: <https://www.indiatoday.in/science/story/china-makes-big-quantum-satellite-breakthrough-with-south-africa-2696274-2025-03-20>. [08.07.2025]

INSIDE Industry Association (2025). Securing the AI chips supply and value network. Erreichbar unter: <https://inside-association.eu/2025/03/28/securing-the-ai-chips-supply-and-value-network/> [08.09.2025]

Investing.com (2025). Tesla targets mass production of humanoid robots Optimus in 2025. Erreichbar unter: <https://www.investing.com/news/stock-market-news/tesla-targets-mass-production-of-humanoid-robots-optimus-in-2025-3805300>. [08.07.2025]

IonQ (2025) IonQ Demonstrates Quantum-Enhanced Applications Advancing AI. Erreichbar unter: https://investors.ionq.com/news/news-details/2025/IonQ-Demonstrates-Quantum-Enhanced-Applications-Advancing-AI/default.aspx?utm_. [08.07.2025]

[IQM] IQM Quantum Computers (2025). State of Quantum, third edition. Erreichbar unter: <https://meetiqm.com/wp-content/uploads/2025/06/IQM-State-of-Quantum-2025.pdf>. [14.07.2025]

ISAR Bioscience (o. J.). Forschungsnetzwerk Mittelstand fördert die Entwicklung neuer Therapien gegen Autoimmunerkrankungen. Erreichbar unter: <https://www.isarbioscience.de/forschungsnetzwerk-mittelstand-foerdert-die-entwicklung-neuer-therapien-gegen-autoimmunerkrankungen/>. [08.09.2025]

IT Production (2024). Aufklärung soll Roboter-Akzeptanz erhöhen. Erreichbar unter: <https://it-production.com/news/umfrage-zur-robotik-in-der-gesellschaft/>. [08.07.2025]

[IW] Institut der Deutschen Wirtschaft (2024). Wir stehen vor einem Verknappungsproblem. Erreichbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html. [08.07.2025]

[I40-Magazin] Industrial Management News Industrie 4.0 & IoT (2021). QUTAC: Konsortium für Quantencomputing gegründet. Erreichbar unter: <https://i40-magazin.de/allgemein/konsortium-fuer-quantencomputing-gegruendet-2/>. [08.07.2025]

[KAS] Konrad-Adenauer-Stiftung (2025). Quantentechnologie und Deutschlands Sicherheitspolitik: Eine geopolitische Notwendigkeit. Erreichbar unter: <https://www.kas.de/documents/252038/33607021/Quantentechnologie%20und%20Deutschlands%20Sicherheitspolitik.pdf/>. [08.07.2025]

[KfW] KfW Bankengruppe (2024). Zukunftsfonds – Statusbericht 2024 (Stand: 31.12.2023). Erreichbar unter: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/Zukunftsfonds-Statusbericht-2024.pdf>. [05.08.2025]

[KIRR REAL] Reallabor für rechtskonforme KI und Robotik (2025). Kurzbeschreibung KIRR REAL. Erreichbar unter: <https://www.kirr-real.de/?utm>. [08.07.2025]

[KIT ITAS] Nora, W., et al. (2025). Reallabor „Robotische Künstliche Intelligenz“. Erreichbar unter: https://www.itas.kit.edu/projekte_nier21_robotki.php. [08.07.2025]

[KmR] Konsortium mRNA (2025). Offizielle Website. Erreichbar unter: <https://konsortium-mrna.de>. [17.07.2025]

Kooperation International (2024). Quantentechnologie: Deutschland und die USA unterzeichnen gemeinsame Erklärung. Erreichbar unter: <https://www.kooperation-international.de/aktuelles/nachrichten/detail/info/quantentechnologie-deutschland-und-die-usa-unterzeichnen-gemeinsame-erklaerung>. [08.07.2025]

[KoreaTechToday] Park, M. (2023). Quantum Security Arrives in South Korea Thanks to SK Broadband. Erreichbar unter: <https://koreatechtoday.com/quantum-security-arrives-in-south-korea-thanks-to-sk-broadband/>. [08.07.2025]

Krenz, A., Prettnner, K., Strulik, H. (2021). Robots, reshoring, and the lot of low-skilled workers. Erreichbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014292121000970>. [08.07.2025]

[Lakestar] Jacobs, S., Leitner, L., Franzeskides, C. (2023). The 2023 European European Deep Tech Report. Erreichbar unter: <https://lakestar.com/news/the-2023-european-deep-tech-report>. [08.07.2025]

Lakestar (2025). The 2025 European European Deep Tech Report. Erreichbar unter: <https://lakestar.com/news/2025-european-deeptech-report>. [08.07.2025]

Leibniz-Rechenzentrum (2025). Nationale Rolle im Gauss Centre for Supercomputing (GCS). Erreichbar unter: <https://www.gauss-centre.eu/about-us/our-centres/leibniz-supercomputing-centre>. [08.09.2025]

[Lernende Systeme] Plattform Lernende Systeme (2025). Gesellschaftlicher Dialog. Erreichbar unter: <https://www.plattform-lernende-systeme.de/dialog.html>. [11.08.2025]

[Logistik Heute] Meitinger, T. (2024). Studie: Deutschland hat auch in Sachen KI Fachkräftemangel. Erreichbar unter: <https://logistik-heute.de/news/studie-deutschland-hat-auch-sachen-ki-fachkraeftemangel-188562.html>. [08.07.2025]

Lupus Foundation of America (2024). CAR-T Cell Therapy Shows Promising Results for People with Lupus and Other Autoimmune Diseases. Erreichbar unter: <https://www.lupus.org/news/cart-cell-therapy-shows-promising-results-for-people-with-lupus-and-other-autoimmune-diseases>. [08.07.2025]

