

EFI - Expertenkommission Forschung und Innovation (Ed.)

Research Report

Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025

Provided in Cooperation with:

Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)

Suggested Citation: EFI - Expertenkommission Forschung und Innovation (Ed.) (2025) : Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025, ISBN 978-3-9825134-4-7, Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI), Berlin

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/313553>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

GUTACHTEN ZU FORSCHUNG,
INNOVATION UND TECHNOLOGISCHER
LEISTUNGSFÄHIGKEIT
DEUTSCHLANDS

EXPERTENKOMMISSION
FORSCHUNG
UND INNOVATION



GUTACHTEN

2025 2026 2027

2028 2029 2030

2031 2032 2033



GUTACHTEN ZU FORSCHUNG,
INNOVATION UND TECHNOLOGISCHER
LEISTUNGSFÄHIGKEIT
DEUTSCHLANDS

EXPERTENKOMMISSION
FORSCHUNG
UND INNOVATION

EFI

GUTACHTEN 2025

Unser Dank gilt

Dr. Britta Ammermüller, Eric Arndt, Daniel Behrendt, Dr. Heike Belitz, Dr. Christian Binz, Christopher Briem, Prof. Dr. Tommaso Calarco, Dr. Jano Costard, Prof. Sabina Deitrick, Ph.D., Henning R. Deters, Dr. Friedrich Dornbusch, Jay Douglass, PD Dr. Birte Fähnrich, Prof. Dr. Oliver Falck, Prof. Bernd Fitzenberger, Ph.D., Bill Flanagan, Dr. Michael Förtsch, Prof. Erica R.H. Fuchs, Ph.D., Prof. Dr. Dr. h.c. Clemens Fuest, Prof. Dr. Erik Gawel, Gian Gentile, Cody Gill, Dr. Michael A. Glass, Dr. Nils Grashof, Mike Harding, Dr. Alexander Heinrich, Dr. Martin Hellfeier, Dr. Sven Hendricks, Dr. Tobias Hoffmann, Eric Hough, Prof. Dr. Karl Jansen, Dr. Markus Janser, Prof. Dr. Henning Kagermann, Dr. Mathis Keller, Prof. Dr. Bernd Klauer, Dr. Gerhard Kussel, Caitlin Lee, Ph.D., Philip Lehman, Ph.D., Dr. Georg Licht, Christian Manders, M. Wade Markel, Ph.D., Christopher Martin, Dr. Britta Matthes, Rachel Mauer, Prof. Theresa Mayer, Ph.D., Dr. Wolf Merkel, Prof. Dr. Steffen Müller, Dr. Rainer Müssner, Prof. Dr. Annkatrin Niebuhr, Prof. Dr. André Niemann,

Dr. Johannes Otterbach, PD Dr. Anne Otto, Paul Overby, Bill Peduto, Dr. Heike Prasse, Ryan Pulley, Prof. Dr. Till Requate, Luisa Rölke, Nelli Schiebeler, Prof. Dr. Torsten Schmidt, Dr. Jochen Schneider, Dr. Christoph Schulte, Dr. Bjoern Schulte, Dr. Georg Schütte, Beth Schwanke, Sally Sleeper, Ph.D., Dr. Nicolas Spethmann, Prof. Dr. Michael Stelter, Dr. Nataliya Stupak, Florian Süssenguth, PD Dr. Mirko Titze, Prof. Dr. Bernhard Truffer, Dr. Dirk Waider, Dr. Petra Wolff, Prof. Dr. Christof Wunderlich,

deren Expertise mit in das diesjährige Gutachten eingeflossen ist.

Ferner danken wir allen Expertinnen und Experten, die an der Erstellung der Studien zum deutschen Innovationssystem mitgewirkt haben.

Die Expertenkommission weist darauf hin, dass die im Gutachten dargelegten Positionen nicht notwendigerweise die Meinungen der oben genannten Personen wiedergeben.

Mitglieder der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)

Prof. Dr. Irene Bertschek (stellvertretende Vorsitzende)

ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische
Wirtschaftsforschung GmbH Mannheim, For-
schungsbereich Digitale Ökonomie, und Justus-
Liebig-Universität Gießen, Fachbereich Wirt-
schaftswissenschaften, Professur für Ökonomie
der Digitalisierung

Prof. Dr. Guido Bünstorf

Universität Kassel, Fachbereich Wirtschaftswis-
senschaften, Fachgebiet Wirtschaftspolitik, Inno-
vation und Entrepreneurship, und International
Center for Higher Education Research (INCHER)

Prof. Dr. Uwe Cantner (Vorsitzender)

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Wirtschafts-
wissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl für Volks-
wirtschaftslehre/Mikroökonomik, und University
of Southern Denmark, Odense, Department of
Marketing and Management

Prof. Dr. Carolin Häussler

Universität Passau, Wirtschaftswissenschaftliche
Fakultät, Lehrstuhl für Organisation, Technologie-
management und Entrepreneurship

Prof. Dr. Dr. h.c. Christoph M. Schmidt

RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
e.V. und Lehrstuhl für Wirtschaftspolitik und
Angewandte Ökonometrie an der Fakultät für
Wirtschaftswissenschaft der Ruhr-Universität
Bochum

Prof. Dr. Dr. h.c. Friederike Welter

Institut für Mittelstandsforschung (IfM) Bonn
und Universität Siegen, Fakultät III Wirtschafts-
wissenschaften, Wirtschaftsinformatik und Wirt-
schaftsrecht, Professur für Betriebswirtschafts-
lehre, insbesondere Management von kleinen und
mittleren Unternehmen und Entrepreneurship

Dieses Gutachten beruht auch auf der sachkundi-
gen und engagierten Arbeit der Mitarbeiterinnen
und Mitarbeiter der EFI-Geschäftsstelle sowie der
Kommissionsmitglieder.

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der EFI-Geschäftsstelle

Christine Beyer
Dr. Helge Dauchert
Dr. Lea Eilers
Tobias Hädrich
Dr. Friederike Heiny
Dr. Petra Meurer
Antje Michna
Dr. Christoph Oslislo
Dr. Johannes Stiller

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Kommissionsmitglieder

Dr. Siegrun Brink Institut für Mittelstands-
forschung (IfM) Bonn

Lukas Dreier Friedrich-Schiller-Universität Jena,
Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl
für Volkswirtschaftslehre/Mikroökonomik

Dr. Daniel Erdsiek ZEW – Leibniz-Zentrum für
Europäische Wirtschaftsforschung GmbH Mann-
heim, Forschungsbereich Digitale Ökonomie

Florian Neubauer, Ph.D. RWI – Leibniz-Institut
für Wirtschaftsforschung e.V.

Robin Nowak Universität Passau, Wirtschafts-
wissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl für
Organisation, Technologiemanagement und
Entrepreneurship

Dr. Markus Rieger-Fels Institut für Mittelstands-
forschung (IfM) Bonn

Maria Theißen Universität Kassel, Fachbereich
Wirtschaftswissenschaften, Fachgebiet Wirt-
schaftspolitik, Innovation und Entrepreneurship,
und International Center for Higher Education
Research (INCHER)

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-------------------|----|
| Vorwort | 9 |
| Kurzfassung | 12 |

A AKTUELLE ENTWICKLUNGEN UND HERAUSFORDERUNGEN

| | |
|--|----|
| A 0 Standortbestimmung: wirtschaftliche Entwicklung schwach und F&I-System unter Druck | 20 |
| A 1 20. Legislaturperiode: F&I-Politik vom proklamierten „Deutschland-Tempo“ weit entfernt | 24 |
| A 2 21. Legislaturperiode: F&I-Politik schlagkräftiger machen | 27 |
| A 3 Industriepolitik | 37 |

B KERNTHEMEN 2025

| | |
|---|-----|
| B 1 Transformativer Strukturwandel durch Digitalisierung und Dekarbonisierung | 50 |
| B 2 Quantentechnologien | 78 |
| B 3 Innovationen in der Wasserwirtschaft | 100 |

C VERZEICHNISSE

| | | |
|-----|--|-----|
| C 1 | Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Boxen | 121 |
| C 2 | Abkürzungsverzeichnis | 123 |
| C 3 | Glossar | 126 |
| C 4 | Aktuelle Studien zum deutschen Innovationssystem | 132 |
| C 5 | Literaturverzeichnis | 133 |
| C 6 | Endnotenverzeichnis | 138 |
| C 7 | F&I-Dashboard | 161 |

Vorwort

Dieses Jahresgutachten nimmt mit seiner Übergabe an die scheidende Bundesregierung den Weg in die Öffentlichkeit und soll für die anstehenden Koalitionsverhandlungen Impulse setzen.

Es geht um viel.

Es gilt, eine neue Regierung zu bilden, der es gelingt, Vertrauen in die Politik zurückzugewinnen, Unsicherheiten für Wirtschaft und Gesellschaft zu verringern und erfolgversprechende Perspektiven zu entwickeln. Der Weg aus der wirtschaftlichen Rezession muss gefunden und beschritten werden.

Dafür ist die Forschungs- und Innovationspolitik (F&I-Politik) dringend weiterzuentwickeln. Insbesondere sollten Maßnahmen auf die transformative Erneuerung in der Industrie und bei den Dienstleistungen, auf Reformen im Bildungs- und Hochschulbereich, auf die Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung und auf die Ertüchtigung wichtiger Infrastrukturen ausgerichtet werden. Auf diese Weise können sich die deutsche Wirtschaft und Gesellschaft in den laufenden Transformationsprozessen gut positionieren und ausreichend Innovationskraft entwickeln, um sich den Herausforderungen im internationalen Innovations- und Technologiewettbewerb erfolgreich zu stellen.

Die Expertenkommission möchte mit ihrem Jahresgutachten 2025 zur Lösung der benannten Herausforderungen aus innovationsökonomischer und F&I-politischer Sicht beitragen. Am Anfang des Gutachtens steht eine Einordnung der wirtschaftlichen Lage und der Leistungsfähigkeit des deutschen F&I-Systems. Eine neue, beherrzte und ausgewogene F&I-Politik wird benötigt, um das F&I-System zu stärken. Es soll die deutschen Unternehmen und Forschungseinrichtungen darin unterstützen, ihre Forschungs- und Innovationskraft auszubauen, um so wieder an internationaler Wettbewerbsfähigkeit zu gewinnen.

Eine Bewertung der F&I-Politik der 20. Legislaturperiode zeigt, dass die Politik diesem Anspruch in den vergangenen Jahren nicht genügt. Sie hat sich trotz richtiger Zielsetzungen in vielerlei Hinsicht verzettelt und die notwendige Konsequenz bei der Umsetzung ihrer Ziele vermissen lassen. Vor diesem Hintergrund schlägt die Expertenkommission Maßnahmen vor, mit denen die Bundesregierung der 21. Legislaturperiode die genannten Probleme bewältigen kann. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei der Industriepolitik, deren Möglichkeiten und Grenzen die Expertenkommission aufzeigt.

Im Anschluss an diese Gesamtbetrachtung des deutschen F&I-Systems richtet die Expertenkommission mit ihren Schwerpunktkapiteln den Blick auf konkrete Problemstellungen. Die Analyse des transformativen Strukturwandels im Zuge der Digitalisierung und der Dekarbonisierung zeigt auf, wie unterschiedlich diese beiden Entwicklungen ablaufen und welche Art der F&I-politischen Begleitung jeweils erforderlich ist. Mit den Quantentechnologien wird

ein Bereich vorgestellt, in dem Deutschland heute eine international starke Position in der Forschung einnimmt. Diese Position gilt es nicht zu verspielen; gezielte F&I-politische Maßnahmen können dabei helfen.

Wie es bei der Expertenkommission bereits Tradition ist, nimmt sie sich in ihrem Gutachten auch Themen an, die nicht im Fokus der aktuellen F&I-Politik stehen. In diesem Jahr ist es das Thema Wasser. Innovationsaktivitäten und geschickt gesetzte Rahmenbedingungen in der Wasserwirtschaft können helfen, trotz der durch den Klimawandel verursachten hohen Volatilitäten beim Wasserdargebot eine sichere Versorgung mit sauberem Wasser zu gewährleisten.

Berlin, 26. Februar 2025



Prof. Dr. Uwe Cantner
(Vorsitzender)



Prof. Dr. Irene Bertschek
(stv. Vorsitzende)



Prof. Dr. Guido Bünstorf



Prof. Dr. Carolin Häussler



Prof. Dr. Dr. h.c. Christoph M. Schmidt



Prof. Dr. Dr. h.c. Friederike Welter

KURZFASSUNG

Kurzfassung

A Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen

A 0 Standortbestimmung: wirtschaftliche Entwicklung schwach und F&I-System unter Druck

Die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands ist besorgniserregend. Bei der Wachstumsdynamik sowie bei Forschung und Innovation (F&I) liegt Deutschland meist weit hinter den führenden großen Industrienationen China, Japan, Südkorea und USA und unter dem EU-Durchschnitt.

Die akute konjunkturelle Schwäche geht mit einer tiefgreifenden strukturellen Schwäche einher. Unter anderem stehen den Auswirkungen, die durch Digitalisierung und Dekarbonisierung induziert werden, in unzureichendem Maße Innovationen und neue Geschäftsmodelle gegenüber, die wirtschaftliche Dynamik und neue Arbeitsplätze mit sich bringen könnten. Aus wirtschaftspolitischer Sicht sind daher keine Konjunkturprogramme herkömmlicher Art angezeigt. Vielmehr muss es vor allem darum gehen, den Strukturwandel für einen Neuaufbruch zu nutzen.

Mit einem gut aufgestellten, sich international in der Spitzengruppe einsortierenden F&I-System könnte Deutschland eine neue Wachstumsdynamik entfachen. Mit der sich daraus ergebenden ökonomischen Stärke würden sich auch die Chancen deutlich verbessern, die anstehenden großen Transformationen bei Digitalisierung und Dekarbonisierung zu bewältigen und die technologische und ökonomische Souveränität Deutschlands und Europas zu sichern. Aus diesem Grund sollte die künftige Bundesregierung in ihrer Strategie für die F&I-Politik neben verschiedenen Schwerpunktbereichen das gesamte F&I-System und dessen Leistungsfähigkeit verstärkt in den Blick nehmen.

A 1 20. Legislaturperiode: F&I-Politik vom proklamierten „Deutschland-Tempo“ weit entfernt

Die Bundesregierung der 20. Legislaturperiode hat sich angesichts der großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu dem Ziel bekannt, die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft durch Digitalisierung und Dekarbonisierung voranzutreiben. Dabei ließ sie keinen Zweifel daran, dass Forschung und Innovation (F&I) und insbesondere eine Neuausrichtung der deutschen F&I-Politik für die Erreichung dieser Ziele von zentraler Bedeutung sind.

Die Umsetzung einer solchen neu ausgerichteten F&I-Politik wurde allerdings durch ein zentrales Defizit gehemmt: Langsamkeit. Diese Langsamkeit resultiert gleichermaßen aus Priorisierungs- und Koordinierungsdefiziten sowie aus Umsetzungsdefiziten. Somit ist die F&I-Politik der Bundesregierung von dem von ihr selbst proklamierten „Deutschland-Tempo“ weit entfernt. Viele der im Koalitionsvertrag angekündigten F&I-politischen Vorhaben wurden nicht umgesetzt. Zudem gelang es der Bundesregierung nicht, den Ausbau der Infrastrukturen für die Transformation wesentlich voranzubringen und die regulatorischen Hemmnisse für Innovationen in ausreichendem Umfang abzubauen.

Die Expertenkommission kommt abschließend zu dem ernüchternden Fazit, dass es der Bundesregierung trotz ihrer hohen F&I-politischen Ambitionen nicht gelungen ist, eine für die Transformationen notwendige Innovationsdynamik zu entfachen.

A 2 21. Legislaturperiode: F&I-Politik schlagkräftiger machen

Ein leistungsfähiges F&I-System ist ein wesentlicher Faktor für die internationale Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, für die Transformation hin zu einer umweltverträglichen Wirtschaftsweise, für die Souveränität bei Schlüssel- und Zukunftstechnologien und für die digitale Transformation. Das deutsche F&I-System genügt diesen Ansprüchen gegenwärtig in nur unzureichender Weise. Daher ist die F&I-Politik gefordert, Maßnahmen zur Stärkung dieses Systems zu ergreifen.

In den vergangenen Jahren hat sich die F&I-Politik dieser Aufgabe zwar schon angenommen, an vielen Stellen mangelt es jedoch an Durchschlagskraft. Wie kann sich das in der kommenden Legislaturperiode ändern? Die Expertenkommission sieht es als erforderlich an, den Politikansatz der Neuen Missionsorientierung weiterzuentwickeln, adäquate Governance-Strukturen der F&I-Politik zu etablieren, die Effektivität und Effizienz von Politikmaßnahmen verstärkt in den Blick zu nehmen sowie Rahmenbedingungen innovationsförderlicher zu gestalten.

A 3 Industriepolitik

Die Industriepolitik erfährt seit einigen Jahren eine Renaissance. Industriepolitische Maßnahmen werden vor allem ergriffen, um Nachhaltigkeit zu fördern, die Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen zu stärken und die technologische und ökonomische Souveränität zu gewährleisten. Da ihr Einsatz mit Risiken verbunden ist, sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

Industriepolitische Maßnahmen sollten nicht ergriffen werden, um Unzulänglichkeiten in anderen Politikfeldern zu kompensieren. Sie können innovationsfreundliche ordnungspolitische sowie institutionelle Rahmenbedingungen nicht ersetzen, sondern lediglich ergänzen.

Wenn flankierend zu horizontalen auch vertikale Maßnahmen der Industriepolitik zum Einsatz kommen, sollten sie primär auf potenziell wachstumsstarke

und forschungsintensive Branchen ausgerichtet werden, um langfristig erfolgreich zu sein und Spillover-Effekte zu erzeugen.

Maßnahmen der vertikalen Industriepolitik sollten lediglich eine katalytische Funktion erfüllen und Unternehmen nicht dauerhaft unterstützen. Ähnlich wie bei der Neuen Missionsorientierung geht es darum, eine Anstoßwirkung zu entfalten und danach die Förderung einzustellen.

Gute Industriepolitik zeichnet sich dadurch aus, dass sie unternehmerisches Handeln fördert. Sie sollte primär die Entstehung und das Wachstum neuer Unternehmen ermöglichen und sich bei der Unterstützung etablierter Unternehmen weitgehend zurückhalten.

B Kernthemen 2025

B 1 Transformativer Strukturwandel durch Digitalisierung und Dekarbonisierung

In Transformationen sind Wirtschaftswachstum und Strukturwandel eng miteinander verknüpft. Aktuell stehen in Deutschland zwei Facetten des Strukturwandels im Mittelpunkt: Die Digitalisierung stärkt die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen; die Umstellung auf eine kohlenstoffneutrale Wirtschaft ist von zentraler Bedeutung für den Übergang hin zu einer umweltverträglichen Wirtschaftsweise. Die Analysen in diesem Kapitel deuten auf erhebliche Rückstände Deutschlands hin, neue digitale Produkte, Prozesse und Geschäftsideen zu entwickeln und umzusetzen. Ein Ausbau digitaler Infrastrukturen und bessere rechtliche Rahmenbedingungen für Datenzugang und -austausch können hier Abhilfe schaffen. Um noch offene Potenziale der Dekarbonisierung besser zu nutzen, gilt es, Klimaschutzmaßnahmen effizient auszugestalten und stärkere Anreize für Innovationen zu setzen.

Statt bestehende Strukturen zu konservieren, sollte die Politik den mit Digitalisierung und Dekarbonisierung verbundenen transformativen Strukturwandel aktiv begleiten. Angesichts der hohen Anteile der Beschäftigten, die in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial oder in umweltschädlichen Berufen großem Anpassungsdruck ausgesetzt sind, sollte sie dabei ein besonderes Augenmerk auf Maßnahmen zur Förderung der Arbeitsmarktmobilität und der Qualifizierung von Beschäftigten legen.

Die Expertenkommission empfiehlt u.a. folgende Maßnahmen:

- Um rechtzeitig Potenzial zur Schaffung neuer Beschäftigung aufzubauen, sollten Forschung und Innovation (F&I), Technologietransfer zwischen

Wissenschaft und Wirtschaft sowie Unternehmensgründungen breit gefördert werden.

- Das Glasfasernetz ist zentral für die Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit von Betrieben und sollte insbesondere in ländlichen Regionen zügig weiter ausgebaut werden. Darüber hinaus sollten die technischen und rechtlichen Voraussetzungen für einen optimalen Datenzugang und Datenverknüpfung geschaffen werden, um Chancen zur Digitalisierung zu eröffnen.
- Die klimapolitischen Maßnahmen sollten effizient ausgestaltet werden, um Anreize für Unternehmen zu schaffen, umweltfreundliche Technologien zu entwickeln, insbesondere durch einen über alle Sektoren hinweg einheitlichen CO₂-Preis. Klimaschutzverträge können innovative Produktionsverfahren unterstützen, wenn ausreichender Wettbewerb um die Förderung eine übermäßige staatliche Kostenbelastung zu vermeiden hilft.
- Regionale Politikmaßnahmen sollten auf die Unterstützung des transformativen Strukturwandels ausgerichtet werden, beispielsweise durch ressortübergreifende Koordination der Maßnahmen sowie die Förderung von Innovationsökosystemen mittels Verbundprojekten.
- Mobilität und Weiterbildung von Beschäftigten sollten gefördert werden. Dabei sollten die Förderinstrumente der Bundesagentur für Arbeit Beschäftigte in besonders durch Automatisierung oder Wegfall umweltschädlicher Tätigkeiten betroffenen Berufen künftig starker auf branchenfremde Übergänge vorbereiten

B2 Quantentechnologien

Neue Quantentechnologien bergen große Innovationspotenziale und gelten als zukünftige Schlüsseltechnologien. Das Quantencomputing verspricht eine deutliche Steigerung der Rechenleistung und könnte so die Lösung hochkomplexer Optimierungsprobleme erheblich beschleunigen oder erstmals überhaupt ermöglichen. Gleichzeitig wird dadurch der Schutz vor Cyberangriffen immer dringender, was die Entwicklung langfristig sicherer Verschlüsselungstechnologien erfordert – ein Bereich, in dem die Quantenkommunikation vielversprechende Ansätze bietet. Die Quantensensorik verbessert die Empfindlichkeit und Präzision von Messtechniken und bildgebenden Verfahren erheblich.

Viele dieser neuen Quantentechnologien stehen noch am Anfang der Entwicklung. Deutschland befindet sich in einer starken Ausgangsposition, die es im Verbund mit den EU-Partnern zu sichern gilt. So kann erreicht werden, dass deutsche Unternehmen im globalen Wettbewerb mit den USA und China wettbewerbsfähig bleiben und Deutschland langfristig technologisch souverän sowie auf sicherheitspolitische Bedrohungen gut vorbereitet ist.

Die Expertenkommission empfiehlt daher u.a. folgende Maßnahmen:

- Mit einer nationalen Quantenstrategie sollte die Bundesregierung einen kohärenten Rahmen für die Weiterentwicklung von Quantentechnologien schaffen. Um langfristige Investitionen in laufende und zukunftsweisende

Projekte zu begründen, sollte sie zeitnah ein ambitioniertes Folgekonzept für das 2026 auslaufende Handlungskonzept Quantentechnologien entwickeln und zügig in die Umsetzung bringen.

- Der Aufbau eines F&I-Quantenökosystems sollte dabei konsequent europäisch gedacht werden. Unter anderem sollten nationale Kompetenzen und Anstrengungen im Quantencomputing europaweit gebündelt werden, um ein Quantencomputing „Made in Europe“ zu ermöglichen und Abhängigkeiten von außereuropäischen Großunternehmen mittel- und langfristig zu vermeiden.
- Forschung und Entwicklung in den Quantentechnologien bedürfen gut vernetzter Akteure. Auf nationaler Ebene sollten daher die bestehenden regionalen F&I-Cluster ausgebaut und in eine nationale Strategie integriert werden. Dabei sollte die Vernetzung der Cluster untereinander aktiv unterstützt, Synergiepotenziale zwischen ziviler und militärischer FuE genutzt und einem breiten Kreis an Akteuren überregional ein niedrigschwelliger Zugang zur Forschungs- und Recheninfrastruktur ermöglicht werden.
- Der Transfer von Erkenntnissen aus der grundlagen- und anwendungsorientierten Quantenforschung in innovative, marktfähige Produkte sollte durch staatliche Ankerkundenverträge, die Schaffung eines unterstützenden Umfelds für Quanten-Start-ups und Maßnahmen zur Stärkung des Risikokapitalmarktes aktiv gefördert werden.

B3 Innovationen in der Wasserwirtschaft

Wasser dient Menschen, Tieren und Pflanzen als Lebensgrundlage. Obwohl Deutschland ein wasserreiches Land ist, kommt es aufgrund des Klimawandels in Zukunft häufiger regional und saisonal zu Wasserknappheiten, die Nutzungskonflikte unter und zwischen privaten, gewerblichen und landwirtschaftlichen Verbrauchern zur Folge haben. Außerdem müssen die Wasserinfrastrukturen an häufiger auftretende Extremwetterereignisse wie Trockenperioden oder Starkregen angepasst werden. Auch die Gewässerqualität wird beeinträchtigt infolge des Einsickerns von Düngemitteln und Pestiziden aus der Landwirtschaft in das Grundwasser und durch Medikamentenrückstände sowie Mikroplastik, die bislang nur unzureichend aus den Abwässern geklärt werden.

Wasserwirtschaftliche Innovationen können helfen, diesen Herausforderungen zu begegnen. Im internationalen Vergleich zeigt sich Deutschland hier in einer starken Position. Die Adoption dieser Innovationen stößt jedoch in der heimischen Wasserwirtschaft auf zahlreiche Hemmnisse, die u.a. auf ihrer starken Fragmentierung, einer hohen Risikoaversion und einer starken Fokussierung auf die Einhaltung vorgegebener technischer Standards beruhen.

Die Expertenkommission empfiehlt daher u.a. folgende Maßnahmen:

- Die Expertenkommission unterstützt die in der Nationalen Wasserstrategie vorgesehene Erprobung innovativer Konzepte in Reallaboren. Dort sollten neben technischen Lösungen institutionelle Innovationen wie die Anpassung der Wasserentnahmerechte oder der Wasserhandel erprobt werden.

- Für ein nachhaltiges Wassermanagement sind Daten zu den vergebenen Wasserrechten und den tatsächlichen Wasserentnahmen erforderlich. Die Erfassung in einem umfassenden und transparenten Wasserregister, wie in der nationalen Wasserstrategie angekündigt, ist zügig und in digitaler Form umzusetzen.
- Die Wasserentnahmeentgelte müssen derart angepasst werden, dass sie die Knappheit von Wasser insbesondere in Zeiten längerer Trockenheit und damit die externen Kosten der Wasserentnahme berücksichtigen.
- Die erweiterte Herstellerverantwortung der Industrie sollte schnell in nationales Recht überführt und umgesetzt werden.
- Die Ausbringung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln sollte nach dem Vorbild Dänemarks mit einer Abgabe belegt werden, damit die Verursacher die Schadstoffbelastung des Wassers verringern.
- Um stärkere Anreize für die Adoption und Entwicklung von Neuerungen zu setzen, sollten Konzepte und Maßnahmen entworfen werden, die es für kleinere Versorgungseinheiten attraktiver machen, sich zu größeren Versorgungseinheiten zusammenzuschließen.

A

AKTUELLE ENTWICKLUNGEN UND HERAUS- FORDERUNGEN



A 0 Standortbestimmung: wirtschaftliche Entwicklung schwach und F&I-System unter Druck

A 0-1 Wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands besorgniserregend

Wachstumsdynamik gering

Mit Beginn des Ukrainekriegs hat die Erholung der deutschen Volkswirtschaft von der Corona-Krise an Schwung verloren. Betrug das Wachstum des realen BIP im Jahr 2022 gegenüber dem Vorjahr noch 1,4 Prozent, so ist es in den beiden darauffolgenden Jahren nicht über eine Stagnation hinausgekommen.¹ Bei der Wachstumsdynamik liegt Deutschland weit hinter den führenden großen Industrienationen (China, Japan, Südkorea und USA) und unter dem EU-Durchschnitt. Prognosen für die Jahre 2025 und 2026 gehen von einer leichten Erholung der deutschen Wirtschaft mit einem Wachstum von lediglich etwa 1,0 Prozent aus. Diese Wachstumsschwäche ist offenbar zu einem guten Teil nicht konjunkturell, sondern strukturell bedingt: Projektionen des Produktionspotenzials wurden in den vergangenen Jahren mehrmals nach unten korrigiert.²

Bruttoanlageinvestitionen sinkend

Ein Blick auf die Entwicklung der Bruttoanlageinvestitionen zeigt, dass diese seit dem Jahr 2023 rückläufig sind. Für die Jahre 2025 und 2026 werden bestenfalls moderate positive Wachstumsraten erwartet.³ Einer DIHK-Umfrage⁴ aus dem Herbst 2024 zufolge plant jedes dritte Unternehmen, seine Investitionen im Jahr 2025 zurückzufahren; der Ifo-Geschäftsklimaindex⁵ fiel im Dezember 2024 auf den tiefsten Stand seit dem von der Corona-Krise geprägten Jahr 2020.⁶ Vieles deutet darauf hin, dass die für Deutschland so wichtigen Investitionen entweder gestoppt, verschoben oder ins Ausland verlagert werden.

Exporte rückläufig

Über lange Zeit war Deutschland die weltweit führende Exportnation. Dass es mittlerweile von China überholt wurde, ist aufgrund dessen schierer Größe nicht überraschend. Eine Verringerung des deutschen Welthandelsanteils sollte daher nicht zu Besorgnis führen, solange das Exportvolumen weiterhin steigt. Allerdings ging das Exportvolumen in den Jahren 2023 und 2024 zurück.⁷ Die Ursachen dafür sind vielfältig. Der Krieg in der Ukraine sowie viele weitere geopolitische Krisen haben sich auch negativ auf den internationalen Handel ausgewirkt. Dennoch muss die grundsätzliche Frage gestellt werden, ob deutsche Produkte und Technologien international noch wettbewerbsfähig sind.