Manager Magazin (2025). Nvidia-Chef kündigt KI-Cloud für Industrie in Deutschland an. Erreichbar unter: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/tech/nvidia-ki-cloud-fuer-deutsche-industrie-angekuendigt-a-015de699-4862-4346-914f-7f1e08ed3635>. [08.07.2025]

MacroPolo (2024). The Global AI Talent Tracker 2.0 – Mapping top AI talent and institutions. Erreichbar unter: <https://archivemacropolo.org/interactive/digital-projects/the-global-ai-talent-tracker/>. [08.09.2025]

[Maven] U.S. Department of Defense (2025). Pentagon erhöht Budget für Palantir Maven Smart System auf fast 1,3 Milliarden USD. Erreichbar unter: <https://insidedefense.com/insider/pentagon-surges-palantir-maven-smart-system-contract-spending-more-1b>. [11.08.2025]

McKinsey & Company (2015). A new world under construction: China and semiconductors. Erreichbar unter: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/asia-pacific/a-new-world-under-construction-china-and-semiconductors>. [02.09.2025]

McKinsey & Company (2022). Betting big on quantum. Erreichbar unter: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/sustainable-inclusive-growth/charts/betting-big-on-quantum>. [08.07.2025]

[MERICS] Hmadi, A., Groenewegen-Lau, J. (2024). China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up. Erreichbar unter: <https://merics.org/en/report/chinas-long-view-quantum-tech-has-us-and-eu-playing-catch>. [08.07.2025]

[MIT Sloan] MIT Sloan School of Management (2024). Study: Industry now dominates AI research. Erreichbar unter: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/study-industry-now-dominates-ai-research>. [09.09.2025]

[MIWI] Institut für Marktintegration und Wirtschaftspolitik, Kofner, Y. (2022). Development and expansion Germany's robot industry from a conservative perspective. Erreichbar unter: <https://miwi-institut.de/archives/2497>. [08.07.2025]

[ML2R] Kompetenzzentrum Maschinelles Lernen Rhein-Ruhr (ML2R) (2025). Quantum Machine Learning – Forschung zu Machine-Learning-Ansätzen auf Quantencomputern. Erreichbar unter: <https://www.ml2r.de/en/research/quantum-ml/>. [05.08.2025]

Moderna (2024). Moderna's Investigational Therapeutic for Methylmalonic Acidemia (mRNA-3705) Selected by U.S. Food & Drug Administration for START Pilot Program. Erreichbar unter: <https://investors.modernatx.com/news/news-details/2024/Modernas-Investigational-Therapeutic-for-Methylmalonic-Acidemia-mRNA-3705-Selected-by-U.S.-Food-Drug-Administration-for-START-Pilot-Program/default.aspx>. [08.07.2025]

Moderna (2025). mRNA medicines we are currently developing. Erreichbar unter: <https://www.modernatx.com/en-US/research/product-pipeline>. [08.07.2025]

Moore, G. E. (1965). Cramming More Components onto Integrated Circuits. Erreichbar unter: <https://www.cs.utexas.edu/~fussell/courses/cs352h/papers/moore.pdf>. [08.07.2025]

[MQV] Munich Quantum Valley (2025). Erreichbar unter: <https://www.munich-quantum-valley.de/>. [08.07.2025]

Münchener Kreis (2024). Zukunftsstudie IX: DAS DEEP TECH MANIFEST. Erreichbar unter: [https://zukunftsstudie.muenchener-kreis.de/pdf/Zukunftsstudie%20IX%20%E2%80%93%20Das%20Deep%20Tech%20Manifest%20\(2-seitig\).pdf](https://zukunftsstudie.muenchener-kreis.de/pdf/Zukunftsstudie%20IX%20%E2%80%93%20Das%20Deep%20Tech%20Manifest%20(2-seitig).pdf). [08.07.2025]

[MWK Niedersachsen] Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur (2024). Graduierten-Kolleg für RNA-Anwendungen in Medizin und Pharmazie. Erreichbar unter: <https://zukunft.niedersachsen.de/aktuelles/graduierten-kolleg-fur-rna-anwendungen-in-medizin-und-pharmazie/>. [29.08.2025]

Nasdaq (2021). AstraZeneca (AZN) Inks Deal to Enter Novel RNA Therapeutic Space. Erreichbar unter: <https://www.nasdaq.com/articles/astrazeneca-azn-inks-deal-to-enter-novel-rna-therapeutic-space-2021-09-24>. [08.07.2025]

Nasdaq (2025). Why ASML and TSMC Are the Chokepoints in Global Chipmaking. Erreichbar unter: <https://www.nasdaq.com/articles/why-asml-and-tsmc-are-chokepoints-global-chipmaking>. [08.09.2025]

National Library of Medicine (2022). Single-Dose Gene Replacement Therapy Clinical Trial for Participants With Spinal Muscular Atrophy Type 1 (STRIVE-EU). Erreichbar unter: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT03461289>. [08.07.2025]

National Library of Medicine (2024a). A Study to Evaluate the Safety, Tolerability, and Immunogenicity of a Combined Modified RNA Vaccine Candidate Against COVID-19 and Influenza. Erreichbar unter: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT06178991>. [08.07.2025]

National Library of Medicine (2024b). A Safety and Efficacy Study Evaluating CTX001 in Subjects With Severe Sickle Cell Disease. Erreichbar unter: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT03745287>. [08.07.2025]

National Library of Medicine (2025a). A Study About Modified RNA Vaccines Against Influenza in Healthy Adults. Erreichbar unter: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT06436703>. [08.07.2025]

National Library of Medicine (2025b). A Clinical Study of Intismeran Autogene (V940) Plus Pembrolizumab in People With High-Risk Melanoma (V940-001). Erreichbar unter: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT05933577>. [08.07.2025]

National Library of Medicine (2025c). A Study to Assess Safety, Pharmacokinetics, and Pharmacodynamics of mRNA-3705 in Participants With Isolated Methylmalonic Acidemia. Erreichbar unter: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT04899310>. [08.07.2025]