Im Jahr 2023 entfielen über 60 Prozent der deutschen Exporte auf die folgenden Bereiche: Kraftwagen und Kraftwagenteile (17,2 Prozent), Maschinen (14,3 Prozent), chemische Erzeugnisse (9,0 Prozent), Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse (8,6 Prozent), pharmazeutische und ähnliche Erzeugnisse (7,2 Prozent) und elektrische Ausrüstungen (7,2 Prozent). Ein Blick auf die Automobilindustrie und insbesondere auf das Segment der PKW der Kompakt-Klasse⁸ zeigt, dass andere Volkswirtschaften bei Fahrzeugen mit nicht-fossilen Antriebsaggregaten mittlerweile das Ruder übernommen haben. Automobilunternehmen aus China und Südkorea sind hier genauso zu nennen wie solche aus den USA.

Die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Autobauer und ihrer Zulieferer steht auf dem Spiel. Diese Entwicklung ist besorgniserregend. Ähnlich verhält es sich in anderen Branchen, wenn auch aus anderen Gründen. So werden die energieintensiven Industrien wie Chemie und Metallerzeugung und -verarbeitung durch die hohen Energiekosten belastet. Ein weiterer Verlust an Wettbewerbsfähig-

keit der deutschen Unternehmen ist zu befürchten und nährt die Sorge vor der „Deindustrialisierung Deutschlands“. Eine strukturelle Neuausrichtung in diesen Bereichen wird immer dringlicher.

Unternehmensschließungen auch in forschungs- und wissensintensiven Bereichen zunehmend

Die schlechte wirtschaftliche Lage schlägt sich zunehmend in Unternehmensschließungen nieder. Deren Anzahl ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen: in Deutschland zwischen 2022 und 2023 (zwischen 2021 und 2022) um durchschnittlich 2,3 Prozent (0,3 Prozent) und im Verarbeitenden Gewerbe weit überdurchschnittlich um 8,7 Prozent (4,4 Prozent). Betrachtet man die forschungsintensiven Bereiche etwas genauer, so stellt man zwischen 2022 und 2023 (zwischen 2021 und 2022) folgende Zunahmen der Schließungsraten fest: forschungsintensives Verarbeitendes Gewerbe 12,3 Prozent (7,2 Prozent),⁹ Elektrotechnik und Maschinenbau 8,8 Prozent (17,9 Prozent), Chemie und pharmazeutische Industrie 6,8 Prozent (22,2 Prozent), technologieintensive Dienstleistungen 8,0 Prozent (2,7 Prozent) und Fahrzeugbau 4,9 Prozent (minus 4,0 Prozent).¹⁰

Umfassender Stellenabbau geplant

Wenn nicht mit Schließungen, reagieren Unternehmen in Deutschland mit Entlassungen von Beschäftigten. Oft ist der Verlust von Marktanteilen dafür ein Grund. Als besonders betroffen erweisen sich die Automobil- und die Automobilzulieferbranche: Volkswagen plant einen Abbau von rund 10.000 Beschäftigten, Ford plant, etwa 2.900¹¹ und Audi 4.500 Stellen abzubauen; bei den Automobilzulieferern Continental und ZF Friedrichshafen ist ein Abbau von 13.000 respektive 14.000 Stellen vorgesehen. Doch sind auch Unternehmen in anderen Branchen gezwungen, Stellenabbau zu betreiben, wie Bayer und BASF in Chemie und Pharma, thyssenkrupp in der Stahlindustrie sowie Unternehmen im Maschinenbau, der Elektrotechnik und der Energiebranche.¹²

Arbeitsmarkt unter Belastungen

Mit diesen Entwicklungen sind wenig optimistische Erwartungen für den Arbeitsmarkt verbunden. Nach den Jahren annähernder Vollbeschäftigung wird die Zahl der Erwerbstätigen künftig wohl eher ab- und die Zahl der Arbeitslosen zunehmen. Für

2025 und 2026 werden zwischen 2,7 und gut drei Millionen Arbeitslose prognostiziert.¹³ Selbst die demografische Alterung und der damit einhergehende Fachkräftemangel werden hier nur für wenig Linderung sorgen, denn es zeichnen sich mit Blick auf die neuen Anforderungen an die Kompetenzen der Beschäftigten schwer zu überbrückende Bildungs- und Qualifikationslücken ab. Zudem werden viele traditionelle Aufgaben durch digitale Technologien ersetzt, während gleichzeitig Ingenieurinnen und Ingenieure, IT-Expertinnen und -Experten sowie Handwerkerinnen und Handwerker fehlen.¹⁴

Konjunktur- und Strukturprobleme Hand in Hand

Insgesamt zeichnen die obigen Indikatoren für Deutschland durchgehend das Bild einer geringen Entwicklungs- und Wachstumsdynamik. Die schwache Investitionsneigung lässt auf wenig Zuversicht der potenziellen Investoren sowie auf ein hohes Maß an Unsicherheit schließen. Stellenabbau und Unternehmensschließungen reflektieren, welche erheblichen Strukturveränderungen u. a. durch neue Technologien und Wettbewerber aus anderen Ländern ausgelöst werden. Das gilt nicht nur für die Automobilindustrie, sondern auch für andere Branchen wie Chemie, Maschinenbau, Elektroindustrie sowie verschiedene Dienstleistungsbranchen.

Die akute konjunkturelle Schwäche geht mit einer tiefgreifenden strukturellen Schwäche einher. Unter anderem stehen den Auswirkungen, die durch Digitalisierung und Dekarbonisierung induziert werden, in unzureichendem Maße Innovationen und neue Geschäftsmodelle gegenüber, die wirtschaftliche Dynamik und neue Arbeitsplätze mit sich bringen könnten. Aus wirtschaftspolitischer Sicht sind daher Konjunkturprogramme herkömmlicher Art nicht angezeigt. Vielmehr muss es vor allem darum gehen, den Strukturwandel für einen Neuaufbruch zu nutzen. Zentrale Bedeutung kommt dabei der Forschungs- und Innovationspolitik (F&I-Politik) zu, deren Hauptaugenmerk den Innovationsaktivitäten im Speziellen und dem F&I-System im Allgemeinen gilt.

A 0-2 Leistungsfähigkeit des deutschen F&I-Systems mit Luft nach oben

Eine wesentliche Quelle der wirtschaftlichen Stärke und Dynamik Deutschlands liegt in seinem F&I-System. Dort werden die wissenschaftlichen Grund-

lagen für Innovationen gelegt und die Kompetenzen und Kenntnisse für eine erfolgreiche Innovations-tätigkeit aufgebaut. Doch die Leistungsfähigkeit des deutschen F&I-Systems hat noch Luft nach oben.

Wachstum der FuE-Ausgaben unter EU-Durchschnitt

Ausgaben für Forschung und Entwicklung (FuE) bilden eine zentrale Grundlage für zukünftige Innovationserfolge. Ein Blick auf die Veränderung der Bruttoinlandsausgaben für FuE¹⁵ in verschiedenen Ländern zeigt, dass Deutschland zwischen 2019/2020 und 2021/2022 mit einer Wachstumsrate von 2,6 Prozent deutlich hinter China mit 7,8 Prozent, Südkorea mit 5,2 Prozent und den USA mit 6,0 Prozent zurückliegt. Selbst gegenüber den EU-27, die im Durchschnitt eine Wachstumsrate von immerhin 3,5 Prozent aufweisen, fällt Deutschland ab – und liegt abgeschlagen ungefähr auf der Höhe von Japan mit 2,5 Prozent.

FuE-Intensität stagnierend

Die FuE-Intensität errechnet sich aus dem Anteil der FuE-Ausgaben von Unternehmen, Hochschulen und Staat am Bruttoinlandsprodukt und gilt als Maß für die Bereitschaft einer Volkswirtschaft, in FuE zu investieren. Deutschlands FuE-Intensität verharrte im Zeitraum von 2019 bis 2023 in einem Korridor zwischen 3,07 und 3,11 Prozent; für die EU-27 zeigt sich eine vergleichbare Stagnation mit einer FuE-Intensität in einem Korridor zwischen 2,21 und 2,28 Prozent.¹⁶ Andere große Volkswirtschaften konnten hingegen ihre FuE-Intensität im Zeitraum von 2019 bis 2022 (aktueller Rand) deutlich steigern, wie China um 0,17 Prozentpunkte auf 2,50 Prozent, Japan um 0,10 Prozentpunkte auf 3,35 Prozent, Südkorea um 0,29 Prozentpunkte auf 4,73 Prozent oder die USA um 0,25 Prozentpunkte auf 3,54 Prozent.¹⁷

Patentanmeldungen wenig dynamisch

Zur Bewertung der Ergebnisse aus FuE-Tätigkeiten können Patentanmeldungen herangezogen werden. Transnationale Patentanmeldungen als Indikator eignen sich dafür, die unterschiedliche Qualität der Patente in verschiedenen Ländern zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich um Patentanmeldungen, die am Europäischen Patentamt für europäische Länder oder als Patent Cooperation Treaty (PCT)-Anmeldung für außereuropäische Länder

eingereicht werden. Betrachtet man ihre Entwicklung von 2018 bis zum aktuellen Rand 2021, dann stellt man für Deutschland mit minus 1,3 Prozent eine negative Entwicklung fest. Bei den Vergleichsländern hingegen sind im Wesentlichen positive Wachstumsraten zu verzeichnen, wie bei China mit 4,9 Prozent, bei Südkorea mit 3,5 Prozent oder bei den USA mit 0,9 Prozent. Bei Japan und den EU-27 hingegen zeigen sich mit minus 1,0 Prozent und minus 0,5 Prozent negative Wachstumsraten.¹⁸

Technologischer Rückstand bei zahlreichen Schlüssel- und Zukunftstechnologien anwachsend

Bei den herkömmlichen Indikatoren zu F&I hat Deutschland gegenüber den anderen bei F&I-Tätigkeiten führenden Ländern an Rangplätzen eingebüßt, so bei den FuE-Ausgaben und den Patenten, aber auch bei der FuE-Intensität. Allerdings spiegeln diese Indikatoren nur einen Teil der relevanten Entwicklungen wider, da sie den bereits stattfindenden technologischen Richtungswechsel bei den Innovationstätigkeiten nicht erfassen. Ein solcher Richtungswechsel vollzieht sich u. a. über wichtige Schlüssel- und Zukunftstechnologien. Hierzu gehört beispielsweise die künstliche Intelligenz (KI), bei deren Entwicklung und Anwendung Deutschland bereits hinter die USA und China zurückgefallen ist.¹⁹ Die Gefahr, dass Deutschland hier – ähnlich wie bei anderen digitalen Technologien in der Vergangenheit – nicht in der Spitzengruppe mithalten kann, ist groß.

Betrachtet man über die digitalen Technologien hinaus noch weitere Schlüsseltechnologien wie die Biotechnologie, die Materialwissenschaften und die Produktionstechnologien, dann zeigen sich in vielen Fällen sehr ähnliche Probleme. Bei den meisten zukunftsweisenden Schlüsseltechnologien weist Deutschland beim Aufbau wissenschaftlicher Kompetenz und ökonomisch relevanter Ideen gegenüber Volkswirtschaften wie China und Südkorea eine deutlich geringere Dynamik auf, gegenüber Japan und den USA ist der Abstand nicht ganz so deutlich. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich in vielen Fällen auch kleinere Volkswirtschaften wie Finnland, Schweden, die Schweiz oder Singapur in führende Positionen hinein entwickelt haben.²⁰

Innovatorenquote bei den forschungs- und wissensintensiven Branchen stark rückläufig

Die Innovatorenquote misst den Anteil der Unternehmen mit mindestens einer Produkt- oder Prozessinnovation in den vergangenen drei Jahren. Sie ist ein Indikator für die Innovationsbeteiligung der Unternehmen oder für die Bereitschaft der Unternehmen, Innovationsaktivitäten durchzuführen. In Deutschland ist die Innovatorenquote seit 2018 (seinerzeit mit einem Wert von 60,5 Prozent)²¹ rückläufig und erreichte im Jahr 2023 nur noch einen Wert von 51,0 Prozent. Zwar waren die Werte in der FuE-intensiven Industrie (68,4 Prozent) und in den wissensintensiven Dienstleistungen (59,3 Prozent) höher als in den sonstigen Industrien (47,8 Prozent) und den sonstigen Dienstleistungen (43,9 Prozent). Allerdings verzeichnen die FuE-intensiven Industrien seit 2018 einen deutlichen Rückgang der Innovatorenquote um rund 12 Prozentpunkte. Bei den wissensintensiven Dienstleistungen sind es immerhin noch rund 7 Prozentpunkte.²²

In verschiedenen Innovationsrankings zurückgefallen

Neben den Einzelindikatoren weisen Kompositindikatoren, die sich aus einer Reihe von Einzelindikatoren zusammensetzen, auf eine zunehmende Schwäche des deutschen F&I-Systems hin.²³ Der von BDI, ISI, ZEW und Roland Berger für 35 ausgewählte Länder erstellte Innovationsindikator 2024²⁴ setzt sich aus den Dimensionen „Innovationen hervorbringen“, „Zukunftsfelder durch Schlüsseltechnologien entwickeln“ und „Nachhaltig wirtschaften“ zusammen. Er zeigt für Deutschland in der Zusammenschau dieser Dimensionen ein eher mäßiges Bild. Gegenüber dem Innovationsindikator 2023 hat sich Deutschland bei der Dimension „Innovationen hervorbringen“ um zwei Rangplätze von 10 auf 12 verschlechtert. Bei den Schlüsseltechnologien liegt Deutschland wie im Vorjahr nur auf Platz 7. Bei der Dimension „Nachhaltig wirtschaften“ gelang gegenüber 2023 ebenfalls keine Verbesserung, und Deutschland verblieb auf Rang 4.²⁵ Der Global Innovation Index 2024 der WIPO kommt auf der Grundlage eines anderen Indikatorensets zu einem ähnlichen Ergebnis²⁶ und auch das European Innovation Scoreboard 2024 stützt das Bild einer zunehmenden Schwäche des deutschen F&I-Systems.²⁷

F&I-System mit Schwächen

Die oben betrachteten Dimensionen des deutschen F&I-Systems weisen auf deutliche Schwächen hin. Bei der Bereitschaft, in FuE zu investieren, bei der Generierung neuer, ökonomisch relevanter Ideen sowie bei der Entwicklung neuer Schlüsseltechnologien fällt das deutsche F&I-System international zurück. China, Südkorea und die USA, teilweise auch Japan, zeigen zumeist eine höhere Leistungsfähigkeit. Hinzu kommen leistungsstarke kleinere F&I-Systeme wie die Finnlands, Schwedens, der Schweiz und Singapurs. Und es zeigt sich eine Reihe starker aufstrebender Volkswirtschaften aus dem ostasiatischen und arabischen Raum, die vor allem bei digitalen Technologien an der Weltspitze mitspielen werden.

Diese Entwicklungen erhöhen nicht nur den Druck auf das deutsche F&I-System selbst, sondern stellen auch den innovationsgetriebenen strukturellen Wandel vor große Herausforderungen – mit allen Konsequenzen für die wirtschaftliche Entwicklungs- und Wachstumsdynamik.

Mit einem gut aufgestellten, sich international in der Spitzengruppe einsortierenden F&I-System und der sich daraus ergebenden ökonomischen Stärke könnten sich die anstehenden großen Transformationen bei Digitalisierung und Dekarbonisierung voraussichtlich technologisch und ökonomisch souverän und deutlich besser bewältigen lassen. Aus diesem Grund sollte die künftige Bundesregierung in ihrer Strategie für die F&I-Politik neben verschiedenen Schwerpunktbereichen das gesamte F&I-System und dessen Leistungsfähigkeit verstärkt in den Blick nehmen. Das Gutachten 2025 der Expertenkommission widmet sich dieser Problematik insbesondere in den Kapiteln A 1, A 2 und A 3. Es folgen in Kapitel B 1 eine Schwerpunktanalyse zum Thema Transformativer Strukturwandel durch Digitalisierung und Dekarbonisierung, in Kapitel B 2 eine vergleichende Analyse der deutschen Position im Bereich der Quantentechnologien und in Kapitel B 3 eine Untersuchung zum Thema Innovationen in der Wasserwirtschaft.

A 1 20. Legislaturperiode: F&I-Politik vom proklamierten „Deutschland-Tempo“ weit entfernt

A 1-1 Transformativer Richtungswechsel angekündigt – aber nicht vollzogen

Die Bundesregierung der 20. Legislaturperiode hat sich angesichts der großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu dem Ziel bekannt, die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft durch Digitalisierung und Dekarbonisierung voranzutreiben. Dabei ließ sie keinen Zweifel daran, dass Forschung und Innovation (F&I) und insbesondere eine Neuausrichtung der deutschen F&I-Politik für die Erreichung dieser Ziele von zentraler Bedeutung sind.²⁸ Die Expertenkommission bewertet die damit verbundene grundsätzliche Neuausrichtung der F&I-Politik der Bundesregierung auf den transformativen Wandel positiv.²⁹

Die in 2023 verabschiedete Zukunftsstrategie Forschung und Innovation dient als übergeordneter, ressortübergreifender Handlungsrahmen dieser Politik. Auf der nachgeordneten Ebene hat die F&I-Politik der Bundesregierung in vielen, wenngleich nicht allen, Fällen die richtigen Themen und Ziele in den Blick genommen: Positiv zu bewerten sind aus Sicht der Expertenkommission die Förderung von Schlüsseltechnologien, die Internationalisierung des Wissenschaftssystems, die Fachkräftegewinnung, die Förderung von Sprunginnovationen, die Unterstützung von Innovationsaktivitäten von kleinen und mittleren Unternehmen, die Verbesserung des Zugangs zu Forschungsdaten und die Förderung von Start-ups.

Die Umsetzung einer solchen neuausgerichteten F&I-Politik wurde allerdings durch ein zentrales Defizit gehemmt: Langsamkeit. Diese Langsamkeit resultiert gleichermaßen aus Priorisierungs- und Koordinierungsdefiziten sowie aus Umsetzungsdefiziten. Somit ist die F&I-Politik der Bundesregierung von dem von ihr selbst proklamierten „Deutschland-Tempo“³⁰ weit entfernt. Viele der im Koalitionsvertrag angekündigten F&I-politischen

Vorhaben wurden nicht umgesetzt. Dazu zählen die Deutsche Agentur für Transfer und Innovation (DATI), das Forschungsdatengesetz, das Dateninstitut, das Wissenschaftszeitvertragsgesetz sowie eine unabhängige Stiftung für Wissenschaftsjournalismus.³¹

Darüber hinaus ist es der Bundesregierung nicht gelungen, ihre Zukunftsstrategie ausreichend mit Leben zu füllen. Hierfür sind verschiedene Gründe zu nennen:

- Es wurde versäumt, eine klare Priorisierung von Politikfeldern und Technologien vorzunehmen, Zukunftsbilder zu entwerfen und sie durch detaillierte Teilstrategien zu unterlegen. Dies führt zu Planungsunsicherheiten in Wirtschaft und Gesellschaft, die sich wiederum negativ auf langfristige Innovations- und Investitionsvorhaben der Unternehmen auswirken können. In der Folge können Innovationsvorhaben ausbleiben, sich erheblich bei der Umsetzung verzögern oder ins Ausland verlagert werden.
- Die in der Zukunftsstrategie formulierten sechs großen Handlungsfelder, die sogenannten Missionen, sind viel zu breit angelegt. Auch deshalb ist es nicht gelungen, daraus ressortübergreifende Ziele abzuleiten, diese zu priorisieren, mit Roadmaps zu versehen und Maßnahmen zu entwickeln.
- Mit der Formierung von ressortübergreifenden Missionsteams und dazugehörigen Begleitgremien wurden zwar Strukturen geschaffen, für die sich die Expertenkommission mehrfach eingesetzt hatte. Dennoch ist die Bundesregierung über die Phase des organisatorischen Aufbaus kaum hinausgekommen und konkrete operative Schritte zur Umsetzung missions-

orientierter Maßnahmen stehen noch weitgehend aus.

- Der Bundesregierung ist es nicht gelungen, die einzelnen Ressorts davon zu überzeugen, ihre Strategien und Aktionspläne mit den in der Zukunftsstrategie formulierten Missionen für die Ausgestaltung konkreter F&I-politischer Projekte zu verzahnen und damit die beabsichtigte Lenkungswirkung der Zukunftsstrategie anzuerkennen.
- Eine Reihe der in der Zukunftsstrategie angekündigten neuen Projekte wurde nicht weiterverfolgt. So sind beispielsweise die Transferbrücken und Innovationsregionen, die die Bundesagentur für Sprunginnovationen (SPRIND) und die DATI ergänzen sollten, nicht oder kaum über die Ankündigungsphase hinausgelangt.

Vor diesem Hintergrund stellt die Expertenkommission fest, dass die avisierte Neuausrichtung der deutschen F&I-Politik auf der Stelle tritt.

A 1-2 Ausbau der Infrastrukturen für die Transformation nicht wesentlich vorangebracht

Für die Digitalisierung und Dekarbonisierung unerlässliche Infrastrukturen weisen nach wie vor Defizite auf, die die dringend notwendigen Transformationen erschweren.

- Am offensichtlichsten ist dies bei der im internationalen Vergleich rückständigen Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung (vgl. Kapitel A 2 und B 1). Selbst mit dem im Juli 2024 in Kraft getretenen Onlinezugangs-Änderungsgesetz gelang es Bund, Ländern und Kommunen nicht, zentrale Defizite wie die zu komplizierten Strukturen und Zuständigkeiten zu überwinden.³²
- Auch die von der Expertenkommission seit Jahren beklagten Defizite bei der flächendeckenden Versorgung mit schnellen, leistungsfähigen Internetverbindungen sind nach wie vor nicht ausgeräumt. Trotz eines partei- und institutionenübergreifenden Bekenntnisses für ein leistungsstarkes Internet schneidet Deutschland beim Ausbau der Breitbandinfra-

struktur im innereuropäischen Vergleich weiterhin schlecht ab.³³

- Darüber hinaus erschwert und verteuert der stockende Ausbau der Stromversorgungsinfrastruktur und Wasserstoffinfrastruktur die politisch gewollte Energiewende.³⁴

A 1-3 Regulatorische Innovationshemmnisse nicht ausreichend abgebaut

Regulatorische Anforderungen gehören inzwischen zu den größten Hindernissen für F&I.³⁵

- Zulassungs- und Genehmigungsverfahren im Rahmen von F&I-Projekten sind oft mit hohen regulatorischen Hürden und Bürokratiekosten verbunden. Zwar gingen die Bürokratiekosten, d. h. die Kosten, die den Unternehmen durch Informationspflichten aller Art entstehen, laut Bürokratiekostenindex im Verlauf der Legislaturperiode leicht zurück. Im gleichen Zeitraum stieg jedoch der generelle Erfüllungsaufwand, d. h. die Kosten und der Zeitaufwand, die durch das Befolgen rechtlicher Vorschriften des Bundes entstehen, von rund 1,4 Milliarden auf etwa 7,3 Milliarden Euro an.³⁶
- Die Bundesregierung hat 2024 mit dem Medizinforschungsgesetz die regulatorischen Anforderungen für die Entwicklung, Zulassung und Herstellung von Arzneimitteln verbessert.³⁷ In anderen unmittelbar für das F&I-System relevanten Bereichen wie der Governance der Projektträger, der Forschungszulage oder der Regulierung der grünen Gentechnik wurden hingegen keine oder kaum spürbare Entlastungen und Vereinfachungen vorgenommen. Gleiches gilt für die Administration von F&I-Fördermitteln. So ist es weiterhin keine Seltenheit, dass sich die Bewilligung von Forschungsförderanträgen ein dreiviertel Jahr³⁸ und in manchen Fällen sogar zwei Jahre hinzieht.
- Fehlender Wille, regulatorische Hürden abzubauen, zeigt sich symptomatisch am Beispiel der SPRIND: Obwohl die erforderlichen Schritte zur Entfesselung der SPRIND klar definiert wurden und die Kompetenzen hierfür allein beim Bund lagen, fehlte der Mut, der

SPRIND die notwendige Unabhängigkeit von der Politik und den Fristigkeiten der Bundeshaushaltsordnung zu verschaffen.³⁹

Die Expertenkommission kommt abschließend zu dem ernüchternden Fazit, dass es der Bundesregierung trotz ihrer hohen F&I-politischen Ambitionen nicht gelungen ist, eine für die Transformationen notwendige Innovationsdynamik zu entfachen.

A 2 21. Legislaturperiode: F&I-Politik schlagkräftiger machen

Ein leistungsfähiges F&I-System ist ein wesentlicher Faktor für die internationale Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, für die Transformation hin zu einer umweltverträglichen Wirtschaftsweise, für die Souveränität bei Schlüssel- und Zukunftstechnologien und für die digitale Transformation. Das deutsche F&I-System genügt diesen Ansprüchen gegenwärtig in nur unzureichender Weise. Daher ist die F&I-Politik gefordert, Maßnahmen zur Stärkung dieses Systems zu ergreifen.

Zwar hat sich die F&I-Politik in den vergangenen Jahren dieser Aufgabe angenommen und die Expertenkommission hat dies in ihren Jahresgutachten gewürdigt. Jedoch hat die Expertenkommission auch festgestellt, dass es der F&I-Politik an vielen Stellen an Durchschlagskraft mangelt (vgl. auch Kapitel A 1). Wie lässt sich das in der kommenden Legislaturperiode ändern?

A 2-1 Politikansatz der Neuen Missionsorientierung weiterentwickeln

Der Politikansatz der Neuen Missionsorientierung (vgl. Box A 2-1) unterstützt dabei, zur Bewältigung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen beizutragen und transformativen Wandel anzustoßen.⁴⁰ Nicht das gesamte Themen- und Technologiespektrum der F&I-Politik muss und kann allerdings mit Missionen abgedeckt werden.⁴¹

In der 19. Legislaturperiode führte die damalige Bundesregierung mit der Hightech-Strategie 2025 Missionen als neues Element in die deutsche F&I-Politik ein.⁴² Die scheidende Bundesregierung hat in der 20. Legislaturperiode mit der Zukunftsstrategie Forschung und Innovation⁴³ zwar für sich in Anspruch genommen, einen missionsorientierten Ansatz zu verfolgen. Sie ist dabei jedoch kaum über strukturelle Maßnahmen hinausgekommen (vgl. Kapitel A 1).

Die Expertenkommission spricht sich dafür aus, in der F&I-Strategie der kommenden Bundesregierung den missionsorientierten Ansatz weiterzuentwickeln und bestehende Schwächen – wie im Folgenden dargelegt – zu überwinden. Hilfreich können hierbei auch die Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Begleitung der Hightech-Strategie 2025 sowie der Abschlussbericht des Forums #Zukunftsstrategie sein.⁴⁴

Kreative Kräfte der Marktakteure nutzen

Die Expertenkommission spricht sich für eine marktorientierte Version der Neuen Missionsorientierung aus.⁴⁵ Auf die Festlegung bestimmter Problemlösungen sollte zugunsten eines offenen Ansatzes, der mehrere Technologien und Lösungswege zulässt, verzichtet werden. Auf diese Weise werden die kreativen Kräfte der Marktakteure genutzt. Wenn deren Suche nach neuen Technologien und Lösungsansätzen aufgrund von Pfadabhängigkeiten oder mangels Nachfrage gehemmt sind, spricht

Box A 2-1 Neue Missionsorientierung

Die Neue Missionsorientierung ist ein Ansatz der F&I-Politik, der auf die Bewältigung großer gesellschaftlicher Herausforderungen gerichtet ist und auf einen transformativen Wandel der Wirtschaft und Gesellschaft abzielt.⁴⁶ Dazu werden sogenannte Missionen formuliert, die konkrete Transformationsziele spezifizieren und die durch

F&I-politische sowie komplementäre politische Maßnahmen umgesetzt werden sollen. Bei der Umsetzung von Missionen geht es darum, innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens und Budgets neue Problemlösungen zu entwickeln und zu nutzen. In der Regel können Missionen nicht allein durch F&I-politische Impulse erfüllt werden, sondern es bedarf vielmehr auch Maßnahmen in anderen Politikfeldern.

man von Transformationsversagen. Politische Eingriffe über eine angebotsorientierte katalytische Anschubförderung oder mittels nachfrageorientierter Mechanismen können hier sinnvolle Unterstützung leisten.

Interministerielle Koordination stärken

Missionsorientierte Politik ist dadurch gekennzeichnet, dass sie unterschiedliche Politikfelder betrifft. Um missionsorientierte Politik erfolgreich umzusetzen, bedarf es sowohl auf strategischer als auch auf operativer Ebene eines hohen Maßes an interministerieller Koordination.

- Missionen können dann ihre volle Wirkung entfalten, wenn sie im Einklang mit den Politikzielen der beteiligten Ressorts stehen und von den Hausspitzen mit Nachdruck verfolgt werden. Die mit einer missionsorientierten Politik angestrebten Transformationsziele und die großen strategischen Linien sollten deshalb politikfeldübergreifend auf Ebene der Hausspitzen entwickelt werden. Diese Aufgaben können weder in den Kabinettsitzungen noch im Rahmen der üblichen Ressortabstimmung geleistet werden. Hierfür sollte ein geeignetes Format etabliert werden.⁴⁷
- Auf der operativen Ebene wurde mit den ressortübergreifenden Missionsteams bereits ein neues Format geschaffen, das in der kommenden Legislaturperiode fortgeführt und weiterentwickelt werden muss. Die anspruchsvollen Aufgaben der Missionsteams erfordern einen ausreichenden Spielraum für agiles Politikhandeln. Dies beinhaltet etwa ausreichende Entscheidungskompetenzen und eigene Budgets.

Missionen fokussieren

In der Zukunftsstrategie werden sechs Handlungsfelder formuliert, die als Missionen bezeichnet werden. Doch um tatsächlich als Missionen zu gelten, sind diese Felder viel zu breit angelegt und damit strategisch und operativ nicht mehr umsetzbar. Die neue Bundesregierung sollte daher innerhalb der Handlungsfelder hinreichend fokussierte Missionen konkret ausformulieren, deren Zielerreichung messbar machen und eine Umsetzung anhand von Roadmaps und Meilensteinen vorsehen. Anstrengungen auf diese Art zu bündeln, ist dort sinnvoll, wo mit dem missionsorientierten Ansatz eine hohe

Wirkung und Sichtbarkeit erzielt werden kann. Da für einen transformativen Wandel sowohl technologische als auch soziale Innovationen erforderlich sind, sollten die Missionen so ausgerichtet werden, dass sie eine hohe Aufmerksamkeit erfahren und bei unterschiedlichen Akteursgruppen F&I-Aktivitäten anstoßen.⁴⁸

Pilotvorhaben rasch umsetzen

Das Formulieren einer neuen, innerhalb der kommenden Bundesregierung abzustimmenden F&I-Strategie sollte die Umsetzung einer missionsorientierten Politik nicht verzögern. Die Expertenkommission spricht sich daher dafür aus, in der neuen Legislaturperiode keine Zeit zu verlieren und rasch eine erste, im obigen Sinne formulierte Mission als Pilotvorhaben auf den Weg zu bringen. Die Einbettung der missionsorientierten Politik in eine neue F&I-Strategie kann dann folgen.

A2-2 Adäquate Governance-Strukturen etablieren

F&I-Politik erfordert adäquate Governance-Strukturen, um große Themen und anspruchsvolle Aufgaben erfolgreich angehen zu können. Dabei gilt es insbesondere, Strukturen aufzubauen, die eine umfassende Begleitung von F&I erlauben, Digitalisierungsstrategien und -aktivitäten bündeln und zukünftige Forschungs- und Technologiefelder frühzeitig erkennen.

F&I-Politik in einem Ministerium bündeln

Die Expertenkommission spricht sich dafür aus, in der kommenden Legislaturperiode die Zuständigkeiten für die F&I-Politik in einem Ministerium zu bündeln. Eine umfassende und sachgerechte F&I-Politik erfordert es, F&I gesamtheitlich in den Blick zu nehmen. Ziel sollte es sein, F&I-Prozesse – die nicht nur linear verlaufen – mit einem abgestimmten Instrumentenmix aus einer Hand politisch zu begleiten. Dazu gehören die Grundlagenforschung, die angewandte Forschung, die experimentelle Entwicklung, der Transfer und die Innovationsaktivitäten in etablierten, jungen und neuen Unternehmen.

Nach den Bundestagswahlen 1998 und 2005 verlor das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eine Reihe von Zuständigkeiten an das damalige Ministerium für Wirtschaft und Techno-

logie (BMWi) – so die Zuständigkeiten für (technologieorientierte) Unternehmensgründungen, für Verkehr und Raumfahrt sowie für FuE und Innovation in der Wirtschaft.⁴⁹ Im Grundsatz sollten diese Bereiche wieder in das BMBF integriert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die genannten Bereiche im Zeitverlauf verändert haben, sodass im Einzelfall ggf. die Schnittstellen neu zu definieren sind.

Digitalministerium schaffen

Zu Beginn der 20. Legislaturperiode wurde das damalige Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) umbenannt.⁵⁰ Es erhielt aus dem Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) die Zuständigkeit für Telekommunikation sowie die Zuständigkeiten für die nationale, europäische und internationale Digitalpolitik.⁵¹ Zudem bekam es aus dem Geschäftsbereich des Bundeskanzleramts die Zuständigkeiten für operative Vorhaben der Digitalpolitik.⁵² Damit wurden die Digitalthemen innerhalb der Bundesregierung zwar etwas stärker als zuvor gebündelt, jedoch verläuft die digitale Transformation in Deutschland noch immer schleppend.

Die Expertenkommission erneuert daher ihre Empfehlung aus dem Jahr 2021, ein Digitalministerium zu schaffen.⁵³ Dessen Aufgaben wären es, die großen Linien der digitalen Transformation vorzuzeichnen, Strategien zu entwickeln, sie koordinierend voranzutreiben und deren Umsetzung zu verfolgen. Zu

den Zuständigkeiten eines Digitalministeriums sollten darüber hinaus vor allem die digitale Infrastruktur und der regulatorische Rahmen für die Digitalisierung zählen. Die Themenbereiche Cybericherheit und Verwaltungsdigitalisierung könnten hier ebenfalls verortet oder sachgerecht von anderen Ressorts oder dem Bundeskanzleramt verantwortet werden. Darüber hinaus sind auch in den anderen Ressorts verortete Verantwortlichkeiten erforderlich, um die Digitalisierung in den jeweiligen Politikfeldern sachgerecht und problemadäquat voranzutreiben.

Foresight- und Monitoring-Einheit für Schlüssel- und Zukunftstechnologien aufbauen

Bei der strategischen Förderung von Schlüsseltechnologien (vgl. Box A2-2) steht Deutschland erst am Anfang.⁵⁴ Schlüsseltechnologien und darauf aufbauende Schlüsseltechnologieportfolios müssen anhand klarer und operationalisierbarer Kriterien definiert werden. Die Expertenkommission hatte sich in ihrem Jahresgutachten 2022 dafür ausgesprochen, Schlüsseltechnologien durch Foresight-Analysen und Monitoring-Prozesse kontinuierlich identifizieren und beobachten zu lassen. Sie begrüßt, dass das BMBF mittlerweile einen Foresight- und einen Monitoring-Prozess für Schlüsseltechnologien etabliert hat.

Darauf aufbauend sollte – in Anlehnung an das Format der Gemeinschaftsdiagnose⁵⁵ – eine Foresight- und Monitoring-Einheit eingerichtet werden, die

Box A2-2 Schlüssel- und Zukunftstechnologien

Schlüsseltechnologien zeichnen sich durch eine breite Anwendbarkeit in einer Vielzahl von Technologien und Branchen aus, und das sehr oft ohne gleichwertige technologische Alternative.⁵⁶ Als Schlüsseltechnologien gelten u.a. folgende Technologien, die die Expertenkommission in ihrem Jahresgutachten 2022 näher untersucht hat:⁵⁷

- Digitale Technologien: Big Data, digitale Sicherheitstechnologien, Internet of Things, künstliche Intelligenz (KI), Mikroelektronik, digitale Mobilitätstechnologien
- Materialtechnologien: Nanotechnologie, Neue Werkstoffe

— Produktionstechnologien: Advanced Manufacturing, Photonik, Robotik

— Bio- und Lebenswissenschaften: Lebenswissenschaften, Bioökonomie

Für die aktuellen und zukünftigen Wertschöpfungsaktivitäten haben Schlüsseltechnologien eine zentrale Bedeutung. Deutschland weist jedoch insbesondere bei den digitalen Schlüsseltechnologien technologische Rückstände auf. Zudem verläuft die technologische Entwicklung in den Schlüsseltechnologien nicht so dynamisch, wie dies vor allem in China, Japan, Südkorea und den USA der Fall ist. Technologien, für die erwartet wird, dass sie in Zukunft die Eigenschaften von Schlüsseltechnologien haben werden, können als Zukunftstechnologien bezeichnet werden.

sich aus mehreren, regelmäßig wettbewerblich ausgewählten Forschungseinrichtungen zusammensetzt und für die gesamte Bundesregierung tätig ist. Diese Foresight- und Monitoring-Einheit sollte vom Bundeskanzleramt beauftragt werden und unabhängig arbeiten können. Sie sollte nicht nur bestehende Schlüsseltechnologien in den Blick nehmen, sondern auch Zukunftstechnologien erfassen und hinsichtlich ihrer technologischen, wirtschaftlichen sowie gesellschaftlichen Potenziale bewerten.

A 2-3 Effektivität und Effizienz von Politikmaßnahmen verstärkt in den Blick nehmen

Trotz enger Haushaltsspielräume muss vermieden werden, das F&I-System langfristig zu schwächen. Die Expertenkommission weist auf die Notwendigkeit hin, der F&I-Politik auch in der kommenden Legislaturperiode eine hohe Priorität einzuräumen und dies entsprechend im Bundeshaushalt abzubilden. Jedoch ist es auch dringend geboten, stärker auf die Effektivität und Effizienz von Politikmaßnahmen zu achten, als dies bisher der Fall war. Politikmaßnahmen sind effektiv, wenn sie die verfolgten Ziele treffsicher erreichen, und effizient, wenn es keine Möglichkeit gibt, die verfolgten Ziele kostengünstiger zu realisieren.

F&I-Aktivitäten evaluieren und priorisieren

Die F&I-Politik steht vor der Aufgabe, knappe Mittel für die Förderung von F&I-Aktivitäten so einzusetzen, dass die verfolgten Ziele effektiv und effizient erreicht werden. Die Expertenkommission mahnt an, bei der Maßnahmenplanung Wirkung und Kosten von F&I-politischen Maßnahmen abzuschätzen und auf dieser Basis den Einsatz der knappen Fördermittel zu priorisieren. Hierzu ist es notwendig, Politikmaßnahmen zu evaluieren.

In vielen Fällen ermöglichen aussagekräftige Kausalanalysen als Teil der Evaluationen von Maßnahmen der F&I-Politik, die Effektivität und Effizienz von Politikmaßnahmen zu beurteilen und damit eine Basis für deren Priorisierung zu schaffen.⁵⁸

Wie die Expertenkommission in ihrem Jahresgutachten 2024 gezeigt hat, lassen jedoch viele Evaluationsstudien zu Maßnahmen der F&I-Politik keine Rückschlüsse darauf zu, ob die beobachteten Entwicklungen tatsächlich auf die untersuchten Politik-

maßnahmen zurückzuführen sind. Möglichkeiten, aus der Bewertung von und Erfahrung mit durchgeführten Maßnahmen zu lernen, um gegebenenfalls zukünftige Maßnahmen so anzupassen, dass deren Ziele besser oder kostengünstiger erreicht werden, bleiben im Wesentlichen ungenutzt. Die Expertenkommission betont, dass sich dies ändern muss.

Kausalanalysen der Maßnahmeneffekte sollten künftig systematisch und umfassend in den Einsatz von Maßnahmen der F&I-Politik integriert werden, um so die Voraussetzungen für eine sach- und fachgerechte Durchführung dieser Analysen zu gewährleisten. Da unzureichende Datenverfügbarkeit und -qualität die Durchführung aussagekräftiger Kausalanalysen erschweren oder verhindern, sind schon bei der Planung von Maßnahmen die Voraussetzungen für die Erhebung der erforderlichen Daten zu schaffen. Es ist allerdings hinzunehmen, dass sich nicht jede Studiensituation für eine Kausalanalyse eignet, selbst wenn noch so reichhaltiges Datenmaterial zur Verfügung steht.

Die Bewertung der Effizienz einer Maßnahme ist mit besonders großen Anforderungen an die Daten verbunden. Auf Basis einer Kausalanalyse lässt sich jedoch in vielen Fällen zumindest eine Kosten-Nutzen-Abschätzung vornehmen.

Maßnahmen zügig umsetzen

Wenn es darum geht, die Effektivität und Effizienz F&I-politischer Maßnahmen zu erhöhen, ist Zeit ein kritischer Faktor. So hat sich Deutschland verpflichtet, die Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahren drastisch zu reduzieren, und muss bei den digitalen Schlüsseltechnologien Rückstände aufholen. Wenn die Umsetzung entsprechender Maßnahmen aufgeschoben wird, können sich Wirkungen nur verzögert entfalten. In der Vergangenheit war durchaus eine schleppende Umsetzung von Maßnahmen zu beobachten.⁵⁹ Die Expertenkommission hat beispielsweise in ihrem Jahresgutachten 2022 auf die verzögerte Umsetzung der KI-Strategie hingewiesen.⁶⁰

In vielen Fällen ist davon auszugehen, dass die volkswirtschaftlichen Kosten, um die genannten Ziele zu erreichen, in der Summe steigen, wenn Maßnahmen nicht frühzeitig umgesetzt werden.⁶¹ So wird es für Deutschland immer schwieriger, den zunehmenden Vorsprung der USA und Chinas im Bereich der KI aufzuholen. Die Expertenkommission

sion mahnt deshalb eine zügige Umsetzung von Politikmaßnahmen an, verbunden mit der Bereitschaft, aus Fehlern zu lernen und die Maßnahmen ggf. zu adjustieren oder auch wieder abzuschaffen.

Maßnahmen katalytisch ausrichten

Maßnahmen, die einzelne Wirtschaftsbereiche begünstigen, können zu Wettbewerbsverzerrungen und Ineffizienzen führen. Sind solche Markt Eingriffe nicht vermeidbar, sollten sie einen katalytischen Charakter haben, d. h. nur eine Anstoßwirkung entfalten und dann wieder beendet werden (vgl. Kapitel A3). Dies kann etwa der Fall sein bei der Förderung junger Technologien, bei der Überwindung von Pfadabhängigkeiten bei etablierten Technologien oder beim Aufbau von neuen Infrastrukturen, beispielsweise von Betankungssystemen für innovative Mobilitätsformen.⁶²

Zusammenarbeit mit privaten Akteuren ausweiten

Die Zusammenarbeit von öffentlichen und privaten Akteuren kann Innovation befördern. Beispiele sind das European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU)⁶³, der High-Tech Gründerfonds⁶⁴ und die künftigen, im Rahmen des EXIST-Leuchtturmwettbewerbs geförderten Startup Factories⁶⁵. Die neue Bundesregierung sollte die Möglichkeiten derartiger Zusammenarbeit vermehrt nutzen.

Zudem sollte die neue Bundesregierung prüfen, ob Maßnahmen, die bei privaten Akteuren F&I-Aktivitäten anstoßen, vermehrt so gestaltet werden können, dass die Fördersumme im Erfolgsfall wieder zurückgezahlt wird. Zu denken ist an stille oder virtuelle Unternehmensbeteiligungen etwa bei Gründungsprojekten und akademischen Start-ups, aber auch bei größeren Gemeinschaftsinvestitionen wie in Rechnerkapazitäten für KI-Anwendungen. Die katalytische Anschubwirkung der öffentlichen Förderung steht hier im Vordergrund. Es geht nicht darum, Gewinne zu erzielen.

Maßnahmeneffekte nicht durch andere Maßnahmen konterkarieren

Die Effektivität und Effizienz F&I-politischer Maßnahmen wird konterkariert, wenn ihnen andere Maßnahmen entgegenwirken. Beispielsweise binden klimaschädliche Subventionen nicht nur

knappes Haushaltsmittel, die damit für andere Verwendungen nicht mehr zur Verfügung stehen. Sie führen auch zu Ineffizienzen bei der Emissionsvermeidung und schwächen die Innovationsanreize ab, die durch die Bepreisung von Treibhausgasemissionen induziert werden. Damit sind zum einen die volkswirtschaftlichen Kosten der Emissionsvermeidung bei gegebener Technologie unnötig hoch. Zum anderen werden aus volkswirtschaftlicher Sicht zu wenig Innovationsaktivitäten durchgeführt, die darauf gerichtet sind, die Kosten für die Emissionsvermeidung im Zeitverlauf zu senken.

In Deutschland wird eine Reihe klimaschädlicher Subventionen gewährt.⁶⁶ Wie die Proteste gegen die Abschaffung der Steuervergünstigung für Agrardiesel zeigen, ist es unpopulär, (klimaschädliche) Subventionen zu streichen. Die Expertenkommission hält es dennoch für dringend geboten, bei der Abschaffung klimaschädlicher Subventionen und bei anderen Maßnahmen, deren Effekte einander entgegenwirken, so schnell wie möglich voranzukommen.⁶⁷

Kompensationen bedarfsgerecht leisten

Bei der Umsetzung von Politikmaßnahmen, die einen transformativen Wandel befördern, bleibt es nicht aus, dass einzelne Bevölkerungsgruppen zunächst Nachteile erleiden. Ziel sollte es sein, die gesellschaftlichen Kosten über die gesamte Dauer der Transformation möglichst gering zu halten (vgl. Kapitel A3). Es ist zu prüfen, inwieweit die Nachteile, die einzelne Bevölkerungsgruppen durch die Umsetzung transformationsorientierter Politikmaßnahmen erleiden, zumutbar sind. Sind sie es nicht, sollten Kompensationsmaßnahmen ergriffen werden, um eine Überforderung zu vermeiden. Dabei sind das Streben nach Zielgenauigkeit und die Umsetzungskosten gegeneinander abzuwägen.

A2-4 Rahmenbedingungen innovationsförderlich gestalten

Ungeeignete rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz neuer Technologien und Geschäftsmodelle, Ineffizienzen und mangelnde Agilität in der öffentlichen Verwaltung, ein Mangel an qualifizierten Fachkräften sowie Transferhemmnisse erschweren die Durchführung von F&I-Aktivitäten und hemmen den Einsatz von innovativen Technologien und Geschäftsmodellen. Auch Potenziale des

Wissens- und Technologietransfers bleiben ungenutzt. Die zukünftige Bundesregierung sollte daher mit Nachdruck daran arbeiten, derartige Hürden abzubauen. Angesichts geopolitischer Spannungen sollte sie sich zudem dem Thema technologische Souveränität widmen, hierbei aber mit Augenmaß vorgehen und von der strikten Trennung von ziviler und militärischer Forschung abrücken.

Geeignete Rahmenbedingungen für Einsatz neuer Technologien und Geschäftsmodelle schaffen

Neue, für die Bewältigung der großen Transformationen wichtige Technologien und Geschäftsmodelle müssen nicht nur bis zur Marktreife entwickelt werden, sondern auch in die Anwendung kommen. Bei einigen dieser Technologien und Geschäftsmodelle hemmen jedoch rechtliche Regelungen ihre Diffusion. Diese Regelungen gilt es abzubauen. Beispielsweise wird der Einsatz von gentechnisch veränderten Pflanzen, die einen Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen leisten können, durch eine verfahrensbezogene Regulierung in der EU erschwert,⁶⁸ oder die Wettbewerbsposition deutscher Anbieter von Erdbeobachtungsdaten wird durch rechtliche Regelungen zur Satellitendatensicherheit geschwächt.⁶⁹

Reallabore können dazu beitragen, Innovationen unter vorübergehender Aussetzung regulatorischer Rahmenbedingungen zu testen und dabei Erfahrungen für die Verbesserung der Regulatorik selbst zu sammeln. Da eine Einigung über den Entwurf des Reallabore-Gesetzes bereits vorliegt, sollte es schnellstmöglich verabschiedet werden, zumal es eine wichtige Grundlage für die nationale Umsetzung der KI-Verordnung ist. Gleichwohl sind Reallabore kein Ersatz für den Abbau rechtlicher Hürden.

Werden neue technologische Lösungen oder Geschäftsmodelle von Start-ups entwickelt und auf den Markt gebracht, so scheitert deren Skalierung oftmals an fehlender Finanzierung in Form von Risiko- und insbesondere Wachstumskapital.⁷⁰ Die Folge ist, dass diese Start-ups von außereuropäischen Investoren finanziert werden, was häufig mit ihrem Wegzug verbunden ist. Zwar hat die Bundesregierung beispielsweise mit dem Aufsetzen des Zukunftsfonds richtige Schritte unternommen. Jedoch reichen die öffentlichen Mittel bei Weitem nicht aus, um international mithalten zu können. Daher ist es dringend erforderlich, mehr privates

Kapital für die (Ko-)Finanzierung von jungen und wachsenden Unternehmen zu aktivieren.⁷¹

Digitale und agile öffentliche Verwaltung aufbauen

Um dem heimischen F&I-Standort den nötigen Rückenwind zu verleihen, wäre es dringend notwendig, das immer dichter gewordene Regulierungsdickicht konsequent zu beschneiden und zugleich die Qualität staatlichen Handelns deutlich zu verbessern: Anzustreben wäre eine effiziente und agile öffentliche Verwaltung, die ihre Prozesse und Angebote technologisch stets auf dem Stand der Zeit und kompatibel zu den Prozessen in Wissenschaft und Wirtschaft vorhält oder ihnen sogar vorausleitet. Davon ist die Lebenswirklichkeit der öffentlichen Verwaltung in Deutschland jedoch weit entfernt. Sie wirkt eher als Hemmschuh denn als Katalysator für Innovationen.

Besonders deutlich werden ihre Defizite derzeit in der nicht hinreichend umgesetzten Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung, dem E-Government. Es ist bisher nicht gelungen, Verwaltungsprozesse durchgehend zu digitalisieren.⁷² In internationalen Rankings findet man Deutschland hier seit längerem auf den hinteren Rängen.⁷³ Ein wesentlicher Grund für diese schlechte Platzierung liegt darin, dass die Kompetenzen zur Umsetzung des E-Government im Wesentlichen unkoordiniert dezentral verortet sind.

Daher sollte der mit der strategischen und operativen Planung betraute IT-Planungsrat, das zentrale politische Steuerungsgremium für die Koordination der Zusammenarbeit von Bund und Ländern bei der Verwaltungsdigitalisierung, mit größeren Entscheidungskompetenzen und politischen Durchgriffsrechten ausgestattet werden. Zugleich sollten die Anstalt Föderale IT-Kooperation (FITKO) und die Koordinierungsstelle für IT-Standards (KoSIT) zu einer Digitalisierungsagentur ausgebaut werden. Sie wäre an geeigneter Stelle anzubinden: entweder im Digitalministerium oder sachgerecht in dem mit der Verwaltungsdigitalisierung betrauten Ressort. Ebenso sind weitere Akteure koordiniert einzubinden, etwa das Bundesverwaltungsamt für die Registermodernisierung oder kommunale Spitzenverbände für die Umsetzung vor Ort.⁷⁴ Die Cloudifizierung voranzutreiben sowie ein Once-Only-Technical-System⁷⁵ zu entwickeln, sind vordringliche Aufgaben.

Um mit den Entwicklungen in Wirtschaft und Gesellschaft mithalten und diese unterstützen zu können, muss die öffentliche Verwaltung geeignete Strukturen und Prozesse zur kontinuierlichen eigenen Erneuerungsfähigkeit aufbauen. Der Aufbau eines permanenten Prozessmanagements, das Vorantreiben der Nutzerzentrierung, die Schaffung von Freiräumen für innovative Ideen und einer Feedback-Kultur⁷⁶ gehören hier ebenso dazu wie die Nutzung der Potenziale der öffentlichen innovativen Beschaffung und die Entwicklung eines GovTech-Ökosystems.⁷⁷ Darüber hinaus ist eine deutlich verbesserte strategische Personalplanung erforderlich.⁷⁸ Leitungspositionen verstärkt für verwaltungsexterne Bewerberinnen und Bewerber zu öffnen und die Beförderung von Führungskräften an relevante Kompetenzen statt an die Beschäftigungsdauer zu knüpfen, sollte zu den zentralen Instrumenten zählen.⁷⁹

Fachkräfteverfügbarkeit erhöhen

Die demografische Entwicklung verstärkt die Arbeits- und Fachkräfteengpässe in Unternehmen und öffentlicher Verwaltung, während sich Bedarfe der Arbeitgeber durch den allgemeinen Strukturwandel, die Alterung der Gesellschaft sowie Digitalisierung und Dekarbonisierung verschieben. Zugleich bleiben viele Arbeitsmarktpotenziale derzeit ungenutzt. Zu den Ursachen hierfür zählen eine geringere Erwerbsbeteiligung und ein geringeres Erwerbsvolumen von Frauen, Anreize für einen frühzeitigen Austritt Beschäftigter aus dem Berufsleben, die fehlende Ausbildungsreife vieler Jugendlicher, bürokratische Hürden bei der Anwerbung internationaler Fachkräfte und eine mangelhafte Integration Geflüchteter in den Arbeitsmarkt.

Die Expertenkommission betont erneut die Notwendigkeit, für eine bessere Vereinbarkeit von Beruf und Familie zu sorgen, insbesondere durch den Ausbau und die höhere Verlässlichkeit von Kinderbetreuungs- und Pflegeangeboten, um das Erwerbsvolumen von Frauen und Älteren zu erhöhen. Anreize zur Frühverrentung sollten konsequent abgebaut werden, anstatt sie durch gegenläufige Subventionen wie eine Rentenaufschubprämie zu kompensieren.

Angesichts zahlreicher Schulabbrüche und vieler Hinweise darauf, dass sich die Bildungsergebnisse von Schülerinnen und Schülern in Deutschland kontinuierlich verschlechtern, spricht sich

die Expertenkommission darüber hinaus für verstärkte Anstrengungen im Bildungsbereich aus. Mehr Jugendliche müssen die Ausbildungsreife erreichen und die Kompetenzen der Schulabgängerinnen und -abgänger müssen insbesondere im MINT-Bereich deutlich gestärkt werden. Da der Hochschulsektor über den eigenen Bedarf hinaus Forscherinnen und Forscher ausbildet, sollten Promovierende und Postdocs frühzeitig auf Beschäftigungsmöglichkeiten außerhalb des Wissenschaftssystems vorbereitet werden. Dort leisten viele von ihnen wichtige Beiträge zum Wissenstransfer aus der Wissenschaft in Wirtschaft und Gesellschaft.

Deutschland steht im internationalen Wettbewerb um – insbesondere hochqualifizierte – Fachkräfte. Für die Anwerbung internationaler Fachkräfte ist es unerlässlich, Verwaltungsprozesse wie die Visavergabe und die Anerkennung von ausländischen Abschlüssen weiter zu digitalisieren und zu beschleunigen.⁸⁰ Zudem müssen bürokratische Hürden für eine schnelle Integration Geflüchteter in den deutschen Arbeitsmarkt beseitigt werden. Die Möglichkeit eines „Spurwechsels“ aus dem Asylverfahren in Aufenthaltstitel für Fachkräfte war in dieser Hinsicht ein erster Schritt, wurde jedoch relativ eng gefasst.⁸¹ Die Expertenkommission empfiehlt, diese Möglichkeit stärker zu nutzen und bürokratische Hürden zu ihrer Nutzung abzubauen.

Mobilität zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung erleichtern

Wenn Fachkräfte zwischen Arbeitgebern in Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung wechseln, nehmen sie ihr Wissen und ihre Erfahrungen mit. Sie können somit zum intersektoralen Wissenstransfer und zum gegenseitigen Verständnis für die Bedarfe, Aktivitäten und Restriktionen der in den jeweils anderen Sektoren Tätigen beitragen. Der Arbeitsmarktmobilität zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung stehen in Deutschland jedoch administrative Barrieren entgegen.

Die Vergütung der Beschäftigten in der öffentlichen Verwaltung und der Wissenschaft richtet sich nach Studien- und Berufsabschlüssen sowie nach der jeweils vorhandenen Berufserfahrung. Für die Attraktivität des Quereinstiegs in den öffentlichen Dienst ist es wichtig, dass externe Berufserfahrungen angemessen berücksichtigt werden und insgesamt eine wettbewerbsfähige Vergütung angeboten werden kann.

Das Beamtenrecht ist traditionell nicht darauf ausgerichtet, dass Beschäftigte dauerhaft in die Privatwirtschaft wechseln.⁸² Um diese Mobilität zu erleichtern, sollte ein Altersgeld auch in denjenigen Bundesländern eingeführt werden, in denen es diese Vorkehrung bislang nicht gibt. Die Beurlaubung von Beamtinnen und Beamten für eine zeitlich begrenzte Tätigkeit in der Privatwirtschaft sollte durch die Entwicklung standardisierter Verfahren für die Übernahme der Beiträge zur Kranken- und Altersversorgung durch den privatwirtschaftlichen Arbeitgeber erleichtert werden.⁸³

An deutschen Hochschulen ist es etablierte Praxis, dass Professorinnen und Professoren in regelmäßigen Zeiträumen ein Forschungssemester beantragen und sich für diesen Zeitraum von ihrer Lehrtätigkeit entbinden lassen können. Analoge Regelungen für Transfersemester existieren an einigen Hochschulen, werden bislang aber nur zurückhaltend genutzt.⁸⁴ Eine Erweiterung der bestehenden Regelungen für Forschungssemester könnte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Möglichkeit geben, durch Gastaufenthalte in Unternehmen und Politik zum Austausch von Wissen und Erfahrungen beizutragen.

Ebenfalls fest etabliert sind gemeinsame Berufungen von Universitäten und Forschungseinrichtungen, für die verschiedene Modelle bestehen.⁸⁵ Analog könnten gemeinsame Berufungen von Universitäten und Unternehmen dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Privatwirtschaft zu stärken. Für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die keine Professur innehaben, könnten nach dem Vorbild der (Advanced) Clinician Scientist-Programme von Deutscher Forschungsgemeinschaft und BMBF Formate entwickelt werden, die den Personen, die außerhalb des Wissenschaftssystems tätig sind, die Gelegenheit zur wissenschaftlichen Weiterbildung und ggf. zur Qualifizierung für eine Professur an einer Universität geben.

Transfer ganzheitlich und systemimmanent denken

Ein erfolgreicher Wissens- und Technologietransfer erfordert ein ganzheitliches und systemimmanentes Verständnis innerhalb der Wissenschaftsorganisationen und ihrer Mittelgeber. Ganzheitlich bedeutet, dass Transferprozesse bereits in der frühen Forschungsphase verankert werden und eine

breit angelegte Verwertung sich nicht nur auf den Output, sondern auch auf transferierbare Erkenntnisse und Werkzeuge im Prozessverlauf bezieht. Der Wissens- und Technologietransfer sollte alle Fachbereiche einbeziehen und über klassische, patentbasierte Ansätze hinausgehen, um auch Wissenstransfer aus Geistes- und Sozialwissenschaften sowie gesellschaftliche Impact-Fragen zu berücksichtigen. Er sollte damit ein integraler Teil des Wissenschaftssystems und systemimmanent werden, d. h. in allen Prozessen von der Forschungsidee bis zur Anwendung mitgedacht werden.