National Quantum Office Singapore (2024). Close to S\$300 million invested to drive Singapore's National Quantum Strategy over five years. Erreichbar unter: https://nqo.sg/wp-content/uploads/2024/06/Media-Factsheet_NQO_National-Quantum-Strategy_27-May-clean-1.pdf. [08.07.2025]

National Science & Technology Council (NSTC), Subcommittee on Quantum Information Science (QIS). (Dezember 2024). National Quantum Initiative – Supplement to the President's FY 2025 Budget. Washington, D.C.: NSTC. Erreichbar unter: <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2024/12/NQI-Annual-Report-FY2025.pdf>. [12.08.2025]

Nature (2025). How mRNA technology came to the rescue. Erreichbar unter: <https://www.nature.com/articles/d42473-022-00159-1>. [08.07.2025]

[NCE] Networks of Centres of Excellence – Government of Canada (2011). Centre for Commercialization of Regenerative Medicine: Turning the promise of regenerative medicine into reality. Erreichbar unter: https://www.nce-rce.gc.ca/NetworksCentres-CentresReseaux/CECR-CECR/CCRM_eng.asp. [08.07.2025]

Neura Robotics (2025). NEURA Robotics erhält 120 Millionen Euro Series-B-Finanzierung, um seine Vision der kognitiven und humanoiden Robotik voranzutreiben. Erreichbar unter: <https://neura-robotics.com/de/neura-robotics-erhaelt-120-millionen-euro-series-b/>. [08.07.2025]

[NHS] NHS England (2025). The Innovation Ecosystem programme. Erreichbar unter: <https://www.england.nhs.uk/ourwork/innovation/the-innovation-ecosystem-programme/>. [08.07.2025]

[NIBRT] National Institute for Bioprocessing Research & Training (2025). About NIBRT. Erreichbar unter: <https://www.nibrt.ie/about/>. [08.07.2025]

[NICE] National Institute for Health and Care Excellence (2025). What we do. Erreichbar unter: <https://www.nice.org.uk/about/what-we-do>. [08.07.2025]

[NIIMBL] National Institute for Innovation in Manufacturing Biopharmaceuticals (2025). Cellular Therapies Certificate Program. Erreichbar unter: <https://www.niimbl.org/resources/cellular-therapies-certificate-program/>. [08.07.2025]

Novartis (2018). Novartis erhält die Zulassung für seine CAR-T-Zell-Therapie Kymriah (Tisagenlecleucel) von der Europäischen Kommission. Erreichbar unter: https://www.novartis.com/news/media-releases/novartis-erhalt-die-zulassung-fur-seine-car-t-zell-therapie-kymriah-tisagenlecleucel-von-der-europaischen-kommission?utm_. [08.07.2025]

[NQCC] National Quantum Computing Centre (2021). Announcing the QuPharma project for drug development using quantum computing. Erreichbar unter: https://www.nqcc.ac.uk/updates/announcing-the-qupharma-project-for-drug-development-using-quantum-computing/?utm_. [08.07.2025]

[NVIDIA Developer] Zhou, H. (Harry) et al. (2025). NVIDIA and QuEra Decode Quantum Errors with AI. NVIDIA Technical Blog, 18. März 2025. Erreichbar unter: <https://developer.nvidia.com/blog/nvidia-and-quera-decode-quantum-errors-with-ai>. [09.09.2025]

[OECD] Organisation for Economic Co-operation and Development (2020). Künstliche Intelligenz in der Gesellschaft. Erreichbar unter: https://www.oecd.org/de/publications/kunstliche-intelligenz-in-der-gesellschaft_6b89dea3-de.html [30.08.2025]

[OECD] Organisation for Economic Co-operation and Development (2022). Germany 2022: Building Agility for successful transition. Erreichbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/10/oecd-views-of-innovation-policy-germany-2022_34a18c3c/50b32331-en.pdf. [08.07.2025]

[OECD] Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2023a). Künstliche Intelligenz in Deutschland: OECD-Bericht. Erreichbar unter: https://www.ki-strategie-deutschland.de/files/downloads/OECD-Bericht_K%C3%BCnstlicher_Intelligenz_in_Deutschland.pdf [04.09.2025]

[OECD] Organisation for Economic Co-operation and Development (2023b). Regulatory sandboxes in artificial intelligence. Erreichbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/07/regulatory-sandboxes-in-artificial-intelligence_a44aae4f/8f80a0e6-en.pdf. [08.07.2025]

[OECD] Organisation for Economic Co-operation and Development (2024). OECD-Bericht zu Künstlicher Intelligenz in Deutschland. Erreichbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/de/publications/reports/2024/06/oecd-artificial-intelligence-review-of-germany_c1c35ccf/8fd1bd9d-de.pdf. [08.07.2025]

[OECD] Organisation for Economic Co-operation and Development (2025). Benchmarking government support for venture capital – A comparative analysis. Erreichbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/06/benchmarking-government-support-for-venture-capital_cc27598f/81e53985-en.pdf. [08.07.2025]

[Parhiz et al.] Parhiz, Hamideh; Atochina-Vasserman, Elena N.; Weissman, Drew (2024). mRNA-based therapeutics: looking beyond COVID-19 vaccines. The Lancet. Erreichbar unter: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(23\)02444-3/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(23)02444-3/fulltext). [09.09.2025]

Perimeter Institute (2023). Government of Canada launches National

Quantum Strategy. Erreichbar unter: <https://perimeterinstitute.ca/news/government-canada-launches-national-quantum-strategy>. [08.07.2025]

PETRUS Consortium (2025). About EuroQCI. Erreichbar unter: <https://petrus-euroqci.eu/about-euroqci/>. [08.07.2025]