Grund dafür, dass das Idealbild eines Wissens- und Technologietransfers noch nicht erreicht ist, ist ein immer noch vorherrschendes lineares Transferverständnis, bei dem der Verwertungsgedanke meist erst dann ansetzt, wenn Forschungsergebnisse bereits vorliegen. Derzeit behindern dieses lineare Transferverständnis und sich darin reflektierende fragmentierte Zuständigkeiten zwischen Ministerien die Effizienz der Transferförderung, insbesondere in Bereichen wie Deep Tech, wo Forschung und Anwendung eng verzahnt sind. Deshalb sollten Formate zur Intensivierung von Kooperationen bzw. zur Bildung von Wissensnetzwerken zwischen wissenschaftlichen Einrichtungen sowie zwischen Wissenschaft und Wirtschaft unterstützt werden. Ebenso sollten Karrierewege zwischen Wissenschaft und Wirtschaft durchlässiger werden.

Das Prinzip Open Science hat frühzeitig Wissen in vielen Bereichen, wie z. B. zu CRISPR/Cas,⁸⁶ transparent und zugänglich gemacht und damit sowohl die Verbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse als auch deren Weiterentwicklung beschleunigt sowie die Exzellenz wissenschaftlicher Arbeit unterstützt. Die Möglichkeiten und Instrumente von Open Science entlang des F&I-Prozesses sollten daher weiterentwickelt und gefördert werden.

IP-Transfer erleichtern und beschleunigen

Die Erwartungen an die Wissenschaft, als Teil des Innovationssystems auch ihre Verwertungsleistungen sichtbar zu machen, sind insbesondere angesichts notwendiger und einschneidender Transformationen gestiegen. Deutschland tut sich jedoch beim Transfer und der ökonomischen Nutzung von Forschungsergebnissen schwer. Wichtige Gründe liegen hier zum einen in Herausforderungen bei der Anmeldung von Schutzrechten für geistiges Eigentum (Intellectual Property, IP) und zum anderen in

den Schwierigkeiten der Übertragung des geistigen Eigentums.

Um den Transfer und die ökonomische Nutzung von Forschungsergebnissen voranzutreiben, sollten bestehende Verwertungsstrukturen an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, insbesondere Technologietransfer und Patentverwertung, weiter professionalisiert sowie unternehmerischer und wettbewerblicher ausgerichtet werden. Hochschulen und Forschungseinrichtungen sollten jedoch nicht darauf ausgerichtet sein bzw. erwarten, das geistige Eigentum an den wirtschaftlich nutzbaren Ideen ihrer Beschäftigten durch Kommerzialisierung profitabel zu verwerten. Diese Erwartung lässt sich kaum durch empirische Befunde begründen, birgt jedoch die Gefahr, dass eine überzogene Einnahmenorientierung der Hochschulen und Forschungseinrichtungen IP-Übertragungen an forschungsbasierte Ausgründungen erschwert oder auch gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsprojekte (FuE-Projekte) mit Unternehmen verhindert.

Um die strukturell bedingten Interessenkonflikte zwischen wissenschaftlichen Einrichtungen und Unternehmen sowie Ausgründungen bei Verhandlungen zum IP-Transfer zu entschärfen, empfiehlt die Expertenkommission, die Anreizsysteme zu modifizieren. Der Transfererfolg von wissenschaftlichen Einrichtungen sollte nicht anhand von Patenten und Lizenzentnahmen, sondern stärker am nachhaltigen Erfolg der von ihnen begleiteten Ausgründungen gemessen werden. Die Expertenkommission erinnert daran, dass die Kommerzialisierung von IP kein geeignetes Mittel ist, um die Einnahmesituation von Forschungseinrichtungen und Hochschulen zu verbessern, wohl aber einen wichtigen Beitrag zur gesamtwirtschaftlichen Entwicklung leistet.

Aktuelle Initiativen wie etwa zum Konzept der virtuellen Beteiligungen, die gestartet wurden, um den IP-Transfer-Prozess an Wissenschaftsinstitutionen zu beschleunigen und gleichzeitig transparent und rechtssicher zu gestalten, sind zu begrüßen.⁸⁷ Die Expertenkommission sieht darin nicht nur eine Möglichkeit, neue Wege des IP-Transfers zu erproben, sondern vor allem eine Chance, einen Informations- und Lernprozess anzustoßen.

Ökonomische und technologische Souveränität mit Augenmaß verfolgen

Seit einigen Jahren steht die Stärkung der ökonomischen und technologischen Souveränität (vgl. Box A2-3) weit oben auf der Agenda der deutschen und europäischen Politik. Aufgrund geopolitischer Spannungen und eines weltweit begrenzten Angebots kritischer Rohstoffe wird befürchtet, dass der Zugang zu kritischen Technologien, Gütern und Dienstleistungen zukünftig nicht vollständig gesichert ist und damit die Innovationsfähigkeit sowie die Wirtschaftskraft beeinträchtigt werden können. Eine weitere Sorge resultiert aus der enormen Innovationsdynamik, die andere Wirtschaftsräume bei Schlüssel- und Zukunftstechnologien aufweisen – allen voran China, Japan, Südkorea und die USA, aber teilweise auch Indien und einzelne arabische Länder. Es besteht die Befürchtung, dass die deutschen und europäischen Unternehmen bei dieser Dynamik nicht mithalten, an Wettbewerbsfähigkeit einbüßen und in einseitige technologische Abhängigkeit geraten können.

Auch die Expertenkommission sieht aus den genannten Gründen die Notwendigkeit, Maßnahmen zur Stärkung der ökonomischen und technologischen Souveränität zu ergreifen, mahnt aber an, hierbei Augenmaß zu wahren und sich mit den europäischen Partnern zu koordinieren (vgl. Kapitel A3).

Box A2-3 Ökonomische und technologische Souveränität

Ökonomische Souveränität ist erreicht, wenn ein Wirtschaftsraum in der Lage ist, kritische Technologien, Güter – darunter auch Rohstoffe – und Dienstleistungen, die er selbst nicht vorhalten kann, ohne einseitige Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen zu beziehen und zu nutzen. Technologische Souveränität ist gegeben, wenn ein Wirtschaftsraum Technologien, die wesentlich

zu seiner Wohlfahrt und Wettbewerbsfähigkeit beitragen oder – wie im Fall von Schlüsseltechnologien – kritisch im Sinne systemischer Relevanz sind, selbst vorhalten und weiterentwickeln kann oder über die Möglichkeit verfügt, diese Technologien ohne einseitige Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen zu beziehen und zu nutzen.⁸⁸ Ein Wirtschaftsraum kann damit technologisch souverän sein, ohne dass er die Technologieführerschaft innehat.

Da die internationale Arbeitsteilung Spezialisierungsvorteile mit sich bringt und eine Grundlage für Wohlstand darstellt, darf ökonomische und technologische Souveränität keinesfalls mit Autarkie gleichgesetzt werden. Eigene technologische Stärken können im Fall von souveränitätsgefährdenden handelspolitischen Konflikten als Verhandlungsmasse eingesetzt werden. Sie sollten daher ausgebaut werden.

Um einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden, sollten alternative Beschaffungswege und -quellen erschlossen werden. Bei einigen kritischen Rohstoffen können jedoch starke Abhängigkeiten von einzelnen Lieferanten kurzfristig kaum verhindert werden. Mittel- bis langfristig lässt sich die Souveränität stärken, wenn es durch F&I-politische Maßnahmen gelingt, neue Materialien zu entwickeln, die als Substitute für kritische Rohstoffe dienen können.

Industriepolitische Maßnahmen, die Unternehmen beim Aufbau inländischer, die Souveränität stärkender Forschungs- und Produktionskapazitäten unterstützen, sollten katalytisch konzipiert werden – also lediglich eine Anstoßwirkung entfalten und dann beendet werden. In Fällen, in denen der Aufbau von Forschungs- und Produktionskapazitäten Investitionen einschlägiger ausländischer Unternehmen erfordert, werden oft sehr hohe staatliche Fördermittelzusagen in Aussicht gestellt. Hierbei ist jedoch sicherzustellen, dass selbsttragende Strukturen entstehen, die weiter betrieben werden können, falls sich das Unternehmen aus Deutschland zurückzieht. Dazu sollten staatliche Fördermittel primär in Infrastrukturen und in den Kompetenzaufbau vor Ort fließen, beispielsweise in den Aufbau von FuE-Kapazitäten, Gründungszentren sowie Vernetzungsaktivitäten der F&I-betreibenden Akteure.

Zivile und militärische Forschung besser verknüpfen

Das Zusammenwirken von ziviler und militärischer FuE wird in vielen Ländern politisch gefördert. Die Expertenkommission hat in diesem Kontext bereits

auf prominente Beispiele aus den USA (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) und Israel (Militäreinheit 8200) verwiesen.⁸⁹ Sie hat der Bundesregierung empfohlen, sich an diesen Beispielen zu orientieren und die scharfe Trennung zwischen ziviler und militärischer Forschung zu überwinden. Die Bundesagentur für Sprunginnovation (SPRIND) wurde zwar nach dem Vorbild der DARPA errichtet, im Unterschied zu dieser allerdings explizit als zivile Einrichtung konzipiert. Für sicherheitsrelevante Forschung hingegen gründete die Bundesregierung annähernd zeitgleich die Agentur für Innovation in der Cybersicherheit (Cyberagentur). Diese arbeitet allerdings anders als die SPRIND oder die US-amerikanische DARPA und ist zudem auf das schmale Feld der Cybersicherheit eingegrenzt.

Angesichts der veränderten Bedrohungslage stellt sich die Frage, wie militärische Forschung in Deutschland so aufgestellt werden kann, dass sie maßgeblich zu einer eigenständigen Verteidigungsfähigkeit auf höchstem Niveau beiträgt. Eine Antwort darauf schließt auch die Beziehung zu ziviler Forschung mit ein, denn Wissens-Spillover einerseits und eine prinzipielle Verwendbarkeit von Technologien oder Gütern sowohl zu zivilen als auch zu militärischen Zwecken (Dual Use) andererseits machen es notwendig, ein für beide Seiten fruchtbares Konzept des strukturellen und prozessualen Zusammenwirkens aufzusetzen.

In den USA wird die militärische Forschung maßgeblich von der DARPA gesteuert und unterstützt. In den vergangenen Jahren ist dabei mehr und mehr auch der zivile Forschungsbereich miteinbezogen worden, etwa bei KI. Die DARPA hatte den Dual-Use-Charakter verschiedener Spitzentechnologien erkannt und das Förderportfolio entsprechend angepasst.

Vor diesem Hintergrund legt die Expertenkommission der Bundesregierung nahe, die strikte Trennung zwischen ziviler und militärischer Forschung aufzuheben und nach einer Bestandsaufnahme entsprechende Formate fort- oder neu zu entwickeln.

A 3 Industriepolitik

A 3-1 Motive und Ausprägungen der Industriepolitik

Vor dem Hintergrund der großen gesellschaftlichen Herausforderungen wird seit einigen Jahren verstärkt der Einsatz industriepolitischer Maßnahmen diskutiert. Die Expertenkommission greift diese Diskussion auf und analysiert, welchen Beitrag die Industriepolitik zur Bewältigung der aktuellen Herausforderungen leisten kann. Dabei geht sie insbesondere der Frage nach, in welchem Verhältnis die Industriepolitik zu der in der Forschungs- und Innovationspolitik (F&I-Politik) formulierten Neuen Missionsorientierung steht, die ebenfalls einen Politikansatz darstellt, die großen Herausforderungen mit Hilfe von Innovationen anzugehen.

Hintergründe wiedererstarkter Industriepolitik

In der jüngeren Vergangenheit haben die Regierungen verschiedener Wirtschaftsräume in verstärktem Ausmaß mit industriepolitischen Maßnahmen in das Wirtschaftsgeschehen eingegriffen. Diese Hinwendung zur Industriepolitik wird vor allem mit drei – miteinander durchaus eng verwobenen – Zielsetzungen begründet, die durch aktuelle globale Entwicklungen an Bedeutung gewonnen haben: Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen sowie technologische und ökonomische Souveränität.⁹⁰ Diese Zielsetzungen ergänzen das Primat des Wachstums und der dahinterstehenden Marktkräfte, die das wirtschaftspolitische Denken seit Jahrzehnten prägen.

Fester Bestandteil der politischen und wissenschaftlichen Debatten ist die Einsicht, dass Wachstum zumindest perspektivisch ökologisch neutral sein sollte, dass Wachstum eine hohe internationale Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen erfordert und dass der Verlust an technologischer und ökonomischer Souveränität Wachstumsmöglichkeiten einschränkt. Es spricht viel dafür, dass sich Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und Souveränität nicht zu jedem Zeitpunkt und nicht in jeder Situation allein über die Kräfte des Marktes erreichen lassen.

- Angesichts des Klimawandels wird im wissenschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Diskurs die Notwendigkeit einer Dekarbonisierung des Wirtschaftsgeschehens als zunehmend dringlich erachtet. Industriepolitische Maßnahmen sollen Wirtschaft und Gesellschaft stärker auf Nachhaltigkeit ausrichten.
- Die Digitalisierung und Vernetzung⁹¹ von Wirtschaft und Gesellschaft – und zuletzt die dynamischen Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) – lassen in vielen Volkswirtschaften die Sorge wachsen, den Anschluss an technologische Entwicklungen zu verpassen. Diese Sorge besteht insbesondere bei Schlüsseltechnologien, die für die Entwicklung und Anwendung weiterer Technologien von essenzieller Bedeutung sind. Mit dem Einsatz industriepolitischer Maßnahmen ist die Hoffnung verbunden, technologische Rückstände aufzuholen und die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen einer Volkswirtschaft zu erhalten oder zu steigern.
- Die zunehmenden geopolitischen Spannungen, wie sie im Krieg in der Ukraine und im schwelenden Konflikt um den Status von Taiwan zutage treten, gefährden die internationalen Lieferketten. Industriepolitische Maßnahmen sollen dazu beitragen, kritische Abhängigkeiten einer Volkswirtschaft von importierten Technologien und von den dafür notwendigen Rohstoffen zu reduzieren, um so ihre technologische und ökonomische Souveränität zu stärken.⁹²

Unterschiedliche Ziele, unterschiedliche industriepolitische Maßnahmen

Wenngleich industriepolitische Zielsetzungen oft nicht überschneidungsfrei sind, erfordern unterschiedliche Zielsetzungen in der Regel unterschiedliche industriepolitische Maßnahmen.

- Unternehmen können durch erhöhte Anforderungen an die Dekarbonisierung von

Wertschöpfungsprozessen erheblich belastet werden, da sie negative externe Effekte – beispielsweise in Form von Schädigungen durch Treibhausgase – internalisieren müssen. So entsteht gegenüber konkurrierenden Unternehmen in Volkswirtschaften, die sich keinen Nachhaltigkeitszielen verpflichtet haben, ein Kostennachteil. Aus diesem Grund kann es sinnvoll sein, betroffene Unternehmen staatlich zu subventionieren oder einen Grenzausgleichsmechanismus⁹³ einzuführen. Die Unterstützung eigener Unternehmen kann allerdings wiederum zu Gegenmaßnahmen anderer Volkswirtschaften führen, die bei der Konzeptionierung der Maßnahmen zu bedenken sind. Ein aktuelles Beispiel für industriepolitische Maßnahmen im Kontext der Nachhaltigkeit ist der von der Europäischen Union (EU) angestrebte CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM).⁹⁴

- Für den Erhalt oder die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit kann es erforderlich sein, Unternehmen sowie bestehende oder zukünftige Schlüsseltechnologien vor internationalen Wettbewerbern zeitlich begrenzt zu schützen – und zwar dann, wenn junge oder strategisch relevante Technologien nur auf diese Weise eine hinreichende Verbreitung erreichen oder die Unternehmen, die sie entwickeln oder anwenden, nur so wettbewerbsfähig werden können.⁹⁵ Entsprechend diesem Infant-Technology-Argument können Unternehmen zeitweise durch Einfuhrzölle oder Importquoten vor ausländischer Konkurrenz geschützt oder mittels Steuererleichterungen, direkten Subventionen sowie einer strategisch ausgerichteten staatlichen Beschaffungspolitik gezielt beim Aufbau eines international konkurrenzfähigen Produktportfolios in den neuen Technologien unterstützt werden. Beispiele für eine auf die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit gerichteten Industriepolitik sind der US-amerikanische Chips and Science Act und das Europäische Chip-Gesetz zur Unterstützung von heimischen Halbleiterherstellern bei der Durchführung von Innovationsaktivitäten.⁹⁶
- Zur Sicherung der technologischen Souveränität kann es wiederum notwendig sein, Aufbau und Erhalt bestimmter Kompetenzen und Produktionsstrukturen im eigenen Wirtschaftsraum zu unterstützen. Ziel dieser Unterstüt-

zung sollte es sein, Unternehmen in die Lage zu versetzen, diese Technologien eigenständig anzuwenden und weiterzuentwickeln. Allerdings beschränkt dieses Vorgehen die wohlfahrtssteigernden Effekte der internationalen Arbeitsteilung. Zudem bindet es zwangsläufig Ressourcen, die nicht mehr an anderer Stelle mit höheren Wohlfahrtseffekten eingesetzt werden können. Beispiele für industriepolitische Maßnahmen zur Absicherung technologischer Souveränität sind die staatliche Unterstützung des taiwanesischen Halbleiterherstellers TSMC und seiner europäischen Partner beim Aufbau einer Chipfabrik in Dresden sowie die angekündigte Unterstützung für den geplanten Produktionsstandort des US-amerikanischen Halbleiterherstellers Intel in Magdeburg.

A 3-2 Konzeptionelle Überlegungen zur Industriepolitik

Der Diskurs über den Sinn industriepolitischer Eingriffe wird dadurch erschwert, dass es keine allgemein akzeptierte Definition von Industriepolitik gibt. Das Verständnis darüber, was Industriepolitik ist, hat sich seit ihrem Aufkommen im 18. Jahrhundert sowie in Abhängigkeit politischer und ökonomischer Denkschulen immer wieder stark gewandelt.⁹⁷ Entsprechend ist weder in der akademischen noch in der politischen Debatte eindeutig geklärt, welche staatliche Intervention als Industriepolitik zu betrachten ist und welche nicht.⁹⁸

Die Expertenkommission versteht unter industriepolitischen Maßnahmen direkte Eingriffe in das Marktgeschehen oder auch das Setzen von Rahmenbedingungen zur Beeinflussung von Marktergebnissen, um so einen leistungsfähigen Wirtschaftsstandort zu gewährleisten oder ihn zu befähigen, große gesellschaftliche Herausforderungen zu bewältigen.

Da Forschung und Entwicklung (FuE) im Wesentlichen im vormarktlischen Bereich stattfinden, wird eine ausschließlich auf FuE ausgerichtete Politik ebenso wie die Bildungspolitik in der Regel nicht als Industriepolitik gewertet. Allerdings kann die Gestaltung von Rahmenbedingungen für FuE, wie z. B. Regelungen beim Patentschutz, Auswirkungen auf den Markt haben.⁹⁹ Bei einer auf Innovation ausgerichteten Politik hingegen sind die Auswirkungen auf den Markt ganz offensichtlich und sogar inten-

diert. Da Innovationsaktivitäten deutlich über FuE-Tätigkeiten hinausgehen und spürbar in den Markt hineinwirken,¹⁰⁰ bildet die Innovationsphase den Nexus zwischen F&I-Politik und Industriepolitik.

Industriepolitische Maßnahmen unterscheiden sich u. a. darin, wie stark sie ausgewählte Technologien, Branchen, Regionen oder Unternehmen gegenüber anderen bevorzugen, und sind nicht auf die Branchen der industriellen Produktion beschränkt: In Anbetracht des Bedeutungszuwachses von Dienstleistungen sowie der branchenübergreifenden Verflechtung ökonomischer Strukturen werden heute wissensintensive Dienstleistungsbranchen in industriepolitische Betrachtungen miteinbezogen.¹⁰¹

A 3-3 Beschreibung und Bewertung verschiedener Ausprägungen von Industriepolitik

In der Literatur werden industriepolitische Maßnahmen häufig nach vertikalen und horizontalen Interventionsformen unterschieden. Während horizontale Maßnahmen weitestgehend branchenunabhängig sind und die Struktur einer Volkswirtschaft

in ihrer Gesamtheit in den Blick nehmen, zielen vertikale Maßnahmen auf spezifische Branchen oder Unternehmen ab.¹⁰²

Vertikale Industriepolitik: einseitig bevorzugender Charakter

Vertikale Industriepolitik umfasst staatliche Intervention in einzelne Sektoren oder Branchen, beispielsweise die Kohle- und Stahlbranche, den Maschinenbau oder die Energieversorgung.¹⁰³

Typische Maßnahmen einer vertikalen Industriepolitik sind staatliche Unterstützungen für Unternehmen in Form von Finanzierungs- und Investitionsbeihilfen sowie direkte Eingriffe in die Marktstruktur – wie Verstaatlichung oder Privatisierung von Unternehmen oder die Unterstützung von Unternehmenszusammenschlüssen, aber auch nachfrageseitige Instrumente wie Kaufprämien oder eine zielgerichtete öffentliche Beschaffung.¹⁰⁴

Vertikale industriepolitische Maßnahmen weisen somit einen klar einseitig bevorzugenden Charakter auf. Bei der Förderung von Innovationsaktivitäten bedeutet dies, dass als strategisch bedeutsam iden-

Tab. A 3-1 Ausprägungen von Industriepolitik

| Ausprägung der Industriepolitik | Begründung | Charakteristika | Beispiele |
|---------------------------------|---|--|--|
| Vertikale Industriepolitik | Marktversagen | <ul style="list-style-type: none"> – Staatliche Interventionen in einzelnen Sektoren oder Branchen – Klar einseitig bevorzugender Charakter – Ziel: Herausbildung international höchst wettbewerbsfähiger Unternehmen, sogenannter „nationaler Champions“, sowie Aufbau neuer oder Ausweitung bestehender Märkte | <ul style="list-style-type: none"> – Aufbau des europäischen Flugzeugbauers Airbus und des brasilianischen Flugzeugbauers Embraer – Subventionierung der Kohle- und Stahlindustrie |
| Horizontale Industriepolitik | Markt- und Staatsversagen | <ul style="list-style-type: none"> – Ausgestaltung infrastruktureller, juristischer und steuerlicher Rahmenbedingungen – Liberalisierung internationaler Handels- und Kapitalströme – Branchenübergreifender Charakter, kaum einseitig bevorzugende oder benachteiligende Elemente – Ziel: funktionierender Wettbewerb | <ul style="list-style-type: none"> – Schaffung des europäischen Binnenmarkts – Maßnahmen zur Unterstützung der Wagniskapitalfinanzierung von Start-ups |
| Integrierte Industriepolitik | Markt-, System- und Transformationsversagen | <ul style="list-style-type: none"> – Kombination vertikaler und horizontaler Maßnahmen – Berücksichtigung des Wechselspiels mit anderen Politikfeldern wie der Standort-, Regional-, Beschäftigungs- und F&I-Politik – Ziel: Schaffung und Sicherung von Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit sowie technischer und ökonomischer Souveränität | <ul style="list-style-type: none"> – Förderung des Netzwerks Silicon Saxony – US-amerikanischer Inflation Reduction Act – Europäischer Green Deal |



[Download der Abbildung](#)

tifizierte Technologien, Branchen oder Unternehmen selektiv unterstützt werden.

Als Ziel dieser Form der Industriepolitik werden oftmals die Herausbildung international höchst wettbewerbsfähiger Unternehmen, sogenannter „nationaler Champions“, sowie der Aufbau neuer oder die Ausweitung bestehender Märkte genannt. Staatliche Eingriffe werden in der Regel mit Verweis auf Marktversagen begründet (vgl. Box A 3-2). Auch das Infant-Technology-Argument wird herangezogen, um ausgewählte Branchen und Technologien staatlich zu unterstützen oder vor internationaler Konkurrenz abzuschirmen. Ein aktuelles Beispiel für den Versuch, eine in Deutschland und Europa noch wenig etablierte Technologie abzuschirmen, sind die von der EU-Kommission eingeführten Ausgleichszölle auf chinesische Elektrofahrzeuge, wengleich die Einführung dieser Zölle offiziell mit dem Vorliegen wettbewerbsverzerrender chinesischer Subventionen begründet wird.¹⁰⁵

In der aktuellen Diskussion um die neuen Zukunfts- und Schlüsseltechnologien und deren Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas gewinnen Argumente einer industriepolitischen Förderung zunehmend an Raum.¹⁰⁶ Bei bestimmten Schlüsseltechnologien, etwa bei Halbleitern, spielen auch Souveränitätsüberlegungen eine zentrale Rolle. In diesem Zusammenhang stellte die Bundesregierung dem US-Unternehmen Intel für den Aufbau einer Chip-Fabrik in Magdeburg Subventionen in Höhe von zehn Milliarden Euro in Aussicht.¹⁰⁷ Die offizielle Begründung ist allerdings kritisch zu sehen, da die Chip-Produktion in Magdeburg weiterhin von Vorprodukten aus China abhängig gewesen wäre und keine Regelung bestand, die dort produzierten Halbleiter im Krisenfall in Deutschland oder Europa zu halten.

Obschon vertikale Industriepolitik darauf ausgerichtet ist, Marktversagen zu beheben, kann sie mit erheblichen Risiken für Fehlentwicklungen verbunden sein. Sie kann zum Beispiel zu teuren, ineffizienten Subventionswettläufen führen oder zu einer Verdrängung nicht geförderter Unternehmen. Bei Märkten mit wenig Wettbewerb begünstigen vertikale industriepolitische Maßnahmen effizienzmindernendes Verhalten durch die geförderten Akteure wie beispielsweise Vetternwirtschaft und Rent-Seeking-Verhalten¹⁰⁸ und damit die Etablierung von Marktmacht.

Die empirische Evidenz zur Wirksamkeit von vertikalen industriepolitischen Maßnahmen fällt nicht eindeutig aus. Beim Blick auf praktische Erfahrungen stehen zumeist positiv bewertete Beispiele wie der Aufbau des europäischen Flugzeugbauers Airbus und des brasilianischen Flugzeugbauers Embraer zahlreichen eher negativ bewerteten Beispielen gegenüber. Zu den negativen zählen die Entwicklung der Concorde, die als wirtschaftlich gescheitert gilt, oder der erfolglose Versuch, eine der US-amerikanischen Computerindustrie ebenbürtige europäische Computerindustrie aufzubauen.¹⁰⁹

Horizontale Industriepolitik: geringere Risiken der Fehlsteuerung

Das Hauptaugenmerk horizontaler Industriepolitik liegt auf der Ausgestaltung der infrastrukturellen, juristischen und steuerlichen Rahmenbedingungen für einen funktionierenden Wettbewerb sowie auf der Liberalisierung internationaler Handels- und Kapitalströme.¹¹⁰ Dabei sind die Grenzen zur klassischen Ordnungspolitik¹¹¹ fließend. Die horizontale Industriepolitik ist eher angebotsseitig darauf ausgerichtet, Wachstumsimpulse zu setzen. Ökonomisch begründet wurde die horizontale Industriepolitik mit Verweisen nicht nur auf Markt-, sondern auch auf Staatsversagenstatbestände (vgl. Box A 3-2).

Aufgrund ihres branchenübergreifenden Charakters enthalten horizontale Maßnahmen idealtypischerweise kaum einseitig bevorzugende oder benachteiligende Elemente. Beispiele für horizontale Industriepolitik sind die Schaffung des europäischen Binnenmarktes oder Maßnahmen zur Unterstützung der Wagniskapitalfinanzierung von Start-ups.

Wengleich Innovationen im Kontext einer horizontalen Industriepolitik keine unmittelbare Rolle spielen, können horizontale industriepolitische Maßnahmen zur Schaffung von Kompetenzen und Infrastrukturen beitragen, die das Hervorbringen von Innovationen befördern.¹¹² Dabei begünstigen diese Maßnahmen zwangsläufig bestimmte wirtschaftliche Aktivitäten gegenüber anderen, sodass auch horizontale Politiken nicht völlig frei von einseitigen Bevorzugungen sind.¹¹³ So kommen regulatorische Maßnahmen, die Wagniskapitalinvestitionen erleichtern, vor allem IT-Start-ups mit schnell skalierbaren Geschäftsmodellen zugute und nur in geringerem Ausmaß Start-ups aus anderen Branchen.

Insgesamt wird die horizontale Industriepolitik hinsichtlich ihrer Wirkung in der Literatur positiver bewertet als rein vertikal ausgerichtete Maßnahmen.¹¹⁴ Vorteile der horizontalen Industriepolitik sind der weitgehende Verzicht auf einseitig begünstigende Elemente sowie die geringere Eingriffstiefe in das Marktgeschehen.

Integrierte Industriepolitik: hohe Anforderungen an Governance

Die integrierte Industriepolitik kombiniert vertikale und horizontale Maßnahmen und berücksichtigt das Wechselspiel mit anderen Politikfeldern wie der Standort-, Regional-, Beschäftigungs- und F&I-Politik.¹¹⁵ Im Vergleich zur „klassischen“ vertikalen und horizontalen Industriepolitik liegt der Fokus stärker auf aktivierenden Maßnahmen, die innovationsgetriebenes Wachstum fördern sollen. Als Begründung für eine integrierte Industriepolitik wird auf das Vorliegen von Markt- und Systemversagenstatbeständen verwiesen (vgl. Box A 3-2).