Pfizer (2021). Pfizer-BioNTech COVID-19 Vaccine COMIRNATY® Receives Full U.S. FDA Approval for Individuals 16 Years and Older. Erreichbar unter: <https://www.pfizer.com/news/press-release/press-release-detail/pfizer-biontech-covid-19-vaccine-comirnaty-receives-full>. [08.07.2025]

Pfizer (2025). Harnessing the potential of mRNA. Erreichbar unter: <https://www.pfizer.com/science/focus-areas/vaccines/mrna-technology>. [08.07.2025]

Photonics (2020). Quantum Loop Provides Testbed for Unhackable Communications. Erreichbar unter: https://www.photonics.com/Articles/Quantum_Loop_Provides_Testbed_for_Unhackable/a65458. [08.07.2025]

Photonik Forschung Deutschland (2025). Quantum Futur Programm: Die BMBF-Nachwuchsinitiative zu anwendungsorientierten Quantentechnologien. Erreichbar unter: <https://www.photonikforschung.de/campus/quantum-futur-programm.html>. [08.07.2025]

Plattform Lernende Systeme (2025). Roboter werden lernfähig. Erreichbar unter: <https://www.plattform-lernende-systeme.de/robotik.html>. [08.07.2025]

[PostQuantum] Ivezic, Marin (2022). Record-Breaking Quantum Transmission Via Micius. Erreichbar unter: <https://postquantum.com/industry-news/micius-quantum-communications/>. [08.07.2025]

[PostQuantum] Ivezic, Marin (2025). Quantum Geopolitics: The Global Race for Quantum Computing. Erreichbar unter: <https://postquantum.com/quantum-computing/quantum-geopolitics/>. [08.07.2025]

[Project RoX] Project RoX – Enabling AI-based Robotics (2025). Project RoX – Digital ecosystem for AI-supported robotics across the lifecycle, combining AI and robotics technologies in industry and logistics (federally funded by BMWK, supported durch ABB, Siemens, DLR, Fraunhofer IPA u.e.). Erreichbar unter: <https://www.project-rox.ai/en/>. [05.08.2025]

[PTB] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2025a). Quantum Technology Competence Center (QTZ). Erreichbar unter: <https://www.ptb.de/cms/nc/en/ptb/competence-centers/qtz.html>. [08.07.2025]

[PTB] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2025b). Optische Gitteruhren Arbeitsgruppe 4.32. Erreichbar unter: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-43/ag-432/strontium-gitteruhr.html>. [08.07.2025]

[PTB] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2025c). Open Access Repository of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB-OAR). Erreichbar unter: <https://oar.ptb.de/>. [08.07.2025]

[QCI] Quantencomputing Initiative DLR (2022). Start-ups und Unternehmen entwickeln Quantencomputer auf Basis von Ionenfallen. Erreichbar unter: <https://qci.dlr.de/start-ups-und-unternehmen-entwickeln-quantencomputer-auf-basis-von-ionenfallen/>. [08.07.2025]

Quartz Media (2025). The top 10 countries in the world by computing power. Erreichbar unter: <https://qz.com/top-10-countries-world-compute-power-supercomputing-ai-1851727906>. [08.09.2025]

[Quantum Flagship] Quantum Technologies Flagship – European Commission) (o.J.). About the Quantum Flagship – A large scale EU initiative for quantum technologies. Erreichbar unter: <https://qt.eu/about-quantum-flagship/>. [12.08.2025]

Quantum Gov (2025). Quantum Sensing Archives – US National Quantum Initiative. Erreichbar unter: <https://www.quantum.gov/category/quantum-sensing/>. [08.07.2025]

Quantum Insider (2023). Chinese Quantum Companies and National Strategy 2023. Erreichbar unter: <https://thequantuminsider.com/2023/04/13/chinese-quantum-companies-and-national-strategy-2023/>. [08.07.2025]

[Quantum Insider] Swayne, M. (2024). French National Quantum Update – March 2024. Erreichbar unter: <https://thequantuminsider.com/2024/03/29/french-national-quantum-update-march-2024/>. [08.07.2025]

[Quantum Insider] Swayne, M. (2025a). QuIC Report: Europe's Quantum Edge Hinges on Urgency, Collaboration And Coordination. Erreichbar unter: <https://thequantuminsider.com/2025/04/02/quic-report-europes-quantum-edge-hinges-on-urgency-collaboration-and-coordination/>. [08.07.2025]

[Quantum Insider] Swayne, M. (2025b). China Establishes Quantum-Secure Communication Links With South Africa. Erreichbar unter: <https://thequantuminsider.com/2025/03/14/china-established-quantum-secure-communication-links-with-south-africa/>. [08.07.2025]

[Quantum Insider] (2025c). Connected DMV Announces 2025 Global Industry Challenge. Erreichbar unter: <https://thequantuminsider.com/2025/02/27/connected-dmv-announces-2025-global-industry-challenge/>. [08.07.2025]

QuantumEscapeChallenge (2025). Über uns: EsCQuTe. Erreichbar unter: <https://quantumescapechallenge.com/about/>. [08.07.2025]

QuantumFrontiers (2025). QuantumVR. Erreichbar unter: <https://www.quantumfrontiers.de/de/sharing-science/public-outreach/quantumvr>. [08.07.2025]

[QuIC] European Quantum Industry Consortium (2025). A Portrait of The Global Patent Landscape in Quantum Technologies. Erreichbar unter: <https://www.euroquic.org/wp-content/uploads/2025/02/A-Portrait-of-The-Global-Patent-Landscape-in-Quantum-Technologies-2025.pdf>. [05.08.2025]

[QVLS] Quantum Valley Lower Saxony e. V. (2025). Quantum Valley Lower Saxony – das Ökosystem für Durchbrüche in Quantentechnologien. Erreichbar unter: <https://qvls.de/de/>. [05.08.2025]

QuNET (2025). Die QuNET-Initiative: Hochsichere Kommunikation durch Quantenphysik. Erreichbar unter: <https://qunet-initiative.de/>. [08.07.2025]