Als Beispiel für eine erfolgreiche integrierte Industriepolitik gilt das im Jahr 2000 gestartete Netzwerk Silicon Saxony.¹¹⁶ Die beteiligten Unternehmen und Institutionen primär aus den Branchen Mikroelektronik und Software werden mithilfe unterschiedlicher Fördermaßnahmen von Bund, Land und EU unterstützt. Neben dem horizontal ausgerichteten Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kommen auch eher vertikal ausgerichtete Maßnahmen, wie beispielsweise der Spitzencluster-Wettbewerb und die Initiative Important Projects of Common European Interest (IPCEI)¹¹⁷ für Mikroelektronik und Kommunikationstechnologien, zum Einsatz.¹¹⁸

Als weniger erfolgreich gilt der Versuch, mit dem Solar Valley bei Bitterfeld-Wolfen einen international erfolgreichen Photovoltaik-Standort aufzubauen. Mittels Subventionen in Form von Einspeisevergütungen und Einspeisevorrang für Solarstrom sowie Zuschüssen und vergünstigten Darlehen für die Installation von Solaranlagen konnten die Produktionskapazitäten zunächst stark ausgebaut werden. Allerdings erreichte das Solar Valley keine kritische Größe und geriet infolge des zunehmenden Kostendrucks durch chinesische Anbieter in eine existenzielle Krise.¹¹⁹

Als Ziel integrierter industriepolitischer Maßnahmen wird in der aktuellen Debatte oft auf die

Schaffung bzw. Sicherung von Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit sowie technischer und ökonomischer Souveränität verwiesen. Zur Begründung werden neben Markt- und Systemversagen zusätzlich Tatbestände des Transformationsversagens angeführt (vgl. Box A 3-2).¹²⁰ Industriepolitik dieser Art, die innovative und transformative Prozesse anstößt, weist große Überschneidungen mit dem Politikansatz der Neuen Missionsorientierung auf (vgl. Box A 2-1), der auf die Bewältigung ebendieser Herausforderungen ausgerichtet ist.

Zentrales Element der Neuen Missionsorientierung sind Missionen, die das Bindeglied zwischen den großen gesellschaftlichen Herausforderungen und konkreten F&I-Projekten bilden. Bei der Umsetzung der Missionen geht es darum, drängende Probleme innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens und Budgets zu lösen. Direkten Markteingriffen kommt dabei nach Vorstellung der Expertenkommission ausdrücklich eine katalytische Funktion zu, d. h. sie dienen dazu, Unternehmen das Wechseln von einem etablierten Pfad auf einen neuen Entwicklungspfad zu erleichtern. Sobald dieser Wechsel gelungen ist, sollte die Maßnahme beendet werden. Missionen können in der Regel nicht allein durch die Beiträge der F&I-Politik erfüllt werden, sondern erfordern komplementäre Impulse aus anderen Politikfeldern.¹²¹

Beispiele für diese sehr weit gefasste integrierte Industriepolitik, die Strukturelemente der Neuen Missionsorientierung erkennen lassen, sind der US-amerikanische Inflation Reduction Act (IRA) und der Europäische Green Deal (EGD).¹²² Sowohl der IRA als auch der EGD sind als umfassende wirtschaftspolitische Rahmenprogramme konzipiert, die den Zielsetzungen Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und Souveränität dienen.¹²³ Beide Programme verbinden selektive vertikale Maßnahmen mit horizontalen Interventionsformen und weisen vielfältige Schnittstellen zu anderen Politikfeldern auf, beispielsweise zur Kohäsions-, Sozial-, Beschäftigungs- und Bildungspolitik.¹²⁴

Eine Gesamtbewertung integrierter Industriepolitik ist schwierig, was neben ihrer Komplexität auch daran liegt, dass viele Maßnahmen langfristig angelegt und noch nicht abgeschlossen sind. Generalisierbare Aussagen zu den Auswirkungen einer auf Wissens-Spillover- und Agglomerationseffekte ausgerichteten Industriepolitik auf Innovationsleistung und Produktivität lassen sich daher empirisch nicht herleiten.¹²⁵

Box A 3-2 Theoretische Begründungen für industriepolitische Maßnahmen

Marktversagen

Externe Effekte

Bei externen Effekten handelt es sich um (positive oder negative) Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten auf Dritte, die nicht vom Marktmechanismus erfasst werden und sich somit nicht im Marktpreis des jeweiligen Guts oder der Dienstleistung widerspiegeln.¹²⁶ Da externe Effekte nicht in das einzelwirtschaftliche Kalkül der die Wirkungen auslösenden Akteure eingehen, berücksichtigen diese in ihren Entscheidungen nicht sämtliche auf gesamtwirtschaftlicher Ebene auftretenden Kosten und Nutzen. Hier besteht ein Ansatzpunkt für industriepolitische Maßnahmen, die beispielsweise darauf hinwirken können, dass Umweltbeeinträchtigungen, die im Zuge von Produktionsprozessen entstehen, internalisiert werden.

Wissens-Spillover

Bei F&I-Aktivitäten treten externe Effekte in Form von Wissens-Spillover auf, die die F&I betreibenden Akteure nicht verhindern können.¹²⁷ Dritte können somit durch Inspektion eines innovativen Guts an Wissen gelangen, ohne selbst die vollen Kosten der Wissensproduktion tragen zu müssen. Die Innovationsakteure können sich deshalb nicht die vollen gesamtwirtschaftlichen Erträge ihrer Produkt- oder Prozessentwicklungen aneignen und betreiben in der Konsequenz weniger F&I, als aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wünschenswert wäre. Industriepolitische Maßnahmen hingegen können darauf abzielen, ein gesamtgesellschaftlich wünschenswertes Niveau an F&I-Aktivitäten zu erreichen.

Marktmacht

Unternehmenskonzentrationen sowie Monopolstellungen bei kritischen Rohstoffen können Einfluss auf die Mengen der angebotenen Produkte oder Dienstleistungen sowie auf deren Preise haben. Unternehmenskonzentrationen resultieren etwa aus positiven Skalen-, Verbund- oder Netzwerkeffekten¹²⁸ und erschweren den Marktzutritt potenzieller Wettbewerber. So weisen beispielsweise die großen US-amerikanischen Internetkonzerne eine hohe Marktmacht auf, die die Entwicklung einer entsprechenden Branche in Europa erschwert und langfristig dessen technologische und ökonomische Souveränität gefährden kann. Monopolstellungen ausländischer Unternehmen bei kritischen Rohstoffen können dazu führen,

dass die wirtschaftliche Entwicklung einzelner Branchen oder auch der gesamten Wirtschaft von diesen Unternehmen und der Ausfuhrpolitik der entsprechenden Länder abhängig ist. Marktmacht kann dort, wo wettbewerbspolitische Maßnahmen nicht greifen, industriepolitische Eingriffe rechtfertigen. So kann eine Regierung heimischen Unternehmen durch gezielte Subventionen (z.B. für F&I oder Produktion) helfen, gegenüber marktmächtigen ausländischen Konkurrenten eine stärkere Position einzunehmen.¹²⁹

Systemversagen

Der Begriff Systemversagen fasst funktionale Mängel des Innovationssystems zusammen, die die Entwicklung und den Einsatz von Innovationen behindern.¹³⁰ Aufgrund dieser Mängel werden Innovationsaktivitäten in zu geringem Umfang durchgeführt. So behindern z.B. unzureichende Interaktionen mit anderen Akteuren die Nutzung komplementärer Wissensquellen und interaktive Lernprozesse. Mangelnde Kompetenzen der Innovationsakteure führen dazu, dass sie neues Wissen nicht aufnehmen und neue Technologien nicht aufgreifen. Rechtliche Regelungen, die nicht innovationsfreundlich ausgestaltet sind, können die Entwicklung und den Einsatz von Innovationen hemmen. Und private Investoren stellen aufgrund des damit verbundenen Aufwands und des auf lange Sicht angelegten Betriebs aus gesamtwirtschaftlicher Sicht zu wenig innovationsrelevante Infrastruktur bereit. Mit dem Vorliegen von Systemversagen begründete industriepolitische Maßnahmen zielen darauf ab, Kooperation und Wissensaustausch zu intensivieren.

Transformationsversagen

Transformationsversagen bezieht sich auf Hürden, die verhindern, dass sich ein transformativer Wandel zur Erreichung gesellschaftlich erwünschter Ziele vollzieht oder beschleunigt.¹³¹ So kann transformativer Wandel dadurch gebremst oder behindert werden, dass ihn tragende und aus gesamtgesellschaftlicher Sicht wünschenswerte innovative Produkte oder Dienstleistungen nicht nachgefragt werden. Zudem sind Akteure aufgrund von Netzwerk- und Lock-in-Effekten ggf. nicht in der Lage, einen Richtungswechsel hin zu gesellschaftlich erwünschten Transformationszielen vorzunehmen. Industriepolitisches Handeln kann in diesem Fall dazu führen, dass der Staat Märkte schafft oder Netzwerk- und Lock-in-Effekte überwindet.

A 4-4 Grenzen der Industriepolitik

Begrenztes Wissen als Problem industriepolitischer Praxis

Industriepolitische Eingriffe sind mit einem grundsätzlichen Problem verbunden: Die verantwortlichen politischen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger verfügen nur über begrenztes Wissen darüber, wie sich Technologien und Geschäftsmodelle sowie die Nachfrage nach ihnen entwickeln werden.¹³² Dieses Wissen ist in den Unternehmen, die diese Technologien und Geschäftsmodelle entwickeln und anwenden, in der Regel umfangreicher.

Langfristige industriepolitische Strategien auf der Basis begrenzten Wissens zu formulieren, birgt erhebliche Risiken. Umgekehrt ist allerdings auch der Verzicht auf eine strategische Festlegung mit der Gefahr verbunden, wichtige technologische Entwicklungen durch unzureichende Unterstützung und nicht angepasste Rahmenbedingungen zu verpassen oder zu verhindern.¹³³ Ein weiteres Problem ist die konkrete Ausgestaltung industriepolitischer Maßnahmen. So lässt sich die Entscheidung darüber, wann eine Maßnahme begonnen und nach welchen Kriterien sie beendet werden sollte, wissenschaftlich nicht eindeutig beantworten. Die politische Praxis zeigt, dass die Streichung von Subventionen für die politischen Entscheidungsträger mit hohen Risiken verbunden ist, weshalb ein Ausstieg in vielen Fällen unterbleibt oder hinausgezögert wird.¹³⁴ Entscheidungen über industriepolitische Maßnahmen laufen somit Gefahr, nach politischer Opportunität – und nicht nach objektiven Kriterien – getroffen zu werden.

Erfolg und Misserfolg von Industriepolitik stark kontextabhängig

Die Bewertung unterschiedlicher industriepolitischer Ansätze kommt zu keinem eindeutigen Ergebnis.¹³⁵ Wenngleich die Literatur erhebliche methodische Fortschritte bei der Evaluation industriepolitischer Maßnahmen konstatiert, sind ökonomische Schätzungen von Effekten industriepolitischer Interventionen auf wirtschaftliches Wachstum nach wie vor nur sehr eingeschränkt möglich. Diese Einschränkungen sind zum Teil auf das Fehlen kontrafaktischer Szenarien zurückzuführen,¹³⁶ d. h. auf die fehlende Möglichkeit, Entwicklungen zu erfassen, die stattgefunden hätten, wenn es eine bestimmte Maßnahme nicht gegeben hätte.

Darüber hinaus sind generalisierbare Aussagen zur Effektivität von industriepolitischen Eingriffen auch deshalb kaum möglich, weil die Art der Umsetzung sowie die sich verändernden Rahmenbedingungen den Erfolg der jeweiligen Maßnahme massiv mitbestimmen.¹³⁷ So ist beispielsweise fraglich, inwieweit Maßnahmen, die von Schwellenländern erfolgreich angewendet werden, von Industrieländern an der aktuellen Technologieschwelle übernommen werden sollten.¹³⁸

A 4-5 Handlungsempfehlungen

Die Industriepolitik erfährt seit einigen Jahren eine Renaissance.¹³⁹ Industriepolitische Maßnahmen werden vor allem ergriffen, um Nachhaltigkeit zu fördern, die Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen zu stärken und die technologische und ökonomische Souveränität zu gewährleisten. Bei der Erwägung industriepolitischer Maßnahmen sind allerdings immer auch mögliche Nachteile und Risiken in den Blick zu nehmen.

Industriepolitik horizontal ausrichten und durch vertikale Maßnahmen flankieren

- Industriepolitische Maßnahmen sollten nicht ergriffen werden, um Unzulänglichkeiten in anderen Politikfeldern zu kompensieren. Sie können innovationsfreundliche ordnungspolitische sowie institutionelle Rahmenbedingungen nicht ersetzen, sondern lediglich ergänzen.
- Industriepolitik sollte im Grundsatz horizontal ausgerichtet werden. Das heißt, industriepolitische Maßnahmen sollten möglichst branchenunabhängig gestaltet werden, um einen Wettbewerb um die besten Problemlösungen zu ermöglichen.
- Sofern branchenspezifisches Markt-, System- oder Transformationsversagen vorliegt oder die technologische Souveränität gefährdet ist, können vertikale Maßnahmen die horizontalen industriepolitischen Maßnahmen flankieren, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Förderentscheidungen sollten bei Maßnahmen der vertikalen Industriepolitik möglichst technologieoffen und im Rahmen eines Wettbewerbsverfahrens getroffen werden.

Maßnahmen der vertikalen Industriepolitik katalytisch anlegen

- Wenn flankierend zu horizontalen auch vertikale Maßnahmen der Industriepolitik zum Einsatz kommen, sollten sie primär auf potenziell wachstumsstarke und forschungsintensive Branchen ausgerichtet werden, um langfristig erfolgreich zu sein und Spillover-Effekte zu erzeugen.
- Maßnahmen der vertikalen Industriepolitik sollten lediglich eine katalytische Funktion erfüllen und Unternehmen nicht dauerhaft unterstützen. Ähnlich wie bei der Neuen Missionsorientierung geht es darum, eine Anstoßwirkung zu entfalten und danach die Förderung einzustellen.
- Auch wenn sich Deutschland in einem internationalen Standortwettbewerb um die Ansiedlung innovativer Unternehmen befindet, sollte sich die Politik nicht in Subventionswettläufe hineinziehen lassen. Stattdessen gilt es, Standorte in Deutschland durch Infrastrukturmaßnahmen sowie durch Maßnahmen zur Förderung von Forschungstätigkeiten für Unternehmen hochattraktiv zu machen.

Transformativen Strukturwandel befördern statt Strukturen erhalten

- Während die Neue Missionsorientierung F&I-politisch und somit primär vormarktllich ausgerichtet ist, setzt die integrierte Industriepolitik auf marktliche Eingriffe. Zur Bewältigung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen empfiehlt die Expertenkommission der Bundesregierung, beide Ansätze zu nutzen, um einen Wechsel auf neue Entwicklungspfade zu ermöglichen.
- Wenn industriepolitische Maßnahmen zur Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen bei Unternehmen zu Umstellungskosten führen, die sie überfordern, kann die Bundesregierung zwar temporär zu kompensierenden Maßnahmen greifen.¹⁴⁰ Vorzuziehen ist jedoch eine Politik, die diese Kosten möglichst gering hält. Das erfordert, proaktiv und möglichst frühzeitig bestehende Transformationshemmnisse abzubauen. Maßnahmen, die auf eine Konservierung bestehender Struktu-

ren abzielen, können auf lange Sicht erhöhte Kosten nach sich ziehen.

- Im Kontext der Nachhaltigkeit stellt die Abstimmung industriepolitischer Maßnahmen eine besondere Herausforderung dar. Mit dem Emissionshandel steht bereits ein effizientes klimapolitisches Instrument auf europäischer Ebene zur Verfügung; statt zusätzlicher industriepolitischer Eingriffe kann es hier also ausreichen, ihn umfassender auszugestalten.

Marktdynamik erhöhen und Wettbewerbsfähigkeit steigern

- Gute Industriepolitik zeichnet sich dadurch aus, dass sie unternehmerisches Handeln fördert. Sie sollte primär die Entstehung und das Wachstum neuer Unternehmen ermöglichen und sich bei der Unterstützung etablierter Unternehmen weitgehend zurückhalten.
- Im Zusammenspiel mit der Wettbewerbspolitik sollte die Industriepolitik den Wettbewerb stimulieren, um Innovationsaktivitäten anzuregen sowie vorhandene komparative Vorteile auszubauen und neue zu erschließen. Dazu sollte die Anpassungsfähigkeit der Unternehmen an neue Entwicklungen vor allem im Bereich der Schlüsseltechnologien gestärkt werden.
- Um Innovationen im Bereich potenzieller Schlüsseltechnologien zu unterstützen, kann es – im Sinne des Infant-Technology-Arguments – sinnvoll sein, nicht nur im vormarktllichen Bereich zu fördern, sondern auch im marktlichen Bereich zeitlich begrenzte subventionierende Eingriffe vorzunehmen.¹⁴¹

Offenheit und Souveränität ausbalancieren

- Technologische und ökonomische Souveränität dürfen nicht als Autarkie fehlinterpretiert werden. Internationale Arbeitsteilung bringt Spezialisierungsvorteile und ist eine Grundlage für Wohlstand. Deutschland und Europa sollten sich daher weiterhin für einen offenen und fairen Welthandel einsetzen.
- Als Reaktion auf geopolitische Herausforderungen können industriepolitische Eingriffe gerechtfertigt sein, um die Versorgung mit schwer substituierbaren Gütern zu sichern

und die Möglichkeit zu schaffen, Schlüsseltechnologien selbst bereitzustellen oder ohne einseitige Abhängigkeiten zu beziehen.

- Das industriepolitische Ziel, die technologische und ökonomische Souveränität zu stärken, sollte nicht im nationalen Alleingang verfolgt, sondern intensiver als bisher mit den europäischen Partnern koordiniert werden.

Evidenzbasierung der Industriepolitik stärken

- Oft werden industriepolitische Maßnahmen mit einem allgemeinen Verweis auf Marktversagenstatbestände gefordert. Es obliegt dann den Kritikerinnen und Kritikern der Eingriffe, nachzuweisen, dass das konstatierte Marktversagen nicht vorliegt. Die Expertenkommission

hingegen befürwortet den Grundsatz, dass die Beweislast für das Vorliegen eines Marktversagens stets bei den Befürwortern einer industriepolitischen Maßnahme liegen sollte.

- Obwohl eine Evidenzbasierung der Industriepolitik nur in begrenztem Maße möglich ist, sollten industriepolitische Maßnahmen so weit wie möglich auf der Grundlage wissenschaftlich fundierter Analysen gestaltet werden.
- Kausalanalysen sollten, soweit methodisch möglich, in die Maßnahmen der Industriepolitik integriert werden. Dazu gehört auch, die für die Kausalanalysen notwendigen Datengrundlagen zu schaffen. Die Ergebnisse der Analysen sollten für Politiklernen genutzt werden.

B

KERNTHEMEN 2025



B 1 Transformativer Strukturwandel durch Digitalisierung und Dekarbonisierung



[Download der
Abbildung](#)





B 1 Transformativer Strukturwandel durch Digitalisierung und Dekarbonisierung

Wirtschaftswachstum und Strukturwandel sind eng miteinander verknüpft. Aktuell stehen in Deutschland zwei Facetten des Strukturwandels im Mittelpunkt: Die Digitalisierung stärkt die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen; die Umstellung auf eine kohlenstoffneutrale Wirtschaft – im Folgenden als Dekarbonisierung¹⁴² bezeichnet – ist von zentraler Bedeutung für den politisch gewollten Übergang hin zu einer umweltverträglichen Wirtschaftsweise und das Erreichen der Klimaziele, die sich Deutschland gegeben hat.¹⁴³

Digitalisierung und Dekarbonisierung verändern die Struktur der deutschen Volkswirtschaft, wobei einzelne Regionen, Sektoren und Betriebe unterschiedlich betroffen sind. Ziel dieses Kapitels ist es, Stand und Dynamik des durch diese beiden Kräfte induzierten Strukturwandels sowie dessen bisherige politische Begleitung zu dokumentieren und einzuordnen. Dieser durch Digitalisierung und Dekarbonisierung induzierte Strukturwandel wird im Folgenden als „transformativer“ Strukturwandel bezeichnet, um seine Verknüpfung mit der ökonomischen Transformation hervorzuheben. Zugleich weist die verwendete Begrifflichkeit darauf hin, dass weitere Aspekte und Auslöser von Veränderungen der Wirtschaftsstruktur wie etwa die demografische Alterung oder (De-) Urbanisierungstendenzen trotz ihrer ökonomischen Relevanz außerhalb des Fokus der nachfolgenden Betrachtungen bleiben.

Grundlage dieses Kapitels sind empirische Auswertungen zu drei wesentlichen Aspekten des transformativen Strukturwandels.

(1) Die Expertenkommission hat mittels Patentdaten untersucht, wie stark sich die Technologieentwicklung in Deutschland auf Digitalisierung und Dekarbonisierung

fokussiert, inwieweit also eine eigene technologische Basis für den transformativen Strukturwandel geschaffen wird.

- (2) Die mit dem transformativen Strukturwandel verbundene erwartete Transformationsdynamik auf dem Arbeitsmarkt wird auf Basis umfassender Individualdaten zu Tätigkeitsprofilen der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nachgezeichnet: Dabei werden Indikatoren¹⁴⁴ genutzt, die das Tätigkeitsprofil des jeweils ausgeübten Berufs hinsichtlich seines Digitalisierungspotenzials im Sinne der Substituierbarkeit durch Computer oder computergesteuerte Maschinen einerseits und seiner Umweltrelevanz andererseits charakterisieren.
- (3) Darüber hinaus wird am Beispiel der Projektförderung des Bundes untersucht, inwieweit Fördermaßnahmen in der Vergangenheit auf Digitalisierung und Dekarbonisierung ausgerichtet waren.¹⁴⁵

Die Politik sollte den mit Digitalisierung und Dekarbonisierung verbundenen transformativen Strukturwandel aktiv begleiten. Dabei sollte sie sich darauf konzentrieren, die Entwicklung und Umsetzung digitaler und klimaschonender Aktivitäten zu ermöglichen und ggf. zu unterstützen, anstatt bestehende Strukturen zu konservieren. Um den Rückstand Deutschlands im Bereich der Digitalisierung aufzuholen, müssen die digitale Infrastruktur und die Möglichkeiten zur Datennutzung ausgebaut werden. Ein über alle Sektoren einheitlicher CO₂-Preis sollte als zentrales Politikinstrument zur Förderung der Dekarbonisierung dienen. Maßnahmen

der Regionalpolitik sind so auszugestalten, dass sie den transformativen Strukturwandel in den Regionen fördern. Um die große Zahl derjenigen Beschäftigten zu unterstützen, deren Tätigkeiten stark von der Digitalisierung oder der Dekarbonisierung betroffen sind, sollten die Arbeitsmarktmobilität gefördert und die berufliche Weiterqualifizierung gestärkt werden.

B 1-1 Innovation und Beschäftigung im Zuge von Digitalisierung und Dekarbonisierung

Patente: Deutschland wenig auf Digitalisierung und stark auf Dekarbonisierung fokussiert

Die Digitalisierung ermöglicht Produktivitätssteigerungen durch Prozessinnovationen. Zugleich bildet sie die Basis von Produktinnovationen und neuen Geschäftsmodellen. Auch die Dekarbonisierung ist eng mit dem technologischen Wandel verbunden. Umfangreiche Innovationen sind erforderlich, um energieintensive Produktionsprozesse etwa in der Chemieindustrie klimaverträglicher auszugestalten zu können, ohne dass die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen verloren geht. Innovative, klimaschonende Alternativen zu bestehenden Produkten und Geschäftsmodellen tragen ebenfalls zur Dekarbonisierung bei.

Die Entwicklung der technologischen Basis von Digitalisierung und Dekarbonisierung kann durch Patentanmeldungen in den jeweils relevanten Technologiefeldern nachgezeichnet werden. Dazu hat die Expertenkommission transnationale Patentanmeldungen im Zeitraum 2000 bis 2021 ausgewertet.¹⁴⁶ Im Jahr 2021 stammte über ein Drittel aller Digitalisierungspatente in den EU-27 von in Deutschland ansässigen Anmelderrinnen und Anmeldern. Jedoch blieb Deutschland mit rund 3.700 Patentanmeldungen, ebenso wie die EU-27 insgesamt mit ca. 9.700 digitalisierungsbezogenen Patenten, weit hinter den USA (17.800) und China (21.600) zurück. Bis 2016 führten die USA bei den Patentanmeldungen, seit 2017 weist China die meisten Anmeldungen auf. Im Bereich Dekarbonisierung liegt China mit über 9.600 Anmeldungen vor den EU-27 (9.500) und den USA (6.100). Deutschland liegt mit ca. 4.000 hinter China, den USA und Japan, aber vor Südkorea, Frankreich, dem Vereinigten Königreich und Kanada.¹⁴⁷

Wie stark sich die Technologieentwicklung in einem Land auf Felder fokussiert, die für die Digitalisierung bzw. Dekarbonisierung bedeutsam sind, drückt sich im Anteil der jeweiligen Patente am gesamten Patentaufkommen des Landes aus (vgl. Abbildung B 1-1). Im Bereich der Digitalisierung ist Deutschland trotz eines leicht steigenden Anteils das Schlusslicht unter den ausgewählten Ländern. China weist den größten Anteil von Digitalisierungspatenten auf (29,8 Prozent aller dort angemeldeten Patente im Jahr 2021), gefolgt von den USA, Kanada und Südkorea (alle 26 bis 28 Prozent). Im Bereich Dekarbonisierung steigt Deutschlands Anteil seit 2015. Er lag 2021 mit 13,8 Prozent knapp über dem EU-27-Durchschnitt (13,5 Prozent) und wird in der Spitzengruppe nur von Südkorea und Frankreich übertroffen (jeweils rund 16 Prozent).¹⁴⁸

Beschäftigungsanteile: Rückgang bei Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial und bei umweltschädlichen Berufen

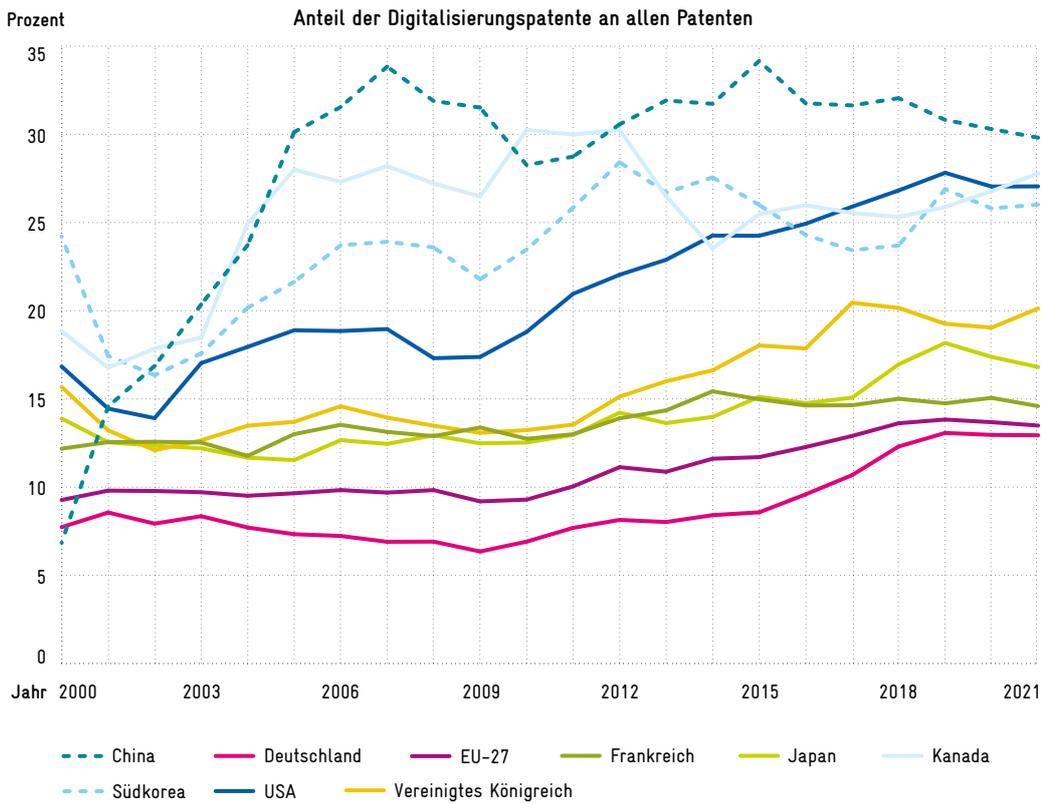
Digitalisierung und Dekarbonisierung verändern die Anforderungen an Beschäftigte sowie die Arbeitsmarktnachfrage nach unterschiedlichen Tätigkeiten und Kompetenzen. Diese Veränderungen spiegeln sich in den Anteilen verschiedener Berufe an der Gesamtbeschäftigung wider. Die nachfolgenden Analysen basieren auf Daten des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) zu sozialversicherungspflichtigen und geringfügigen Beschäftigungsverhältnissen, die in einer von der Expertenkommission beauftragten Studie ausgewertet wurden.¹⁴⁹ Sie lassen Selbstständige sowie Beamtinnen und Beamte unberücksichtigt.

Die Tätigkeiten von Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial (vgl. Box B 1-2) weisen eine hohe Wahrscheinlichkeit auf, durch Computer oder computergesteuerte Maschinen ersetzt zu werden. Der Anteil der Beschäftigung in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial sank zwischen 2013 und 2022 um 3,6 Prozentpunkte, während die Beschäftigung in Berufen mit mittlerem und geringem Digitalisierungspotenzial zunahm (um 1,7 und 1,9 Prozentpunkte). Im Jahr 2022 waren 36,8 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial tätig. Dies verdeutlicht, dass auf dem Arbeitsmarkt weiterhin mit starken Auswirkungen der Digitalisierung zu rechnen ist.