[QURECA] QURECA Ltd. (2024). Quantum Initiatives Worldwide. Erreichbar unter: <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/>. [22.08.2025]

RAND (2025). Beyond a Manhattan Project for Artificial General Intelligence. Erreichbar unter: <https://www.rand.org/pubs/commentary/2025/04/beyond-a-manhattan-project-for-artificial-general-intelligence.html>. [08.09.2025]

République Française (2025). La Stratégie Nationale Quantique. Erreichbar unter: <https://quantique.france2030.gouv.fr/>. [08.07.2025]

Reuters (2023). Germany plans to double AI funding in race with China, U.S. Erreichbar unter: <https://www.reuters.com/technology/germany-plans-double-ai-funding-race-with-china-us-2023-08-23/>. [08.09.2025]

Reuters (2025a). China's Xi calls for self reliance in AI development amid U.S. rivalry. Erreichbar unter: <https://www.reuters.com/world/china/chinas-xi-calls-self-sufficiency-ai-development-amid-us-rivalry-2025-04-26/>. [08.09.2025]

Reuters (2024b). GSK buys COVID, influenza vaccines from retrenching CureVac. Erreichbar unter: <https://www.reuters.com/business/healthcare-pharmaceuticals/gsk-buys-full-rights-make-covid-influenza-vaccines-curevac-2024-07-03/>. [08.07.2025]

RNA Canada ARN (2025). A network of scientists at universities & companies across Canada. Erreichbar unter: <https://www.rnacanada.ca/>. [08.07.2025]

[RoboCup] RoboCup Germany (2024). „Sie wünschen?“ – Intelligente Roboter im Restaurant und in der Küche im Wettstreit miteinander. Erreichbar unter: <https://robocup.de/intelligente-roboter-im-restaurant-kueche-im-wettstreit/>. [11.08.2025]

Robotics Institute Germany (2025). About us. Erreichbar unter: <https://robotics-institute-germany.de/de/about-us/>. [08.07.2025]

Rothgang, M., Dehio, J., Warnecke, C. (2022). Kooperationen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, Mechanismen und Hemmnisse beim Erkenntnis- und Technologietransfer. Erreichbar unter: https://www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Studien/2022/StuDIS_14_2022.pdf. [16.07.2025]

RSM (2025). Global R&D tax incentives for SMEs: A cross-country comparison. Erreichbar unter: <https://www.rsm.global/insights/global-rd-tax-incentives-smes-cross-country-comparison#>. [08.07.2025]

Sanofi (2021). Sanofi completes acquisition of Translate Bio, accelerating the application of mRNA in new vaccines and therapeutics. Erreichbar unter: <https://www.sanofi.com/en/media-room/press-releases/2021/2021-09-14-13-26-25-2296830>. [08.07.2025]

Schott, G. et al. (2021). Arzneimittel: Sinnvolle Studien nach der Zulassung. Erreichbar unter: https://www.akdae.de/fileadmin/user_upload/akdae/Arzneimitteltherapie/AVP/Artikel/2021-3-4/130.pdf. [08.07.2025]

[SCMP] South China Morning Post (2023). China built more 5G base stations in 3 months than US did in 2 years. Erreichbar unter: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3228259/china-built-more-5g-base-stations-3-months-us-did-2-years>. [08.07.2025]

Silicon Saxony (2023). BMBF: Aktionsplan „Robotikforschung“. Erreichbar unter: <https://silicon-saxony.de/bmbf-aktionsplan-robotikforschung/>. [08.07.2025]

Smart Nation Singapore (2025). National AI Strategy: AI for the Public Good, for Singapore and the World. Erreichbar unter: <https://www.smartnation.gov.sg/initiatives/national-ai-strategy>. [08.07.2025]

[SPRIND] SPRIND, Stifterverband & Fraunhofer ISI (2024). IP-Transfer 3.0 – „Transfer-Taschenmesser“. Erreichbar unter: https://www.sprind.org/worte/magazin/ip_transfer. [07.08.2025]

[SPRIND] SPRIND (2025). Challenges und Funken. Unsere Wettbewerbe für Weltveränderer. Erreichbar unter: <https://www.sprind.org/taten/challenges>. [08.07.2025]

[SPRIND] SPRIND, Stifterverband & Fraunhofer ISI (2025). IP-Transfer 3.0 – Neue Wege im IP-Transfer: Pilotprojekt, Transfer-Taschenmesser und Erkenntnisse aus Online-Befragungen. Erreichbar unter: <https://www.sprind.org/worte/magazin/ip-transfer>. [05.08.2025]

[HAI] Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence (HAI) (2022). What the CHIPS and Science Act means for Artificial Intelligence. Erreichbar unter: <https://hai.stanford.edu/assets/files/2022-08/HAI%20Explainer%20-%20What%20The%20CHIPS%20and%20Science%20Act%20Means%20for%20AI.pdf>. [03.09.2025]

[HAI] Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence (HAI) (2025). The 2025 AI Index Report. Erreichbar unter: <https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report> [08.09.2025]

[StMWK] Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst Bayern (2022). „Die Hightech Agenda ist ein Erfolgsfaktor für ganz Bayern“: Umsetzung schreitet kraftvoll voran. Erreichbar unter: <https://www.stmwk.bayern.de/allgemein/meldung/6918/die-hightech-agenda-ist-ein-erfolgsfaktor-fuer-ganz-bayern-umsetzung-schreitet-kraftvoll-voran.html>. [08.07.2025]

[StMWK] Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst Bayern (2025). Freistaat Bayern reicht Interessenbekundung für AI Gigafactory „Blue Swan“ bei Europäischer Union ein. Erreichbar unter: <https://www.stmwk.bayern.de/pressemitteilung/12900/nr-46-vom-24-06-2025.html>. [08.07.2025]

[Tatsachen] Tatsachen über Deutschland (2024). Forschung und Innovation. Erreichbar unter: <https://www.tatsachen-ueber-deutschland.de/en/research-and-innovation/research-and-innovation>. [11.08.2025]

Tech in Asia (2024). Singapore bolsters AI ambitions with \$742 m investment. Erreichbar unter: <https://www.techinasia.com/singapore-bolsters-ai-ambitions-with-742m-investment>. [07.08.2025]

Tech in Asia (2025). China unveils \$8.2b AI fund to strengthen AI industry. Erreichbar unter: <https://www.techinasia.com/news/china-unveils-8-2b-ai-fund-to-strengthen-ai-industry>. [08.09.2025]

[TechTarget] Roundy, Jacob (2025). 12 companies building quantum computers. Erreichbar unter: <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/feature/Companies-building-quantum-computers>. [08.07.2025]

[TFN] Prabhu, Abhinaya (2025). Humanoid robot maker Agility Robotics to secure \$400M at \$1.75B valuation: Can it outpace Tesla and Figure AI?. Erreichbar unter: Humanoid robot maker Agility Robotics to secure \$400M at \$1.75B valuation: Can it outpace Tesla and Figure AI? — TFN. [08.07.2025]

Thales Alenia Space (2023). Thales Alenia Space and partners sign contract with European Space Agency for TeQuantS quantum satellite communications project. Erreichbar unter: <https://www.thalesaleniaspace.com/en/press-releases/thales-alenia-space-and-partners-sign-contract-european-space-agency-tequants>. [08.07.2025]

[The Guardian] McKie, R. (2024). 'It's the perfect place': London Underground hosts tests for 'quantum compass' that could replace GPS. Erreichbar unter: <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jun/15/london-underground-quantum-compass-gps-subatomic-instrument-locations>. [08.07.2025]

[The Manufacturer] The Manufacturer (2023). ABB Robotics and Porsche Consulting collaborate to automate the construction industry. Erreichbar unter: <https://www.themanufacturer.com/articles/abb-robotics-and-porsche-consulting-collaborate-to-automate-the-construction-industry/>. [11.08.2025]

The Qubit Report (2024). Pasqal Delivers 100-Qubit Quantum Computer to Jülich Supercomputing Centre. Erreichbar unter: <https://posts.thequbitreport.com/quantum-computing-business-and-industry/2024/12/03/pasqal-delivers-100-qubit-quantum-computer-to-julich-supercomputing-centre/>. [08.07.2025]

[The Times] Biontech to invest £1bn in British vaccine research centres. Erreichbar unter: Biontech to invest £1bn in British vaccine research centres. [17.07.2025]

The Wall Street Journal (2025). China Has a Different Vision for AI. It Might Be Smarter. Erreichbar unter: <https://www.wsj.com/tech/ai/china-has-a-different-vision-for-ai-it-might-be-smarter-581f1e44>. [08.09.2025]

Toshiba (2025). Toshiba Breakthrough Brings Quantum Communications to Existing National-scale Telecommunications Infrastructure. Erreichbar unter: <https://www.toshiba.eu/newsroom/toshiba-breakthrough-brings-quantum-communications-to-existing-national-scale-telecommunications-infrastructure/>. [08.07.2025]

[TUM] Technische Universität München (2024). Robotics Institute Germany (RIG) – Robotik-Spitzenstandorte entwickeln gemeinsam. Erreichbar unter: <https://www.mirmi.tum.de/en/mirmi/research/projects/robotics-institute-germany-rig-robotik-spitzenstandorte-entwickeln-gemeinsam/>. [11.08.2025]

[TQI] The Quantum Insider (2025). China Tests Drone-Mounted Quantum Sensor That Could Reshape Submarine Detection. Erreichbar unter: <https://thequantuminsider.com/2025/04/27/china-tests-drone-mounted-quantum-sensor-that-could-reshape-submarine-detection/>. [12.08.2025]

UK Government (2023). AI Safety Summit 2023 – Bletchley Park. Erreichbar unter: <https://www.gov.uk/government/topical-events/ai-safety-summit-2023>. [08.09.2025]

UK Government (2025). Guidance: Innovative Licensing and Access Pathway (ILAP). Erreichbar unter: <https://www.gov.uk/government/publications/innovative-licensing-and-access-pathway-ilap>. [08.07.2025]

[UK Parliament] UK Parliament (2023). Nineteenth Report of Session 2022-23: Venture Capital. Erreichbar unter: <https://publications.parliament.uk/pa/cm5803/cmselect/cmtreasy/134/report.html#:~:text=Venture%20Capital%20of%20funds%20had%20been>. [08.07.2025]

[UK Quantum Strategy] Department for Science, Innovation and Technology (2023). National Quantum Strategy: A quantum-enabled economy. Erreichbar unter: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage>. [05.08.2025]

[UK Quantum 45M] Department for Science, Innovation and Technology (2024). Unlocking the potential of quantum: £45 million investment to drive breakthroughs in brain scanners, navigation systems and quantum computing. Erreichbar unter: <https://www.gov.uk/government/news/unlocking-the-potential-of-quantum-45-million-investment-to-drive-breakthroughs-in-brain-scanners-navigation-systems-and-quantum-computing>. [05.08.2025]

[UNDP] Ye, W., Wen, S. (2024). Deep Tech Series Vol. 7: Shenzhen's Deep Tech Ecosystem - Driving Innovation and Sustainability. Erreichbar unter: <https://www.undp.org/policy-centre/singapore/blog/deep-tech-series-vol-7-shen-zhens-deep-tech-ecosystem-driving-innovation-and-sustainability>. [08.07.2025]

UNESCO (2022). Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence. Erreichbar unter: <https://www.unesco.org/en/articles/recommendation-ethics-artificial-intelligence>. [08.09.2025]