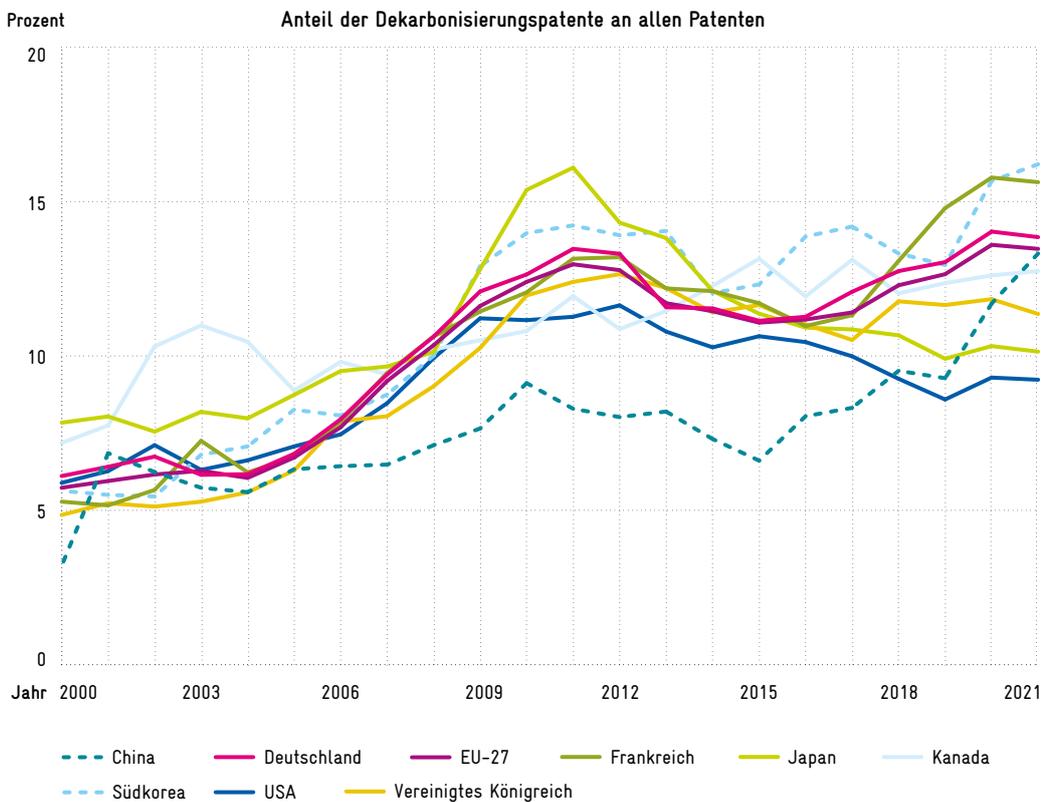
Abb. B 1-1 Transnationale Patentanmeldungen ausgewählter Länder 2000–2021 in Prozent



[Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Der Anteil der in Deutschland angemeldeten Patente im Bereich Digitalisierung an allen in Deutschland angemeldeten Patenten lag im Jahr 2021 bei 12,9 Prozent.



Lesebeispiel: Der Anteil der in Deutschland angemeldeten Patente im Bereich Dekarbonisierung an allen in Deutschland angemeldeten Patenten lag im Jahr 2021 bei 13,8 Prozent.

Quelle: PATSTAT. Eigene Berechnungen. Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Box B 1-2 Indikatoren für die Arbeitsmarkt Betrachtung

Digitalisierungspotenzial eines Berufs

In diesem Kapitel wird das Digitalisierungspotenzial eines Berufs anhand des Indikators Substituierbarkeitspotenzial¹⁵⁰ gemessen. Dieser Indikator erfasst den Anteil an Tätigkeiten in einem Beruf, der beim jeweiligen Stand der Technik potenziell von Computern oder computergesteuerten Maschinen ersetzt und damit automatisiert werden kann. So gelten beispielsweise die Tätigkeiten „Fristenüberwachung“ und „Abrechnung“ bei den Rechtsanwaltsfachangestellten als automatisierbar, die Tätigkeit „Büromanagement“ hingegen nicht.¹⁵¹

Es werden drei Kategorien unterschieden:

- hohes Digitalisierungspotenzial: 70 Prozent oder mehr der Tätigkeiten eines Berufs können substituiert werden,
- mittleres Digitalisierungspotenzial: weniger als 70, aber mehr als 30 Prozent der Tätigkeiten eines Berufs können substituiert werden,
- geringes Digitalisierungspotenzial: bis zu 30 Prozent der Tätigkeiten eines Berufs können substituiert werden.

Digitalisierungspotenziale werden in der betrieblichen Praxis typischerweise nur zum Teil ausgeschöpft, da wirtschaftliche, ethische oder rechtliche Aspekte einer Automatisierung entgegenstehen können.¹⁵²

Der Indikator bezieht sich bewusst auf alle Tätigkeiten in einem Beruf und ist nicht auf die digitalen Kompetenzen von Beschäftigten ausgerichtet.¹⁵³ Er wird für die Gesamtheit aller Berufe ermittelt.¹⁵⁴ Die konkrete Klassifizierung der beruflichen Tätigkeiten basiert auf den Angaben im BERUFENET der Bundesagentur für Arbeit (BA), das ca. 4.000 Berufe umfasst. In diesem Kapitel wird der Indikator für das Jahr 2022 verwendet. Somit ist die im Zeitverlauf zunehmende Automatisierbarkeit von Tätigkeiten in Berufen bei der retrospektiven Betrachtung von Beschäftigungsveränderungen bereits berücksichtigt. Infolgedessen betrachten die nachfolgenden Analysen ausschließlich Veränderungen, die durch Berufswechsel entstanden sind sowie durch Beschäftigte, die zwischen den betrachteten Stichtagen den Arbeitsmarkt verlassen oder neu betreten haben.¹⁵⁵

Umweltrelevanz eines Berufs

Die potenzielle Betroffenheit bestimmter Berufe im Kontext der Dekarbonisierung der Wirtschaft wird in

diesem Kapitel über den sogenannten Greenness-of-Jobs-Index (GOJI)¹⁵⁶ angenähert. Bei der Berechnung dieses Index werden die einzelnen Tätigkeiten in einem Beruf jeweils als umwelt- und klimafreundlich, umwelt- und klimaneutral oder umwelt- und klimaschädlich bewertet, wobei sich diese Bewertung auf alle Handlungsfelder der ökologischen Transformation bezieht und damit über die reine Dekarbonisierung hinausgeht. So wird beispielsweise die Tätigkeit „Dachflächen energetisch dämmen“ bei Dachdeckerinnen und Dachdeckern als umwelt- und klimafreundlich eingestuft¹⁵⁷, wohingegen die Tätigkeiten „Frühförderung“ und „Elternarbeit“ bei Erzieherinnen und Erziehern als umwelt- und klimaneutral gelten¹⁵⁸. Aus der Differenz der jeweiligen Anteile von umweltfreundlichen und umweltschädlichen Tätigkeiten resultiert in der Saldobetrachtung ein Nettowert, der als Grundlage für die Einteilung in die Umweltrelevanzkategorien dient:

- Berufe mit überwiegend umweltfreundlichen Tätigkeiten: Nettowert > 0 ; nachfolgend als umweltfreundliche Berufe bezeichnet,
- Berufe mit umweltneutralen Tätigkeiten: Nettowert $= 0$; nachfolgend als umweltneutrale Berufe bezeichnet. Ein Nettowert von 0 ergibt sich entweder durch ausschließlich umweltneutrale Tätigkeiten in einem Beruf oder dadurch, dass sich die Anteile umweltfreundlicher und umweltschädlicher Tätigkeiten exakt gegenseitig aufheben,
- Berufe mit überwiegend umweltschädlichen Tätigkeiten: Nettowert < 0 ; nachfolgend als umweltschädliche Berufe bezeichnet.

Der ebenfalls auf den Angaben im BERUFENET der BA basierende GOJI ermöglicht keinen Rückschluss darauf, welche Tätigkeiten im Berufsalltag der Beschäftigten in den jeweiligen Berufen dominieren.¹⁵⁹ Zudem berücksichtigt der Indikator nicht, welche Produkte und Dienstleistungen im jeweiligen Betrieb erstellt bzw. erbracht werden.¹⁶⁰ In diesem Kapitel wird der GOJI aus dem Jahr 2022 verwendet. Dies bedeutet, dass vorherige Veränderungen in der Umweltrelevanz von Berufen in der Beschreibung der Beschäftigungszusammensetzung für verschiedene Jahre und der Darstellung von Veränderungen im Zeitablauf bereits berücksichtigt sind.¹⁶¹ Ändert sich der Beschäftigungsanteil in umweltschädlichen Berufen im Zeitablauf, basiert dies in den Analysen dieses Kapitels ausschließlich auf Berufswechseln sowie auf Beschäftigten, die zwischen den betrachteten Stichtagen den Arbeitsmarkt verlassen oder neu betreten.

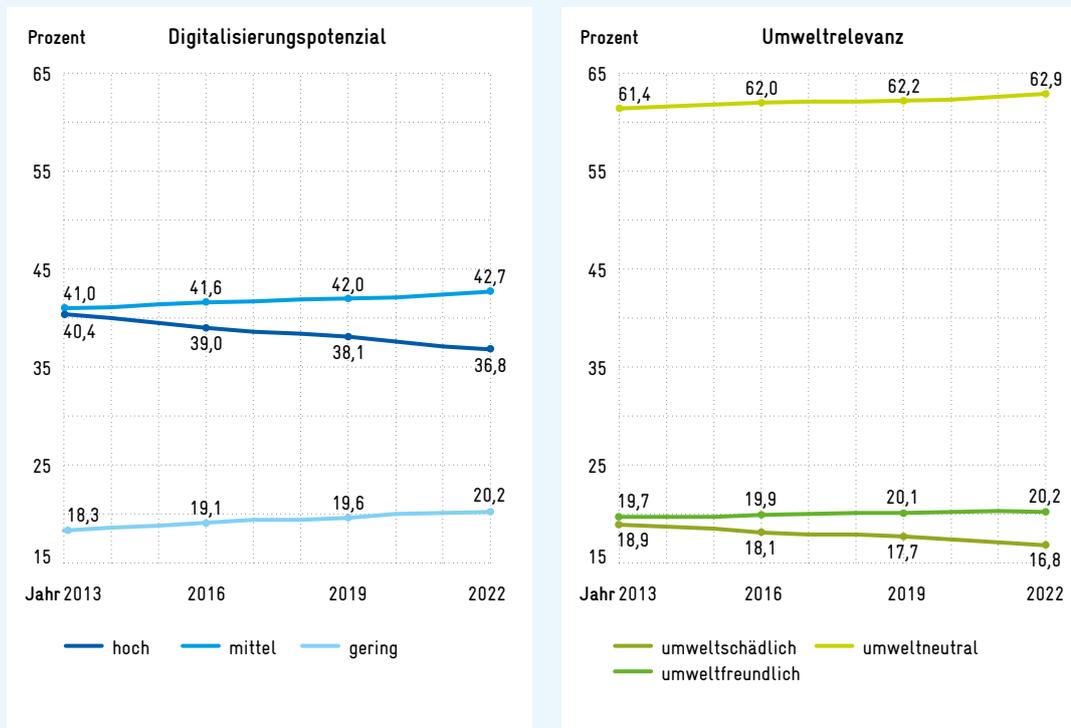
Umweltschädliche Berufe (vgl. Box B 1-2) dürften im Zuge des transformativen Strukturwandels schrittweise durch umweltneutrale oder umweltfreundliche Berufe ersetzt werden. Bei der Beschäftigung in umweltschädlichen Berufen ist im Zeitraum 2013 bis 2022 ein Rückgang um 2,1 Prozentpunkte zu beobachten, während der Anteil der Beschäftigten in umweltfreundlichen und -neutralen Berufen um 0,5 Prozentpunkte bzw. 1,5 Prozentpunkte zunahm. Umweltneutrale Berufe machen nahezu zwei Drittel der Beschäftigung aus. Rund ein Sechstel aller Beschäftigten war 2022 in Berufen tätig, die als umweltschädlich eingestuft sind (vgl. Abbildung B 1-3). Im Zuge des fortschreitenden transformativen Strukturwandels dürfte sich der Rückgang des Anteils der umweltschädlichen Berufe weiter fortsetzen.

B 1-2 Transformativer Strukturwandel in den Regionen Deutschlands

Patente: Digitalisierung stärker auf städtische Regionen konzentriert als Dekarbonisierung

Der transformative Strukturwandel infolge von Digitalisierung und Dekarbonisierung erfasst die Regionen Deutschlands¹⁶² unterschiedlich. Hinsichtlich der Technologieentwicklung zeichnen sich Großstädte in Süddeutschland sowie Berlin, Hannover und Aachen und die angrenzenden Landkreise durch einen hohen Anteil von Digitalisierungspatenten am jeweiligen Gesamt-Patentaufkommen der Region aus (vgl. Abbildung B 1-4).¹⁶³ Im Vergleich der Zeiträume 2000 bis 2010 und 2011 bis 2021 hat sich das Stadt-Land-Gefälle der regionalen Anteile der Digitalisierungspatente nur wenig verändert.

Abb. B 1-3 Beschäftigung nach Digitalisierungspotenzial und Umweltrelevanz der Berufe 2013–2022 in Prozent



Lesebeispiel: Im Jahr 2022 waren 36,8 Prozent der Beschäftigten in einem Beruf mit hohem Digitalisierungspotenzial tätig.

Lesebeispiel: Im Jahr 2022 waren 16,8 Prozent der Beschäftigten in einem umweltschädlichen Beruf tätig.

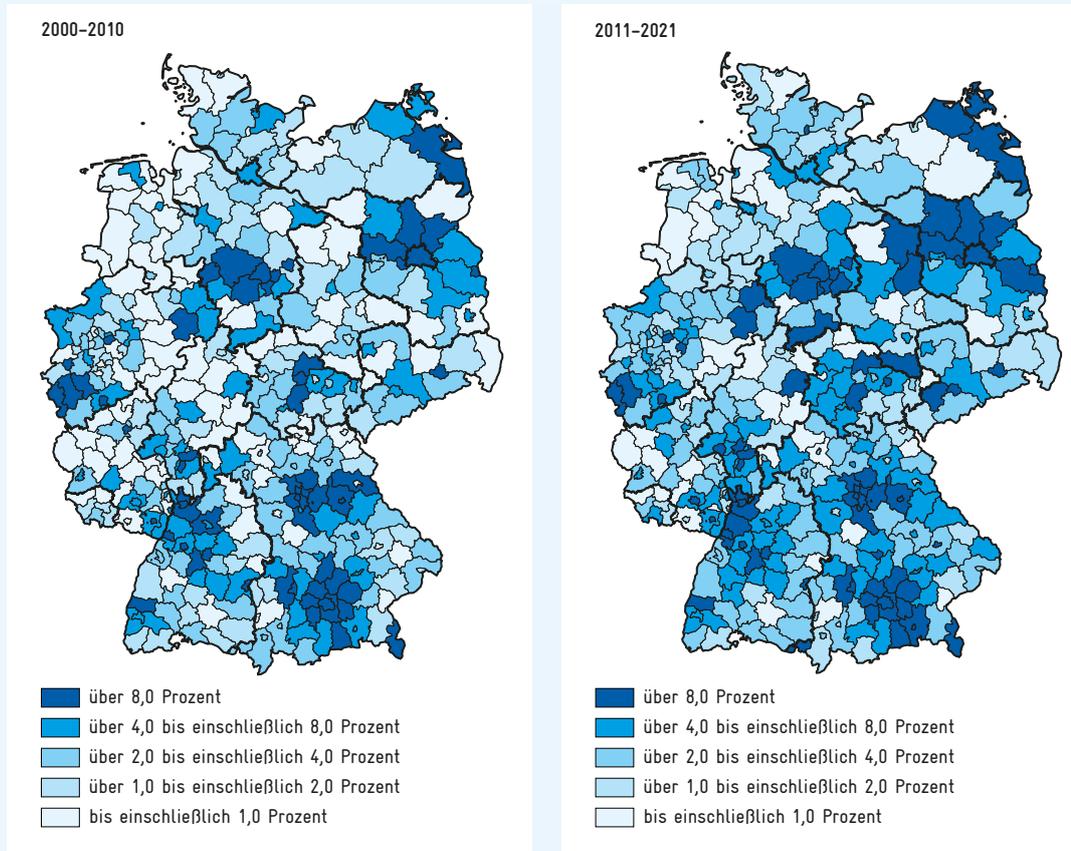
Zur Berechnung des Digitalisierungspotenzials eines Berufs siehe Grienberger et al. (2024) und für die Umweltrelevanz eines Berufs siehe Bachmann et al. (2024).
Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH), sozialversicherungspflichtige Voll- und Teilzeitbeschäftigte (ohne Auszubildende) im Alter von 18 bis 64 Jahren an aufeinanderfolgenden jährlichen Stichtagen (30. Juni) am Arbeitsort. Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.



[Download der
Abbildung
und Daten](#)

Abb. B 1-4 Anteil der angemeldeten Digitalisierungspatente an allen angemeldeten Patenten je Kreis in den Zeiträumen 2000–2010 und 2011–2021 in Prozent

 [Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der angemeldeten Digitalisierungspatente an allen angemeldeten Patenten in dieser Region im Zeitraum 2000 bis 2010 in der Spanne von über 1,0 bis einschließlich 2,0 Prozent.

Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der angemeldeten Digitalisierungspatente an allen angemeldeten Patenten in dieser Region im Zeitraum 2011 bis 2021 in der Spanne bis einschließlich 1,0 Prozent.

Quelle: PATSTAT und REGPAT. Eigene Berechnungen. Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Beim Anteil der Dekarbonisierungspatente an allen Patenten in der jeweiligen Region ist das Stadt-Land-Gefälle weniger stark ausgeprägt. Er ist im Vergleich der Zeiträume 2000 bis 2010 und 2011 bis 2021 in vielen Regionen leicht gestiegen, insbesondere in Niedersachsen und Schleswig-Holstein (vgl. Abbildung B 1-5).

Beschäftigungsanteile: große regionale Unterschiede bei Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial und bei umweltschädlichen Berufen

Auf regionaler Ebene spiegelt der Anteil der Beschäftigten, die in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial oder in umweltschädlichen Berufen arbeiten, das Ausmaß der erwarteten Transformati-

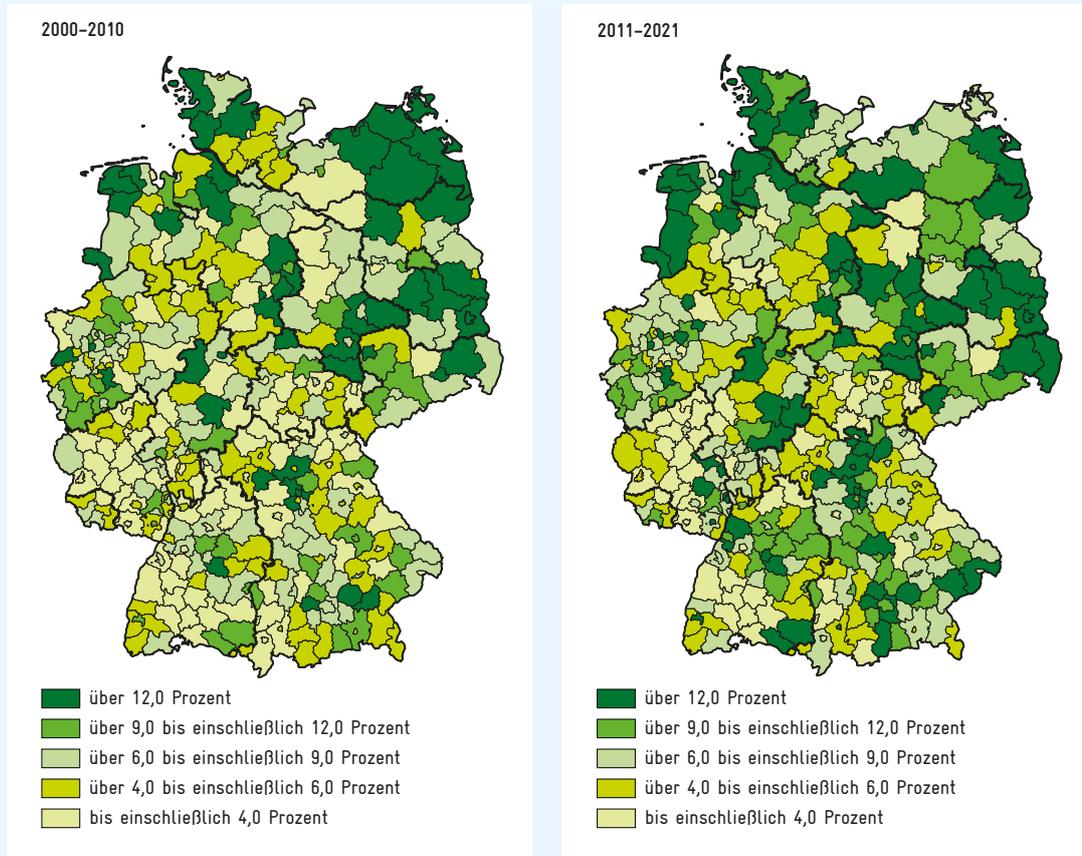
onsdynamik auf dem jeweiligen regionalen Arbeitsmarkt wider (vgl. Box B 1-2).

Im Jahr 2022 war der Anteil der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial in ländlichen Regionen in Süd- und Westdeutschland höher als in städtischen Regionen und als in den ländlichen Regionen Ost- und Norddeutschlands (vgl. Abbildung B 1-6). In strukturschwachen Regionen wie etwa in Mecklenburg-Vorpommern ist demnach in der Beschäftigungszusammensetzung weniger Dynamik durch die Digitalisierung zu erwarten.¹⁶⁴

In der Tat hat sich seit dem Jahr 2013 im Einklang mit dieser Einschätzung der Anteil der Beschäftig-

Abb. B 1-5 Anteil der angemeldeten Dekarbonisierungspatente an allen angemeldeten Patenten je Kreis in den Zeiträumen 2000–2010 und 2011–2021 in Prozent

 [Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der angemeldeten Dekarbonisierungspatente an allen angemeldeten Patenten in dieser Region im Zeitraum 2000 bis 2010 über 12,0 Prozent.

Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der angemeldeten Digitalisierungspatente an allen angemeldeten Patenten in dieser Region im Zeitraum 2011 bis 2021 in der Spanne von 9,0 bis 12,0 Prozent.

Quelle: PATSTAT und REGPAT. Eigene Berechnungen. Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

ten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial in strukturschwachen ländlichen Regionen weniger stark verringert als in strukturstarken Regionen. Dies lässt vermuten, dass strukturschwache ländliche Regionen auch künftig weniger starkem Anpassungsdruck infolge der Digitalisierung ausgesetzt sein werden, damit aber auch geringeres Potenzial für durch Digitalisierung erzeugte Produktivitätszuwächse aufweisen.¹⁶⁵

Von der Transformation durch Dekarbonisierung sind sowohl städtische als auch ländliche Regionen betroffen (vgl. Abbildung B 1-7). Zwar ist in städtischen Regionen der Anteil der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen geringer als in ländlichen Regionen.¹⁶⁶ Jedoch ist zwischen 2013 und

2022 der Anteil der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen in den meisten Regionen zurückgegangen, sowohl in ländlichen als auch in städtischen Regionen.¹⁶⁷

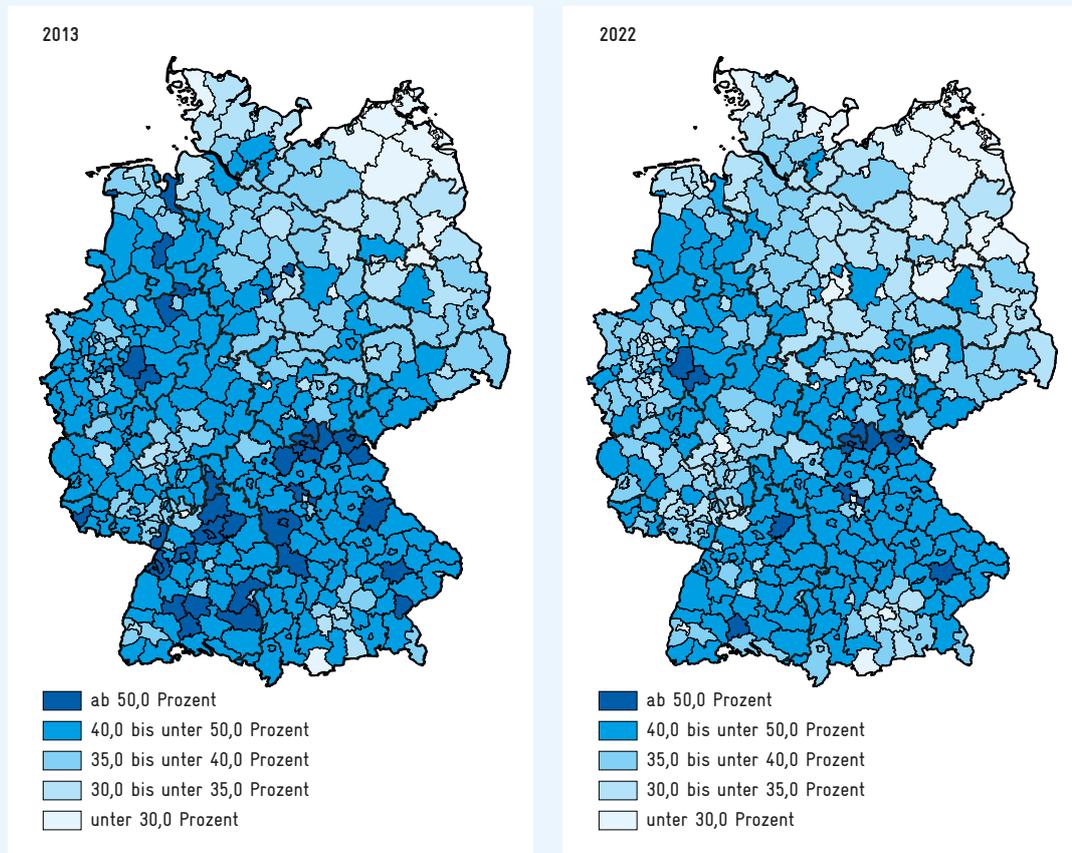
B 1-3 Sektoren und Branchen im transformativen Strukturwandel

Beschäftigung in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial über Sektoren und Branchen hinweg rückläufig

Die Bedeutung von Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial sowie von umweltschädlichen Berufen, die einer starken erwarteten Transfor-

Abb. B 1-6 Beschäftigungsanteile in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial je Kreis 2013 und 2022 in Prozent

 [Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial im Jahr 2013 unter 30,0 Prozent.

Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial im Jahr 2022 unter 30,0 Prozent.

Zur Berechnung des Digitalisierungspotenzials eines Berufs siehe Grienberger et al. (2024).
Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH), sozialversicherungspflichtige Voll- und Teilzeitbeschäftigte (ohne Auszubildende) im Alter von 18 bis 64 Jahren am Arbeitsort (Stichtag 30 Juni). Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

mationsdynamik infolge von Digitalisierung und Dekarbonisierung ausgesetzt sind, unterscheidet sich zwischen Sektoren und Branchen der Wirtschaft (vgl. Box B 1-8). Über die Zeit hinweg verändern sich die Beschäftigungsanteile der entsprechenden Berufe zwischen den Sektoren und Branchen unterschiedlich. Abbildung B 1-9 zeigt die Beschäftigungszusammensetzung in ausgewählten Sektoren und Branchen, unterschieden nach Höhe des Digitalisierungspotenzials der Berufe in den Jahren 2013 und 2022.

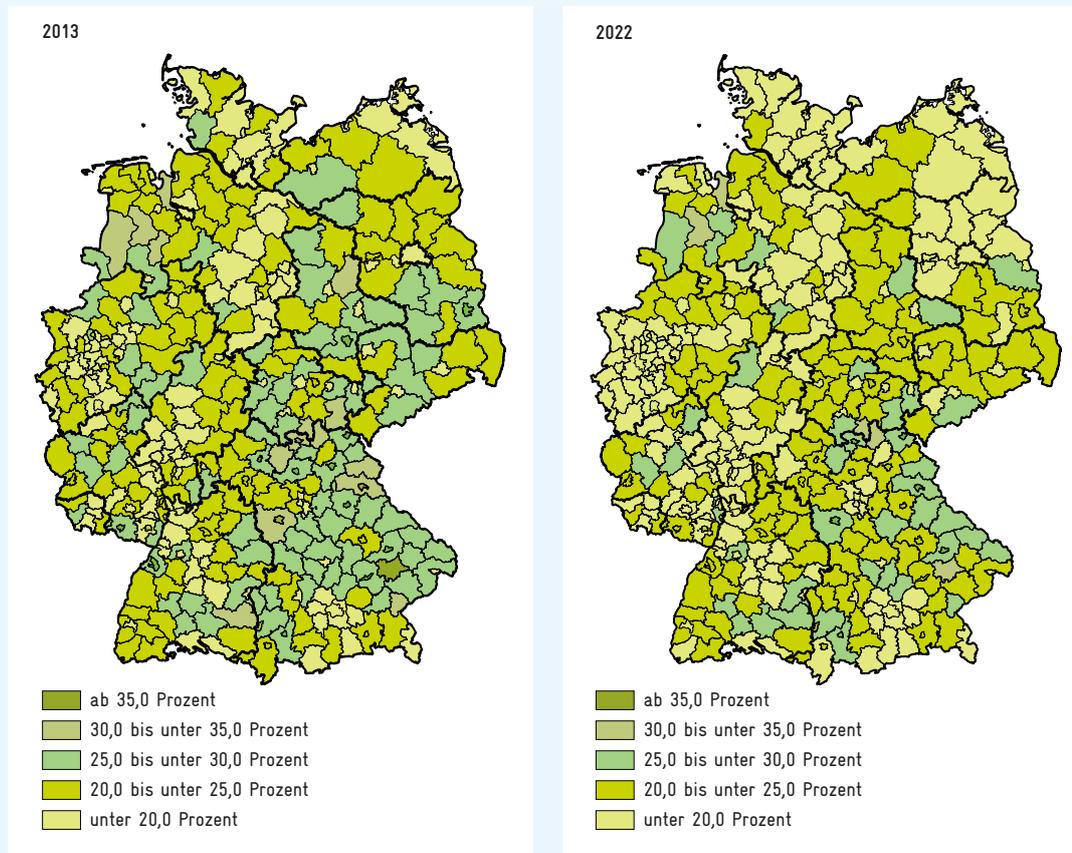
In Fahrzeugbau, Maschinenbau und Chemie sind im Durchschnitt ca. zwei Drittel der Beschäftigten in einem Beruf mit hohem Digitalisierungspotenzial tätig, in der Metallherzeugung sogar über 80 Pro-

zent. Dagegen sind es in den unternehmensnahen Dienstleistungen sowie der IT/Telekommunikation nur 34,3 bzw. 23,4 Prozent. In allen betrachteten Sektoren und Branchen ist der Anteil dieser Beschäftigten zwischen 2013 und 2022 gesunken. Dabei war der Rückgang mit 1,3 Prozentpunkten in der Metallherzeugung am geringsten.