[Universität Bremen] Universität Bremen (2023). EU-Forschungsförderung: Horizont Europa. Erreichbar unter: https://www.uni-bremen.de/fileadmin/user_upload/forschung/EU/REF12_EU-Forschungsfoerderung-Horizont-Europa_Broschuere_DE_RZ_WEB.pdf. [03.09.2025]

Universität Tübingen (2025). Cyber Valley. Erreichbar unter: <https://uni-tuebingen.de/forschung/kooperationspartner/cyber-valley/>. [08.07.2025]

University of Helsinki (2023). Elements of AI has introduced one million people to the basics of artificial intelligence. Erreichbar unter: <https://www.helsinki.fi/en/news/artificial-intelligence/elements-ai-has-introduced-one-million-people-basics-artificial-intelligence>. [08.07.2025]

U.S. Department of Energy (2022). Frontier: DOE Supercomputing Launches Exascale Era. Erreichbar unter: <https://www.energy.gov/science/articles/frontier-doe-supercomputing-launches-exascale-era>. [06.09.2025]

[USPTO] United States Patent and Trademark Office (2025). Technology transfer: The Bayh Dole Act. Erreichbar unter: <https://www.uspto.gov/ip-policy/patent-policy/technology-transfer>. [08.07.2025]

[VDI] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2024). Aufholjagd in der KI: Deutschland verzeichnet starken Anstieg bei Patentanmeldungen. Erreichbar unter: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/produktion/aufholjagd-in-der-ki-deutschland-verzeichnet-starken-anstieg-bei-patentanmeldungen/>. [08.07.2025]

[VDMA] Verein Deutscher Maschinenbau-Anstalten (2023). Strategiepapier: Robotik und Automation 2028 - Schlüsseltechnologie für Deutschland. Erreichbar unter: <https://www.home-of-welding.com/storage/media/documents/13506/23-06-29-strategiepapier-rua.pdf>. [08.07.2025]

[VDMA] Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (2025a). Aktionsplan Robotik für Europa. Erreichbar unter: <https://www.vdma.eu/viewer/-/v2article/render/140335071>. [08.07.2025]

[VDMA] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (2025b). Forum Quantentechnologien und Photonik – Expertenthemenbeschreibung. Erreichbar unter: <https://www.vdma.eu/quantentechnologien-photonik>. [02.09.2025]

[VFA] Verband Forschender Arzneimittelhersteller. (2023). PRESSEMITTEILUNG 007/2023 RNA-Land Deutschland. Erreichbar unter: <https://www.vfa.de/de/presse/pressemitteilungen/pm-007-2023-rna-land-deutschland.html>. [08.07.2025]

[VFA] Verband Forschender Arzneimittelhersteller (2024). CAR-T-Zell-Therapie: Mit zellbasierten Immuntherapien gegen Krebs und Autoimmunkrankheiten. Erreichbar unter: <https://www.vfa.de/de/forschung-entwicklung/fortschritte-krebs/car-t-eine-revolution-in-der-krebstherapie.html>. [04.09.2025]

[VFA] Verband Forschender Arzneimittelhersteller (2025). RNA-basierte Impfstoffe – in Entwicklung und Versorgung. Erreichbar unter: <https://www.vfa.de/rna-basierte-impfstoffe-in-entwicklung-und-versorgung>. [02.09.2025]

[vfa und BCG] Verband Forschender Arzneimittelhersteller (vfa) / Boston Consulting Group (2024). Medizinische Biotechnologie in Deutschland 2024 – Wirtschaftsdaten Biopharmazeutika und KI als Tool in F&E und in der Patient:innenversorgung. Erreichbar unter: <https://www.vfa.de/download/biotech-report-2024.pdf>. [04.09.2025]

Vinnova (2023). Swedish quantum agenda. Erreichbar unter: <https://www.vinnova.se/globalassets/bilder/publikationer/the-swedish-quantum-agenda-appendices.pdf>. [08.07.2025]

Vintura (2025). Monitoring zu gen- und zellbasierten Therapien (GCT). Erreichbar unter: <https://www.vfa.de/monitoring-gct-vintura-vfa-dggt.pdf>. [08.07.2025]

Volkswagen (2019). Volkswagen optimiert Verkehrsfluss mit Quantencomputern. Erreichbar unter: https://www.volkswagen-group.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-optimiert-verkehrsfluss-mit-quantencomputern-16995?utm_. [08.07.2025]

Volkswagen und D-Wave Quantum (2021). Paint Shop Optimization with Quantum Annealing. Erreichbar unter: <https://www.dwavequantum.com/resources/application/paint-shop-optimization-with-quantum-annealing>. [08.07.2025]

[Wacker] Wacker Chemie AG (2024). Pantherna und WACKER erweitern Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Produktion von mRNA-Biopharmazeutika. Erreichbar unter: Pantherna und WACKER erweitern Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Produktion von mRNA-Biopharmazeutika - Wacker Chemie AG. [10.09.2025]

[Wall Street Journal] Lin, L. (2024). China Raises \$48 Billion for Semiconductor Fund to Bolster Chip-Making Capabilities. Erreichbar unter: <https://www.wsj.com/tech/china-unveils-48-billion-fund-to-bolster-chip-industry-10d7f1ce>. [08.07.2025]

[WIPANO] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024). WIPANO – Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen. Erreichbar unter: <https://www.innovation-beratung-foerderung.de/INNO/Navigation/DE/WIPANO/wipano.html>. [05.08.2025]

[Worldbank] (2025) Manufacturing, value added (% of GDP). Erreichbar unter: <https://data.worldbank.org/indicator/nv.ind.manf.zs?end=2024&start=2024&view=map>. [04.09.2025]

YEDA TTO (2025). About YEDA Technology Transfer. Erreichbar unter: <https://www.yedarnd.com/>. [08.07.2025]

[Ynetnews] Shahaf, T. (2025). Preparing for quantum computing threat, Israel ramps up encryption efforts. Erreichbar unter: <https://www.ynetnews.com/business/article/h1srzlgqkl>. [08.07.2025]