Abbildung B 1-9 zeigt die Beschäftigungszusammensetzung gemäß der Umweltrelevanz der Berufe in den Jahren 2013 und 2022. In der Metallherzeugung, dem Maschinenbau, dem Fahrzeugbau und der Chemie ist mehr als jeder dritte Beschäftigte in einem umweltschädlichen Beruf tätig, während der Anteil der Beschäftigten in einem umweltschädlichen Beruf in der IT/Telekommunikation bei ledig-

Abb. B 1-7 Beschäftigungsanteile in umweltschädlichen Berufen je Kreis 2013 und 2022 in Prozent

 [Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen im Jahr 2013 unter 20,0 Prozent.

Lesebeispiel: Im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte lag der Anteil der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen im Jahr 2022 in der Spanne von 20,0 bis unter 25,0 Prozent.

Zur Berechnung der Umweltrelevanz eines Berufs siehe Bachmann et al. (2024).
Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH), sozialversicherungspflichtige Voll- und Teilzeitbeschäftigte (ohne Auszubildende) im Alter von 18 bis 64 Jahren am Arbeitsort (Stichtag 30. Juni). Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Box B 1-8 Beschäftigtenmobilität zwischen Sektoren und Branchen

In diesem Kapitel werden zwölf Teilbereiche der Wirtschaft unterschieden, die Sektoren bzw. Branchen der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008¹⁶⁸ entsprechen. Dabei handelt es sich um vier Dienstleistungssektoren: IT/Kommunikation, Banken/Versicherungen, unternehmensnahe Dienstleistungen sowie die sonstigen Dienstleistungen (Tourismus, Gesundheit/Soziales, Bildung, Öffentliche Verwaltung). Das Verarbeitende Gewerbe wird nach sieben Branchen differenziert: Metallherstellung (WZ25), Fahrzeugbau (WZ29), Maschinenbau (WZ28), Datenverarbeitungsgeräte/elektronische/optische Erzeugnisse (WZ26),

Chemie (WZ20) und Pharmazie (WZ21) sowie das Sonstige Verarbeitende Gewerbe. Landwirtschaft, Bergbau, Baugewerbe und Versorgungswirtschaft werden zum zwölften Teilbereich, den Sonstigen Sektoren zusammengefasst.

Intersektorale Mobilität bezeichnet einen Beschäftigungswechsel zwischen diesen zwölf Teilbereichen, etwa einen Wechsel aus dem Fahrzeugbau in die Metallherstellung oder aus dem Fahrzeugbau in den Dienstleistungssektor Banken/Versicherungen. Dagegen bezeichnet intrasektorale Mobilität einen Beschäftigungswechsel innerhalb desselben Teilbereichs, etwa einen Betriebswechsel innerhalb des Maschinenbaus oder einen Betriebswechsel innerhalb von IT/Kommunikation.

lich 3,0 Prozent liegt.¹⁶⁹ Gegenüber 2013 sind im Jahr 2022 in den Branchen des Verarbeitenden Gewerbes die Beschäftigungsanteile in umweltschädlichen Berufen zwischen 3,4 Prozentpunkten in der Metallherstellung und 0,1 Prozentpunkten in der Pharmazie gesunken.¹⁷⁰ Demnach scheinen Sektoren und Branchen ihre Potenziale hin zu einer umweltfreundlichen Wirtschaft insgesamt zu heben, wobei sich diese Potenziale zwischen den einzelnen Sektoren und Branchen unterscheiden.

Diese Muster deuten auf eine doppelte Betroffenheit zentraler Branchen des Verarbeitenden Gewerbes wie Fahrzeugbau, Maschinenbau und Chemie durch den transformativen Strukturwandel hin. In diesen Branchen sind überdurchschnittlich viele Beschäftigte in digitalisierbaren und umweltschädlichen Berufen tätig, was deren Beschäftigungssicherheit reduziert. Zugleich weist das hohe Digitalisierungspotenzial in diesen Branchen auch auf einen möglichen Anpassungspfad hin, indem die Produktivitätspotenziale der Digitalisierung konsequent genutzt werden, um mit den Herausforderungen der Transformation umzugehen.

Intersektorale Mobilität häufiger mit Änderungen in Digitalisierungspotenzial und Umweltrelevanz verbunden

Die Mobilität von Beschäftigten zwischen Sektoren und Branchen kann einen wichtigen Beitrag zum transformativen Strukturwandel leisten. Im Zeitraum 2013 bis 2022 wechselten pro Jahr durchschnittlich 1,76 Millionen Beschäftigte den Betrieb. 36,0 Prozent dieser Betriebswechsler und -wechslerinnen wechselten in einen anderen Sektor bzw. eine andere Branche. Betriebswechsel können mit einer Änderung des ausgeübten Berufs verbunden sein, müssen es aber nicht.¹⁷¹ Wenn eine Person in einem neuen Beruf tätig wird, kann sich dessen Digitalisierungspotenzial oder Umweltrelevanz vom vorherigen Beruf unterscheiden.¹⁷² In den nachfolgenden Analysen wird daher betrachtet, inwieweit Mobilität zwischen Betrieben zum Rückgang der Beschäftigung in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial bzw. umweltschädlichen Berufen und damit zum transformativen Strukturwandel beiträgt.

Im Zeitraum 2013 bis 2022 waren 28,2 Prozent der Betriebswechsler und -wechslerinnen zuvor in einem Beruf mit hohem Digitalisierungspotenzial beschäftigt, 46,9 Prozent in einem Beruf mit mittlerem sowie 24,5 Prozent in einem Beruf mit geringem Digitalisierungspotenzial. Abbildung B 1-10 zeigt, dass der Anteil derjenigen Betriebswechsler und -wechslerinnen, die in derselben Kategorie verbleiben, bei einem intrasektoralen Beschäftigungswechsel jeweils deutlich höher ist als bei intersektoraler Mobilität, also einem Betriebswechsel von einem Sektor oder einer Branche in einen anderen bzw. eine andere.

Starke Beharrungstendenzen hinsichtlich des Digitalisierungspotenzials bestehen typischerweise bei intrasektoraler Mobilität in Sektoren bzw. Branchen, in denen dieses besonders hoch ist. Hierzu gehören die Metallherstellung (91,1 Prozent), der Fahrzeugbau (82,2 Prozent) sowie Banken und Versicherungen (88,2 Prozent).¹⁷³

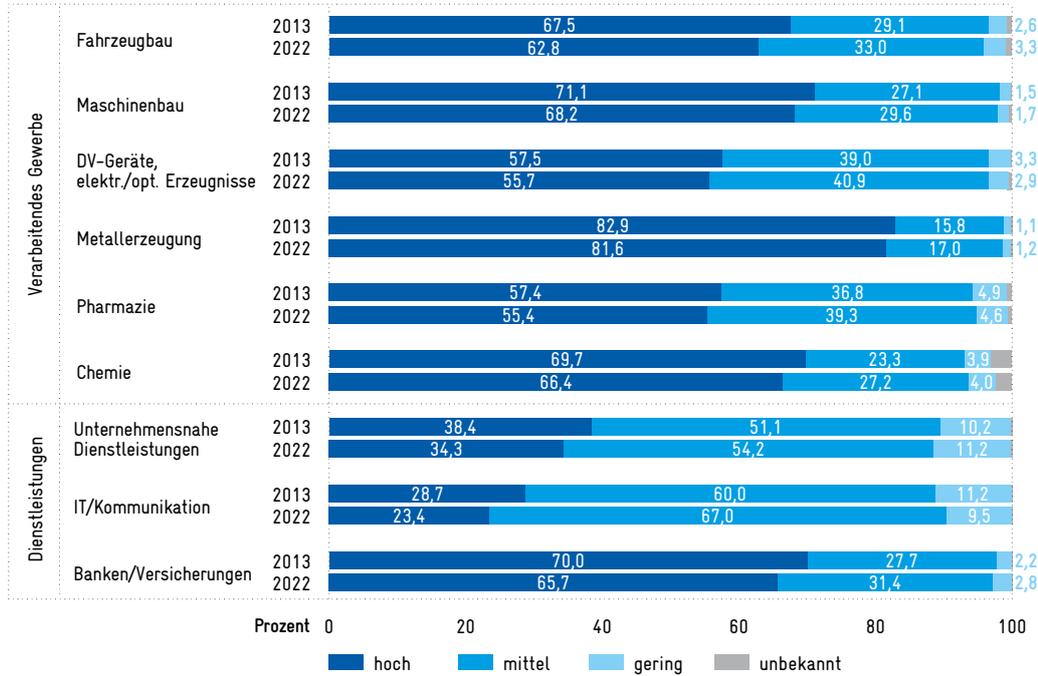
Im Zeitraum 2013 bis 2022 waren 14,6 Prozent der Ausgangsberufe der künftigen Betriebswechsler und -wechslerinnen als umweltschädlich, 67,4 Prozent als umweltneutral und 18,0 Prozent als umweltfreundlich eingeordnet. Abbildung B 1-10 zeigt, dass die intrasektorale Mobilität mit stärkeren Beharrungstendenzen hinsichtlich der Umweltrelevanz verbunden ist als die intersektorale Mobilität. Dies gilt insbesondere bei umweltschädlichen Berufen in der Metallherstellung (75,9 Prozent) und der Chemie (76,9 Prozent). Allerdings ist bei einem intersektoralen Betriebswechsel der Übergang aus einem umweltfreundlichen in einen umweltneutralen oder gar umweltschädlichen Beruf damit auch wahrscheinlicher als bei einem intrasektoralen Betriebswechsel.¹⁷⁴



[Download der
Abbildung
und Daten](#)

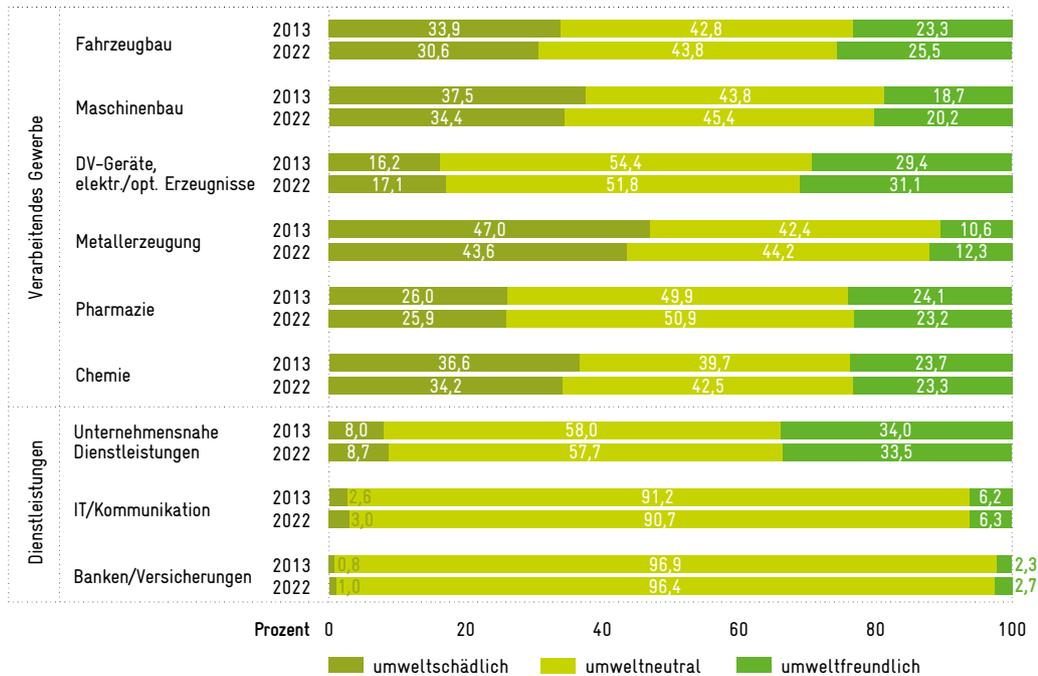
Abb. B 1-9 Beschäftigung in ausgewählten Sektoren und Branchen 2013 und 2022 in Prozent

Digitalisierungspotenzial



Lesebeispiel: Der Beschäftigungsanteil in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial lag in der Metallerzeugung im Jahr 2022 bei 81,6 Prozent.

Umweltrelevanz



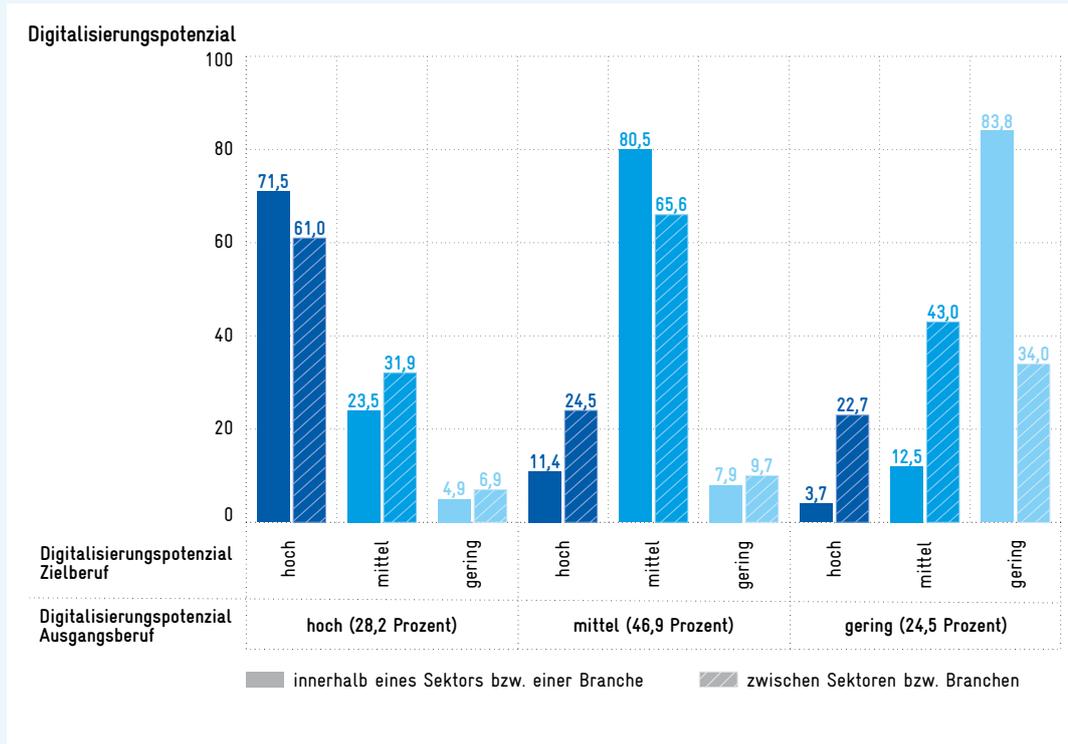
Lesebeispiel: Der Beschäftigungsanteil in umweltschädlichen Berufen lag in der Metallerzeugung im Jahr 2022 bei 43,6 Prozent.

Zur Berechnung des Digitalisierungspotenzials eines Berufs siehe Grienberger et al. (2024) und für die Umweltrelevanz eines Berufs siehe Bachmann et al. (2024).
Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH), sozialversicherungspflichtige Voll- und Teilzeitbeschäftigte (ohne Auszubildende) im Alter von 18 bis 64 Jahren am Arbeitsort (Stichtag 30. Juni). Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

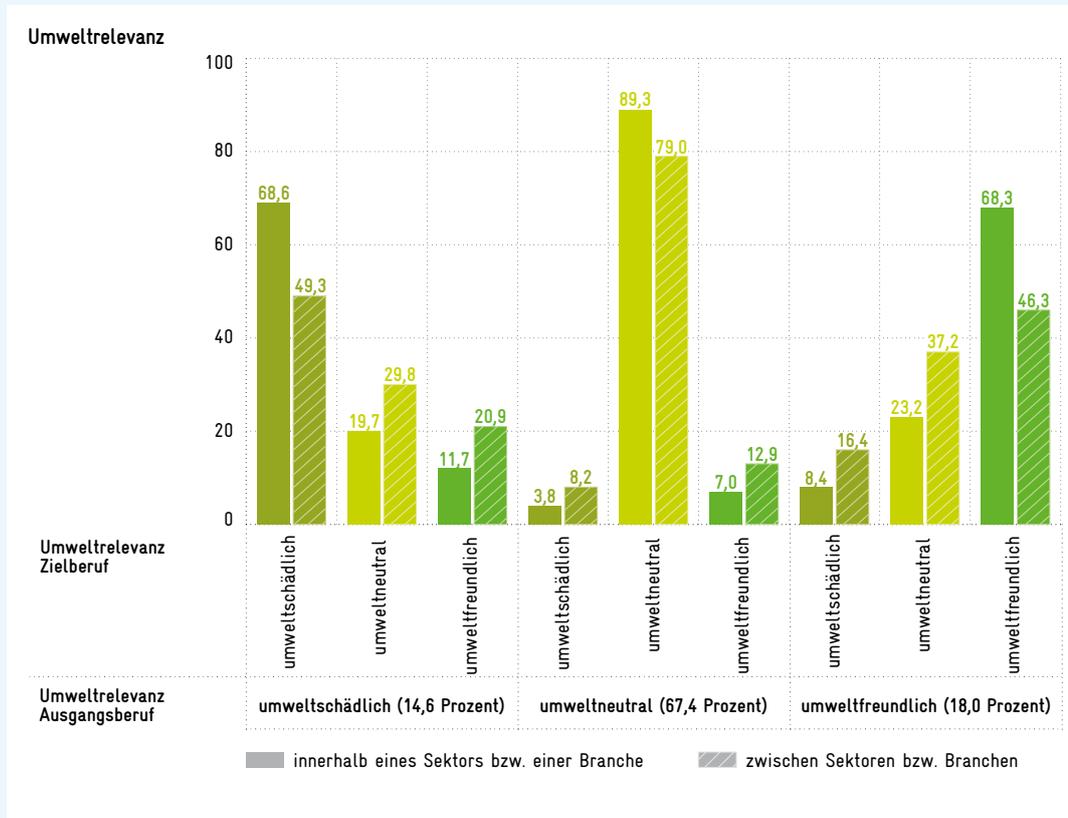
Abb. B 1-10 Betriebswechsler und -wechslerinnen innerhalb und zwischen Sektoren bzw. Branchen 2013–2022 in Prozent



[Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Einige Beschäftigte wechselten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stichtagen den Betrieb. Im betrachteten Zeitraum waren 28,2 Prozent dieser Betriebswechsler und -wechslerinnen zuvor in einem Beruf mit hohem Digitalisierungspotenzial tätig. Ein Teil dieser Gruppe wechselte in einen Betrieb innerhalb desselben Sektors bzw. derselben Branche. Betrachtet man diese Wechsel, so verblieben 71,5 Prozent in einem Beruf mit hohem Digitalisierungspotenzial, wohingegen 23,5 Prozent in einen Beruf mit mittlerem und 4,9 Prozent in einen Beruf mit geringem Digitalisierungspotenzial wechselten.



Lesebeispiel: Einige Beschäftigte wechselten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stichtagen den Betrieb. Im betrachteten Zeitraum waren 14,6 Prozent dieser Betriebswechsler und -wechslerinnen zuvor in einem umweltschädlichen Beruf tätig. Ein Teil dieser Gruppe wechselte in einen Betrieb innerhalb desselben Sektors bzw. derselben Branche. Betrachtet man diese Wechsel, so verblieben 68,6 Prozent in einem umweltschädlichen Beruf, wohingegen 19,7 Prozent in einen umweltneutralen und 11,7 Prozent in einen umweltfreundlichen Beruf wechselten.

Zur Berechnung des Digitalisierungspotenzials eines Berufs siehe Grienberger et al. (2024) und für die Umweltrelevanz eines Berufs siehe Bachmann et al. (2024).
 Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH), sozialversicherungspflichtige Voll- und Teilzeitbeschäftigte (ohne Auszubildende) im Alter von 25 bis 55 Jahren an aufeinanderfolgenden jährlichen Stichtagen (30. Juni). Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.
 © EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

B 1-4 Betriebe im transformativen Strukturwandel nach Größe und Alter

In Deutschland gibt es rund zwei Millionen Betriebe. Wie stark diese Betriebe vom transformativen Strukturwandel betroffen sind, wird in einer von der Expertenkommission beauftragten Studie¹⁷⁵ anhand der Anteile ihrer Beschäftigten abgeschätzt, die jeweils in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial oder in umweltschädlichen Berufen tätig sind (vgl. Box B 1-2). Demnach ist zu erwarten, dass Betriebe mit einem Beschäftigungsanteil von mindestens 25 Prozent in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial¹⁷⁶ vergleichsweise stark von den Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung betroffen sind. Analog wird eine besonders starke Betroffenheit von der Dekarbonisierung für Betriebe erwartet, bei denen mehr als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen¹⁷⁷ tätig sind. Auf Basis dieser Klassifizierung über die Anteile der Beschäftigten werden im Folgenden zeitliche Entwicklungen auf Betriebsebene sowie Unterschiede zwischen Betrieben verschiedener Größen- und Altersklassen betrachtet.

Kleine und junge Betriebe seltener mit hohem Beschäftigtenanteil in digitalisierbaren Berufen

Der Anteil von Betrieben mit einem Beschäftigungsanteil von mindestens 25 Prozent in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial ist wie erwartet seit 2013 gesunken (insgesamt um 2,9 Prozentpunkte auf 40,2 Prozent im Jahr 2022).¹⁷⁸

In Abbildung B 1-11 wird das Digitalisierungspotenzial von Betrieben differenziert nach deren Betriebsgröße und -alter dargestellt. Bei den großen Betrieben (ab 250 Beschäftigte) ist der Anteil der Betriebe mit mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial deutlich höher (57,5 Prozent im Jahr 2013 und 53,6 Prozent im Jahr 2022) als in den unteren Größenklassen. Am niedrigsten ist dieser Anteil bei den Kleinstbetrieben mit ein bis vier Beschäftigten. In allen Größenklassen ist er im Zeitraum 2013 bis 2022 in etwa demselben Ausmaß gesunken.¹⁷⁹

In der Klassifizierung nach Betriebsalter findet sich bei den ältesten Betrieben (über zehn Jahre) der höchste Anteil der Betriebe mit mindestens 25 Prozent Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial (46,2 Prozent im Jahr 2013 und 44,5 Prozent im Jahr 2022). Dieser Anteil ist in

den jüngeren Altersklassen niedriger und im Zeitverlauf stärker rückläufig (von 32,8 Prozent im Jahr 2013 auf 27,9 Prozent im Jahr 2022 für Betriebe der Altersklasse ein bis zwei Jahre).

Diesen Analysen zufolge sind es die größeren und älteren Betriebe, die einen höheren Anteil an Beschäftigten in durch die Digitalisierung potenziell gefährdeten Berufen aufweisen. Zugleich deuten die Analysen auf das Potenzial kleiner und junger Unternehmen hin, zukunftssichere Beschäftigung zu schaffen und die Digitalisierung voranzutreiben.

Unterschiede beim Beschäftigtenanteil in umweltschädlichen Berufen gering

Ein deutlich anderes Bild als beim Digitalisierungspotenzial ergibt sich bezüglich der Umweltrelevanz. Der Anteil von Betrieben mit mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen unterscheidet sich kaum zwischen den Betriebsgrößenklassen.¹⁸⁰ Zwischen 2013 und 2022 ist er in allen Größenklassen um Werte zwischen 0,7 und 1,5 Prozentpunkten angestiegen (vgl. Abbildung B 1-12).¹⁸¹ Im selben Zeitraum ist der Anteil von Betrieben mit mehr als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen in allen Größenklassen gesunken.¹⁸²

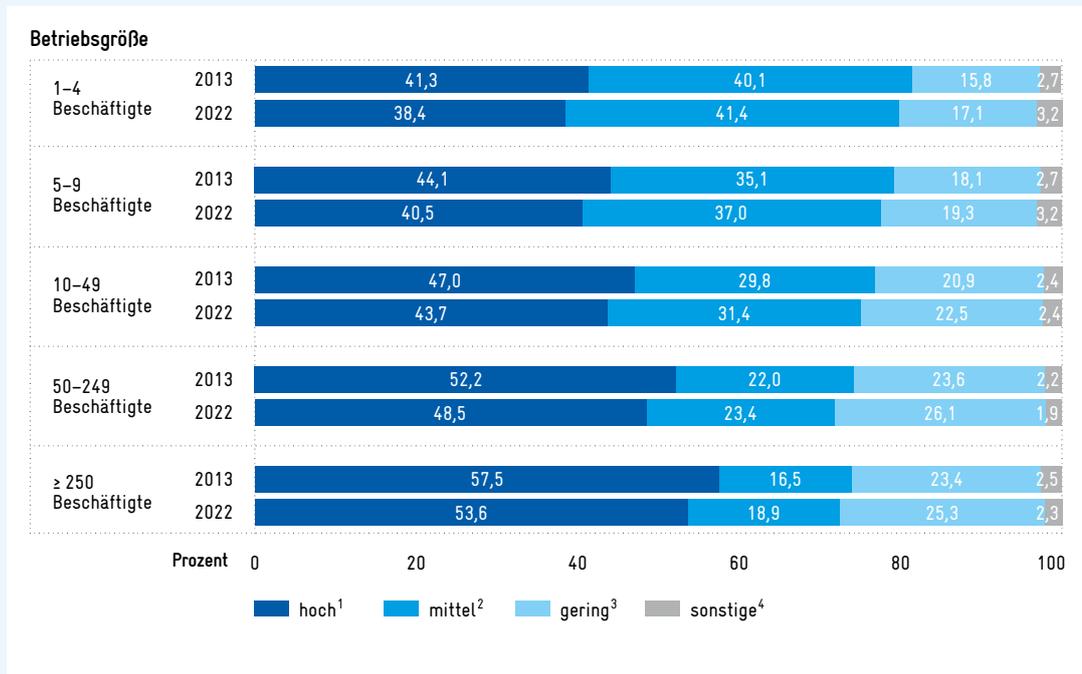
Auch zwischen den verschiedenen Altersklassen unterscheiden sich die Anteile der Betriebe mit vielen Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen nur gering. Jedoch hatten die jüngeren Altersklassen den höchsten anteilmäßigen Zuwachs zu verzeichnen. Zwischen 2013 und 2022 stieg der Anteil der Betriebe mit mehr als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen bei den ein bis zwei Jahre und den drei bis fünf Jahre alten Betrieben jeweils um 2,3 Prozentpunkte, während es bei den mehr als zehn Jahre alten nur 0,7 Prozentpunkte waren.

Eine mögliche Erklärung für diese Entwicklungen sind aktuelle Veränderungen in der Gründungsdynamik. Im Jahr 2020 brach die Zahl der neuen Betriebe¹⁸³ laut den hier ausgewerteten Daten ein. Dieser Einbruch war unabhängig von den Anteilen der Beschäftigten in Berufen mit unterschiedlicher Umweltrelevanz. In der Gruppe der Betriebe mit mehr als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen erreichte die Zahl der neuen Betriebe bis 2022 allerdings fast wieder ihren Höchststand von 2019. Bei den Betrieben mit vielen

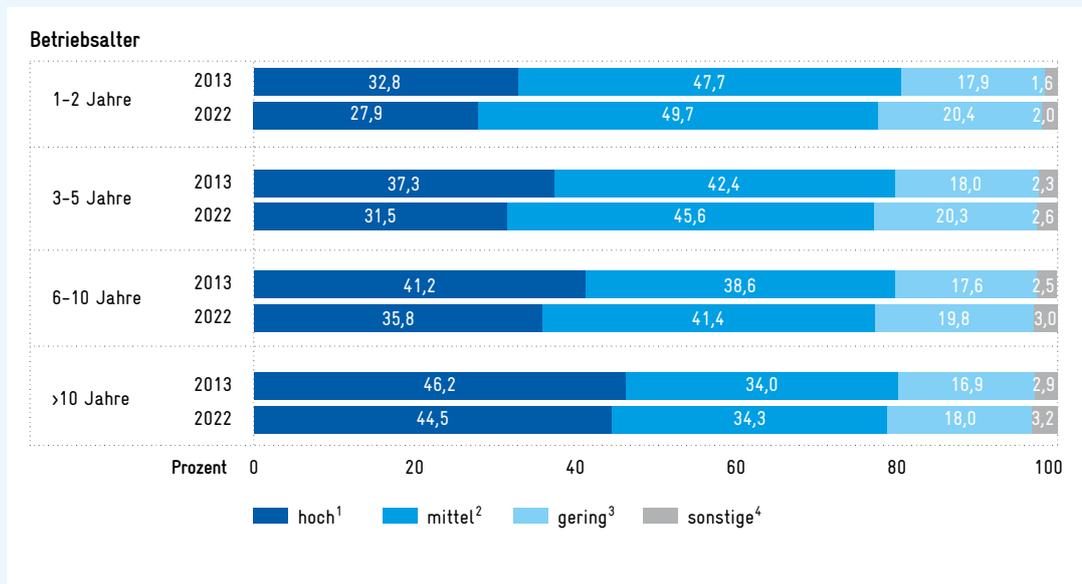


[Download der
Abbildung
und Daten](#)

Abb. B 1-11 Betriebe nach Betriebsgröße bzw. Betriebsalter und Digitalisierungspotenzial 2013 und 2022 in Prozent



Lesebeispiel: Bei den Betrieben mit bis zu vier sozialversicherungspflichtig Beschäftigten betrug der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial im Jahr 2013 41,3 Prozent und der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial 15,8 Prozent.