Zolgensma (2025). A Gene Therapy That Targets the Root Cause of SMA. Erreichbar unter: <https://www.zolgensma.com/>. [08.07.2025]

[Zukunftsfonds] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Bundesministerium der Finanzen & KfW Research (2025). Erster Statusbericht zum Zukunftsfonds (Stand 31.12.2023). Erreichbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/erster-statusbericht-zukunftsfonds.html>. [05.08.2025]

[ZVEI] ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie e.V. (2023a). Bereit für die Quantenwelt. In: ampere 1.2023, 11.04.2023. Erreichbar unter: <https://www.zvei.org/presse-medien/ampere/ampere-2023/ampere-12023-souveraenitaet-eine-frage-der-innovationsfaehigkeit/bereit-fuer-die-quantenwelt>. [02.09.2025]

[ZVEI] ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie e.V. (2023b). Ionen auf dem Quantensprung. In: Industrie, 11.12.2023. Erreichbar unter: <https://www.zvei.org/themen/industrie?showPage=3215932&cHash=28ea855b73c-775489b81ab00304e3b1e>. [02.09.2025]

[ZVEI] ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2023c): Fachkräftemangel in Berufen der Halbleiterindustrie. Studie im Auftrag des ZVEI. Frankfurt am Main. Verfügbar unter: <https://www.zvei.org/presse-medien/publikationen/studie-fachkraeftemangel-in-berufen-der-halbleiterindustrie>. [27.08.2025].

Über die Autoren

Jonas Hiltrop ist Managing Director & Partner bei BCG in Zürich. Er ist Kernmitglied der Praxisgruppen Industrial Goods und Automotive sowie Teil von BCG X und ein Experte für die Entwicklung und Umsetzung digitaler und KI-gestützter Lösungen. Sie erreichen ihn unter Hiltrop.Jonas@bcg.com.

Michael Brigl ist Managing Director & Senior Partner bei BCG in München. Er leitet BCG in Zentraleuropa und ist Kernmitglied der Principal Investors & Private Equity (PIPE) Praxisgruppe von BCG, mit Fokus auf Corporate Venturing, Innovationsstrategien und digitale Geschäftsmodelle. Sie erreichen ihn unter Brigl.Michael@bcg.com.

Dr. Patrick Herhold ist Managing Director & Senior Partner bei BCG in München. Er ist Mitbegründer des BCG Center for Climate & Sustainability und Co-Author der Klimapfade-Studien und der Transformationspfade Studie. Sie erreichen ihn unter Herhold.Patrick@bcg.com.

Dr. Jan-Frederik Jerratsch ist Managing Director & Partner bei BCG in Berlin. Er ist Experte für Quantentechnologien und Kernmitglied der Healthcare Praxisgruppe von BCG. Sie erreichen ihn unter Jerratsch.Jan@bcg.com.

Dr. Tilman Buchner ist Partner & Director für Digital Operations bei BCG in München. Er leitet das weltweite Innovation Center for Operations (ICO) von BCG und ist Experte für das Internet-of-Things-Ökosystem (IoT), softwaredefinierte Automatisierung und kognitive Robotik. Sie erreichen ihn unter Buchner.Tilman@bcg.com.

Martin Kleinhans ist Projektleiter bei BCG in München. Er ist Mitglied des weltweiten Innovation Center for Operations (ICO) von BCG und Experte für Robotik, das Industrial Internet of Things (IIoT) sowie Edge- und Cloud-Computing. Sie erreichen ihn unter Kleinhans.Martin@bcg.com.

Dr. Lorenz Pammer ist Projektleiter bei BCG in Wien. Er ist Kernmitglied der Healthcare Praxisgruppe von BCG und Experte für Biopharma R&D. Sie erreichen ihn unter Pammer.Lorenz@bcg.com.

Dr. Geert-Jan Besjes ist Projektleiter bei BCG X in Wien. Er ist Kernmitglied der Automotive Praxisgruppe von BCG und Teil des Auto AI-Teams von BCG X. Sie erreichen ihn unter Besjes.Geert-Jan@bcg.com.

Dr. Ivan Tretiakov ist Projektleiter bei BCG in Düsseldorf. Er leitet den Tech Council von BCG und BCG X und ist Experte für digitale Transformationen. Sie erreichen ihn unter Tretiakov.Ivan@bcg.com.

Theresa Bender ist Associate bei BCG in Berlin. Sie erreichen sie unter Bender.Theresa@bcg.com.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) und seinen Mitgliedsverbänden sowie dem Einsatz der Beteiligten und Experten aus Unternehmen und Verbänden für ihre umfangreichen konstruktiven Beiträge und ihre Unterstützung bei der Validierung der Analysen – als Mitglieder des Steuerungskreises und Stakeholderkreises sowie als Diskussionsteilnehmer in zahlreichen Arbeitsworkshops und bilateralen Expertengesprächen im Studienverlauf.

Insbesondere bedanken wir uns beim Team des BDI, mit dem wir die Studie in enger Zusammenarbeit geschrieben haben: Dr. Mariia Halada, Dr. Thomas Koenen, Dr. Klaus Günter Deutsch, Kenneth Frisse, Evelin Hildenbrand, Steven Heckler, Iris Plöger, Polina Khubbeeva, Rabea Knorr, Cora Loh, und Christian Rudelt.

Zudem bedanken wir uns beim Expertenkreis der Boston Consulting Group: Dr. Andrej Levin, Melih Yener, Dr. Max Ludwig, Jean-Francois Bobier, Dr. Sven Fraterman, Theresa Wolf und Judith Wallenstein.

Gleichermaßen bedanken wir uns für die inhaltliche, grafische und organisatorische Unterstützung: Jenny Liu, Valeria Besse, Amelie Ege und Ulrich Kremer.