Lesebeispiel: Bei den bis zwei Jahre alten Betrieben betrug der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial im Jahr 2013 32,8 Prozent und der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial 17,9 Prozent.

¹ hoch: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial. Die wenigen Fälle, in denen zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial tätig sind, werden hier ausgeschlossen.

² mittel: Betriebe mit weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial sowie weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial.

³ gering: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial. Die wenigen Fälle, in denen zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial tätig sind, werden hier ausgeschlossen.

⁴ sonstige: Betriebe mit sowohl mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial als auch mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial.

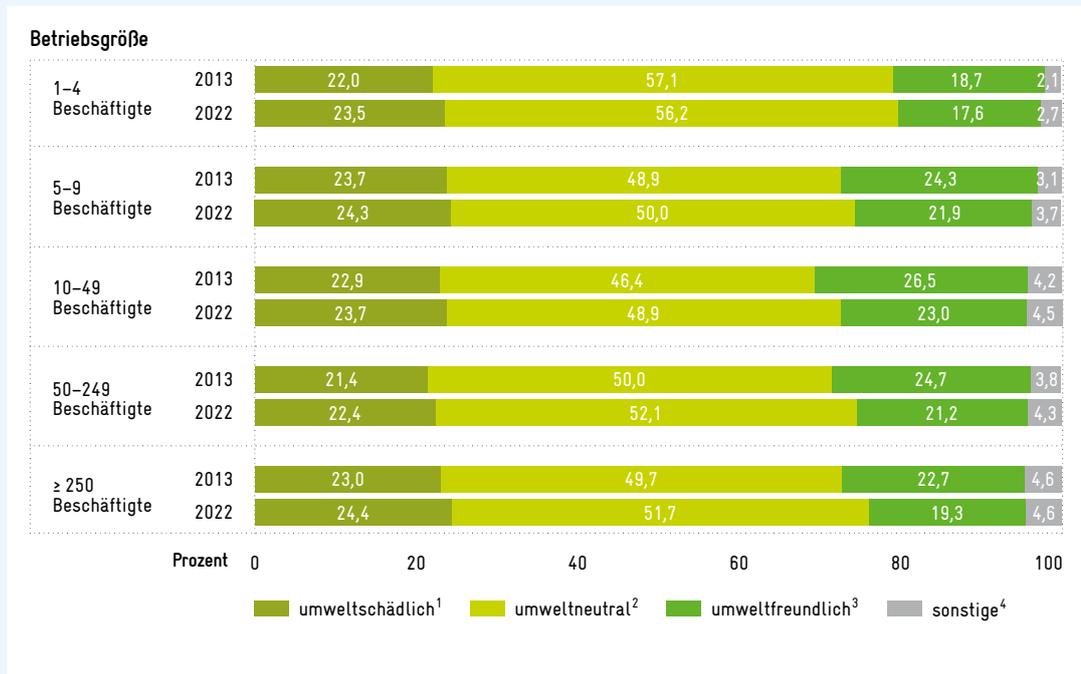
Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH) und Betriebs-Historik-Panel (BHP). Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.

© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

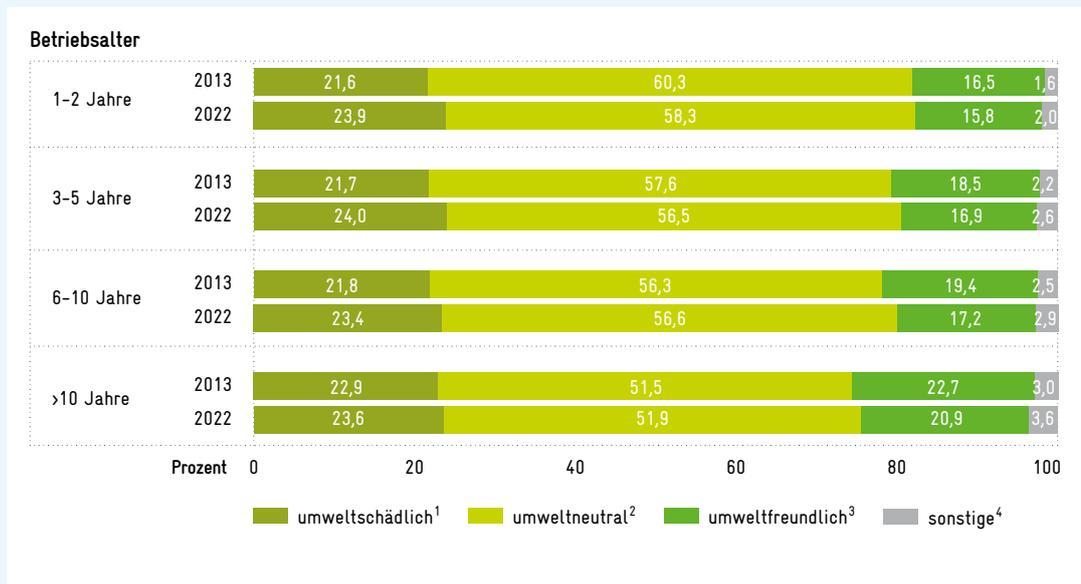


[Download der
Abbildung
und Daten](#)

Abb. B 1-12 Betriebe nach Betriebsgröße bzw. Betriebsalter und Umweltrelevanz 2013 und 2022 in Prozent



Lesebeispiel: Bei den Betrieben mit bis zu vier sozialversicherungspflichtig Beschäftigten betrug der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen im Jahr 2013 22,0 Prozent und der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen 18,7 Prozent.



Lesebeispiel: Bei den bis zu zwei Jahre alten Betrieben betrug der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen im Jahr 2013 21,6 Prozent und der Anteil von Betrieben mit vielen Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen 16,5 Prozent.

¹ umweltschädlich: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in umweltschädlichen Berufen. Die wenigen Fälle, in denen zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen tätig sind, werden hier ausgeschlossen.

² umweltneutral: Betriebe mit weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen sowie weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen.

³ umweltfreundlich: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in umweltfreundlichen Berufen. Die wenigen Fälle, in denen zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen tätig sind, werden hier ausgeschlossen.

⁴ sonstige: Betriebe mit sowohl mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen als auch mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen.

Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH) und Betriebs-Historik-Panel (BHP). Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.

© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen oder bei den Betrieben, in denen umweltschädliche und umweltfreundliche Berufe einen vergleichsweise kleinen Anteil an der Beschäftigung haben, wurde der Höchststand bis 2022 nicht wieder erreicht.

B 1-5 Anforderungsniveaus im transformativen Strukturwandel

In allen Anforderungsniveaus Rückgang der Beschäftigungsanteile in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial

Berufe lassen sich in Anforderungsniveaus einteilen, in denen die Komplexität der Tätigkeiten und benötigten Qualifikationen zusammenfassend zum Ausdruck kommt. Dabei wird auf Grundlage der zur Ausübung des Berufs typischerweise erforderlichen formalen Qualifikation zwischen vier Niveaus unterschieden: dem Helferniveau mit den am wenigsten komplexen Tätigkeiten, dem Fachkräfteniveau, für das eine mindestens zweijährige Berufsausbildung oder ein berufsqualifizierender Abschluss an einer Berufsfach- oder Kollegschule benötigt wird, dem Spezialistenniveau, das eine Meister- oder Techniker Ausbildung bzw. einen weiterführenden Fachschul- oder Bachelorabschluss verlangt, und schließlich dem Expertenniveau, dessen hochkomplexe Tätigkeiten typischerweise mindestens ein vierjähriges abgeschlossenes Hochschulstudium erfordern.¹⁸⁴

Im Jahr 2022 bildeten Fachkräfte mit einem Anteil von 55,0 Prozent den größten Anteil der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten. Die übrigen 45,0 Prozent verteilen sich gleichmäßig auf Helfer-, Spezialisten- und Expertenniveau (mit jeweils rund 15 Prozent). Die Entwicklung von 2013 bis 2022 zeigt eine Verschiebung weg von Fachkräften (-4,9 Prozentpunkte) hin zu Berufen mit Tätigkeiten auf Helfer- (+1,9), Experten- (+1,6) und Spezialistenniveau (+1,4). Dies deutet auf eine zunehmende Polarisierung des Arbeitsmarktes hin, die durch zwei gegenläufige Trends gekennzeichnet ist: Einerseits steigt die Nachfrage nach einfachen, schnell erlernbaren Tätigkeiten, andererseits wächst der Bedarf an hochqualifizierten Beschäftigten.¹⁸⁵

Berufe mit hohem Digitalisierungspotenzial haben auf Fachkräfte- und Helferniveau im Vergleich zum Experten- und Spezialistenniveau erheblich stärkeres Gewicht (vgl. Abbildung B 1-13). Mit 48,8 Prozent lag der Anteil der Fachkräfteberufe mit hohem Digitalisierungspotenzial im Jahr 2022 deutlich höher als bei den Helferberufen (39,7 Prozent). Jedoch ist bei den Fachkräften zwischen 2013 und 2022 ein Rückgang von nur 1,6 Prozentpunkten zu verzeichnen, deutlich weniger als bei den Helfern (5,7 Prozentpunkte) und bei den Spezialistenberufen (4,4 Prozentpunkte).

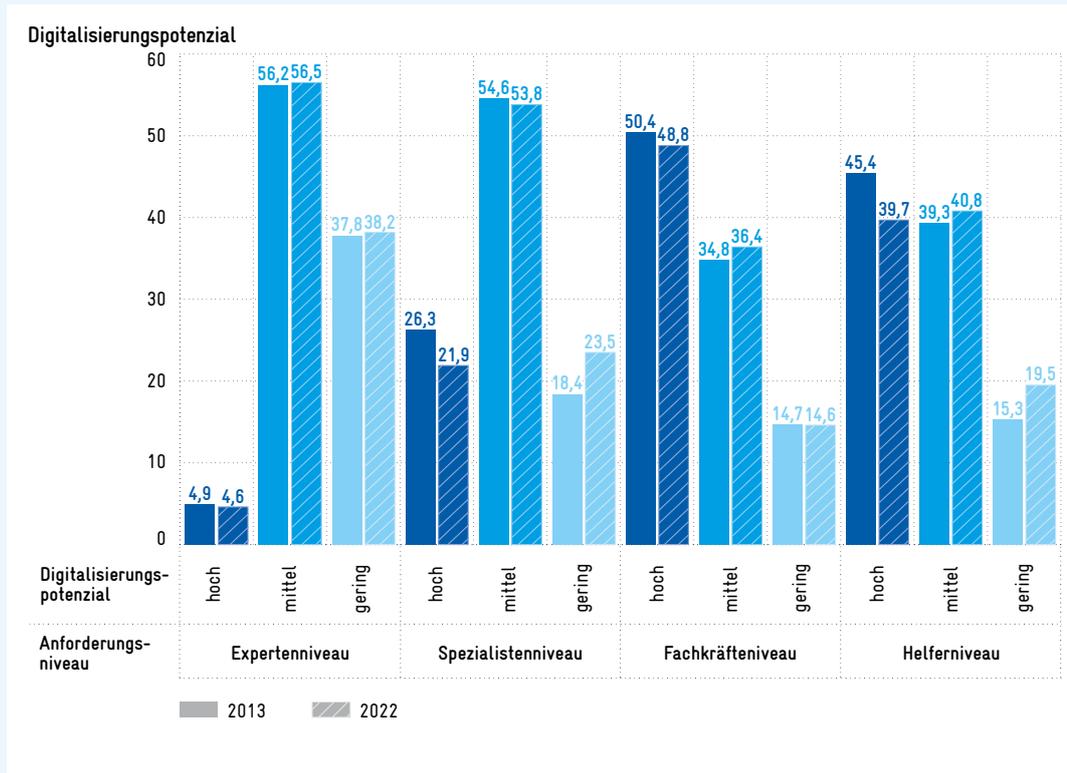
Bei der Umweltrelevanz weisen Berufe auf Fachkräfteniveau (22,8 Prozent im Jahr 2022) einen drei- bis viermal so hohen Anteil an umweltschädlichen Berufen auf wie Berufe auf Experten- und Spezialistenniveau (7,2 bzw. 5,6 Prozent im Jahr 2022; vgl. Abbildung B 1-11). Die stärkste Entwicklung in Bezug auf umweltschädliche Berufe ist zwischen 2013 und 2022 ebenfalls bei Berufen auf Fachkräfteniveau zu erkennen (-2,3 Prozentpunkte), gefolgt von den Spezialistenberufen (-1,3 Prozentpunkte).¹⁸⁶

Insgesamt deutet die Analyse auf erhebliche Unterschiede in der Betroffenheit der Beschäftigten auf verschiedenen Anforderungsniveaus durch den transformativen Strukturwandel hin. Nur auf dem höchsten Anforderungsniveau – den Expertenberufen – sind sowohl die Anteile der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial und in umweltschädlichen Berufen als auch deren Verringerung zwischen 2013 und 2022 gering. Für das Fachkräfteniveau, das die höchsten Anteile an Beschäftigten in stark digitalisierbaren und in umweltschädlichen Berufen hat, muss mit zukünftigen Jobverlusten durch den transformativen Strukturwandel gerechnet werden, auch wenn diese in der Vergangenheit noch vergleichsweise gering ausfielen.

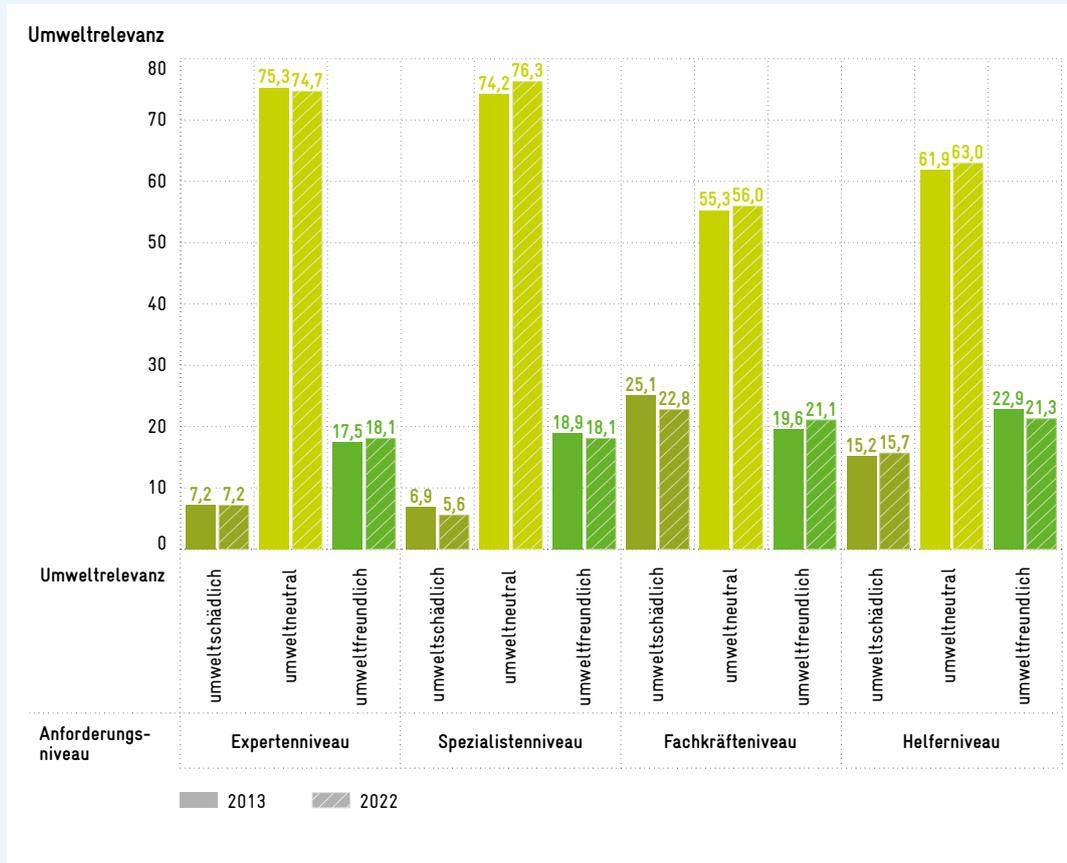


[Download der
Abbildung
und Daten](#)

Abb. B 1-13 Beschäftigung nach Anforderungsniveau 2013 und 2022 in Prozent



Lesebeispiel: Im Jahr 2022 waren durchschnittlich 39,7 Prozent der Beschäftigten auf Helferniveau in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial beschäftigt, wohingegen dies nur auf 4,6 Prozent der Beschäftigten auf Expertenniveau zutrif.



Lesebeispiel: Im Jahr 2022 waren durchschnittlich 15,7 Prozent der Beschäftigten auf Helferniveau in umweltschädlichen Berufen beschäftigt, wohingegen dies nur auf 7,2 Prozent der Beschäftigten auf Expertenniveau zutrif.

Zur Berechnung des Digitalisierungspotenzials eines Berufs siehe Grienberger et al. (2024) und für die Umweltrelevanz eines Berufs siehe Bachmann et al. (2024).
Quelle: Beschäftigtenhistorik (BeH), sozialversicherungspflichtige Voll- und Teilzeitbeschäftigte (ohne Auszubildende) im Alter von 18 bis 64 Jahren am Arbeitsort (Stichtag 30. Juni). Berechnungen des IAB in Otto (2025). Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

B 1-6 Politische Begleitung des transformativen Strukturwandels

Der transformative Strukturwandel, wie er u. a. in den oben dargestellten Analysen der Technologieentwicklung und der Beschäftigung in Regionen, Sektoren und Betrieben zum Ausdruck kommt, wurde und wird von der Politik aktiv begleitet. Auch weitere Aspekte des transformativen Strukturwandels, darunter Veränderungen im Spektrum der produzierten Güter und die Dynamik in der Unternehmenspopulation etwa durch Unternehmensgründungen, versucht die Politik zu unterstützen. Im Folgenden werden einige der Maßnahmen dargestellt, mittels derer die Politik Einfluss auf den transformativen Strukturwandel auf den Ebenen der Gesamtwirtschaft, der Regionen, Sektoren und der Betriebe nimmt. Zudem wird die Ausrichtung der Projektförderung des Bundes auf Digitalisierung und Dekarbonisierung auf Basis einer von der Expertenkommission beauftragten Studie diskutiert.¹⁸⁷

Ausbau der digitalen Infrastruktur und Förderung der Digitalisierung in Unternehmen

Eine Erklärung für den oben konstatierten Rückstand Deutschlands gegenüber anderen Ländern bei der Digitalisierung, den ausgeprägten regionalen Unterschieden im Patentgeschehen und dem hohen nicht ausgeschöpften Digitalisierungspotenzial bei den Beschäftigten können Defizite in der Infrastruktur sein. Die Notwendigkeit, eine leistungsfähige digitale Infrastruktur zu gewährleisten, ist daher ein zentrales und weitgehend unstrittiges Politikziel.

Daten zum Stand der Digitalisierung der deutschen Wirtschaft zeigen, dass trotz deutschlandweiter Verbesserungen beim Zugang zum schnellen Internet weiterhin deutliche Unterschiede für Unternehmen in ländlichen und solchen in städtischen Regionen bestehen.¹⁸⁸ Im Breitbandförderprogramm „Gigabitförderung 2.0“ werden unterversorgte ländliche Regionen daher besonders berücksichtigt.¹⁸⁹

Potenziale für Innovationen und neue Geschäftsmodelle entstehen darüber hinaus durch die Verfügbarkeit von Daten und ihren Austausch zwischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen, der öffentlichen Verwaltung und anderen Akteuren. Dies erfordert allerdings sichere Schnittstellen sowie Speicher- und Rechenkapazitäten. Die Politik

hat daher verschiedene Initiativen gestartet, um die Dateninfrastruktur zu verbessern. In der europäischen Initiative GAIA-X¹⁹⁰ arbeiten Akteure aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft an einem gemeinsamen Plattformökosystem. GAIA-X steht in engem Zusammenhang mit der „Plattform Industrie 4.0“¹⁹¹ und wird in verschiedenen Förderungen des Bundes berücksichtigt.¹⁹² Ergänzend soll das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte bundesweite Netzwerk der „Mittelstand-Digital Zentren“ kleinere und mittlere Unternehmen bei der Digitalisierung unterstützen, seit Juni 2024 mit verstärktem Fokus auf künstliche Intelligenz.¹⁹³

Die Datennutzung hängt jedoch auch von rechtlichen Rahmenseetzungen etwa beim Datenschutz ab. Das verabschiedete Gesundheitsdatennutzungsgesetz hat hier neuen Spielraum eröffnet. Das von der Bundesregierung in den vergangenen Jahren vorbereitete, aber noch nicht verabschiedete Forschungsdatengesetz könnte die Datennutzung ebenfalls erleichtern.

Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung als wichtiger Kontextfaktor

Ein weiterer, aktuell intensiv diskutierter Kontextfaktor für die Bewältigung des transformativen Strukturwandels ist die Effizienz der öffentlichen Verwaltung (vgl. Kapitel A 1 und A 2). Die Digitalisierung der Verwaltung ermöglicht es Unternehmen, Bürokratiekosten zu senken und schneller auf Marktänderungen zu reagieren.¹⁹⁴ Kernelemente sind hochwertige Registerdaten¹⁹⁵ mit entsprechenden Schnittstellen, digitalisierte Verwaltungsleistungen¹⁹⁶ mit benutzerfreundlichen Oberflächen, interoperable Systeme und Standards sowie angemessene Datenschutzregelungen.

Hierbei spielt das Once-Only-Prinzip eine zentrale Rolle, d. h. dass Unternehmen nur einmal Informationen bereitstellen müssen, damit diese für die Bearbeitung verschiedener Verwaltungsvorgänge durch den behördenübergreifenden und sicheren¹⁹⁷ Datenabruf genutzt werden können. Zudem werden die Verwaltungsportale der verschiedenen Behörden so miteinander verknüpft, dass u. a. Unternehmen einen zentralen Zugang zu allen Verwaltungsleistungen haben (One-Stop-Government-Lösung).¹⁹⁸ Die Bundesregierung hat verschiedene Gesetze zur Verwaltungsdigitalisierung verabschiedet, darunter im Juli 2024 das Onlinezugangs-Änderungsgesetz.

Jedoch bleiben Digitalisierungspotenziale aufgrund langsamer Registerverknüpfungen und teilweise fehlender gesetzlicher Grundlage für den Datenaustausch weiterhin ungenutzt.¹⁹⁹

CO₂-Bepreisung und weitere Maßnahmen

Die Dekarbonisierung ist ebenso wie die Digitalisierung Gegenstand umfassender politischer Aktivitäten. Eine zentrale Maßnahme ist die CO₂-Bepreisung, die in Deutschland für die Bereiche Wärme und Verkehr und durch das European Emissions Trading System (EU ETS) für Emissionen aus großen Energieanlagen und energieintensiven Industrieanlagen umgesetzt wird.²⁰⁰ Ein wirksamer CO₂-Preis verteuert die Nutzung fossiler Energieträger und darauf basierender Technologien und regt somit zur Entwicklung und Nutzung umweltfreundlicher Technologien an. Um den transformativen Strukturwandel effizient zu gestalten, bedarf es eines einheitlichen und hinreichend hohen CO₂-Preises für alle Akteure und Aktivitäten, den es aufgrund der separaten Systeme für Wärme und Verkehr sowie für Energie und Industrie in dieser Form allerdings bislang nicht gibt.

Begleitende Instrumente neben der CO₂-Bepreisung umfassen die Bereitstellung und den Ausbau wichtiger Infrastrukturen insbesondere in der Energieversorgung (Strom und Wasserstoff), im Güterverkehrsnetz und in der Ladeinfrastruktur. Zu den hierzu von der Bundesregierung umgesetzten Maßnahmen gehören u. a. die Förderung des industriellen Einsatzes von Wasserstoff sowie die Unterstützung der Batteriezellfertigung und der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Mittels sogenannter Klimaschutzverträge sichert der Staat ausgewählte Unternehmen gegen Kostenrisiken ab, die mit der Einführung neuer klimaschonender Produktionstechnologien verbunden sind. Eine erste wettbewerbliche Ausschreibung solcher Verträge wurde 2024 durchgeführt. Längerfristig angelegt sind Bemühungen der Politik, durch die Festlegung von Produktanforderungen und die Schaffung von Nachfrage sogenannte „grüne“ Leitmärkte für CO₂-arm produzierte Grundstoffe zu etablieren.

Auch zukünftig wird es Bereiche und Prozesse geben, bei denen CO₂ ausgestoßen wird. Um dennoch bis zum Jahr 2045 Netto-Treibhausgasneutralität und nach dem Jahr 2050 negative Treibhausgasemissionen zu erreichen²⁰¹, wurde die Forschung und Entwicklung (FuE) von Methoden und Technologien zur Entnahme und Speiche-

rung oder Nutzung von Kohlenstoff, CCS (Carbon Capture and Storage) bzw. CCU (Carbon Capture and Utilization), ausgebaut²⁰² und begonnen, den Anpassungsbedarf im bestehenden Rechtsrahmen herauszuarbeiten²⁰³. Des Weiteren werden mit der Carbon-Management-Strategie²⁰⁴ sowie der Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe)²⁰⁵ derzeit zwei Strategien entwickelt, die auf Initiativen des BMWK zurückgehen.

Förderung strukturschwacher Regionen im transformativen Strukturwandel

Die Förderung strukturschwacher Regionen hat in Deutschland eine lange Tradition. Mit dem Gesamtdeutschen Fördersystem für strukturschwache Regionen (GFS)²⁰⁶ wurde ein gemeinsamer Rahmen für verschiedene Programme der Regionalförderung geschaffen, der die Koordination der Förderung verbessern soll.²⁰⁷

Die digitale Transformation wird im GFS-Rahmen vorwiegend unter Infrastrukturaspekten behandelt. Für das oben genannte Breitbandförderprogramm „Gigabitförderung 2.0“ wurde 2023 ein Kriterienkatalog²⁰⁸ eingeführt, der unterversorgte ländliche Regionen priorisiert.²⁰⁹ Im Kontext der überbetrieblichen Berufsbildungsstätten (ÜBS), die insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei der Ausbildung von Fachkräften unterstützen, wurde von 2016 bis 2023 mit dem Sonderprogramm ÜBS-Digitalisierung die Ausstattung mit digitalen Technologien gefördert.²¹⁰

Im Dezember 2022 wurde die Fördereinstufung der Regionen für die Bund-Länder-Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur“ (GRW) grundlegend reformiert, um die Transformation zur Klimaneutralität bis 2045 zu unterstützen.²¹¹

Digitalisierung und Dekarbonisierung verstärkt im Fokus der Projektförderung des Bundes

Die Projektförderung der Bundesministerien hat erheblichen Einfluss auf Aktivitäten von Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Über Ausmaß und Entwicklung dieser Projektförderung gibt der Förderkatalog des Bundes Auskunft.²¹² Im Jahr 2019 lag die Anzahl der geförderten Projekte nach einem drastischen Anstieg in den Jahren davor erstmals über 10.000 (vgl. Abbildung B 1-14).²¹³ Die

bewilligten Fördermittel stiegen ebenfalls stark an. Von 2021 bis 2023 betragen sie rund 17 Milliarden Euro jährlich.

Der Förderkatalog selbst beinhaltet keine Indikatoren, die eine Unterscheidung nach Digitalisierung und Dekarbonisierung zulassen. Mittels eines neu entwickelten Verfahrens in der von der Expertenkommission beauftragten Studie, das auf Projektiteln sowie der Leistungsplansystematik des Bundes²¹⁴ beruht, ist eine solche Zuordnung allerdings möglich.²¹⁵ Dabei wird zwischen einer engen und einer weiten Klassifikation unterschieden.

Im Bereich Digitalisierung umfasst die enge Klassifikation Projekte in den Themenbereichen Software, Datenverarbeitung, Automatisierung, künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen sowie Anwendungen der digitalen Technologien. Die weite Klassifikation umfasst zusätzlich die unterstützende Hardware mit den Themenbereichen Telekommunikation (mit direkter Verbindung zu digitalen Diensten wie beispielsweise 5G-Netzen), Infrastrukturtechnologien (darunter Breitband- und Glasfasernetze) und Technologien zur Unterstützung oder Verbesserung anderer Systeme.

Hinsichtlich der Digitalisierung sind, auf Basis der weiten Klassifikation, sowohl die Anzahl der geförderten Projekte als auch die dafür bewilligten Fördermittel im Jahr 2016 gegenüber dem Zeitraum 2000 bis 2015 sprunghaft angestiegen (vgl. Abbildung B 1-14). Mit Ausnahme des Jahres 2018, also nach der Bundestagswahl, wurden im Zeitraum 2016 bis 2023 jährlich zwischen 1.689 und 2.364 Digitalisierungsprojekte in der weiten Klassifikation mit Beträgen zwischen 2,6 und 5,8 Milliarden Euro gefördert. Dies entspricht Anteilen zwischen 14,3 und 22,3 Prozent aller geförderten Projekte bzw. zwischen 19,7 und 48,9 Prozent aller bewilligten Fördermittel, wobei die höchsten Anteile jeweils in den Jahren 2016 und 2017 zu verzeichnen waren.

Große Teile dieser Förderung entfallen seit 2016 auf die unterstützende Hardware und Infrastruktur, die in der engen Klassifikation von Digitalisierungsprojekten nicht enthalten sind. Wieder ohne Betrachtung des Jahres 2018, wurden im Zeitraum 2016 bis 2023 jährlich nur zwischen 357 und 963 Digitalisierungsprojekte in der engen Klassifikation mit Beträgen zwischen 0,7 und knapp 2,1 Milliarden Euro gefördert. Dies entspricht Anteilen zwischen 4,5 und 7,4 Prozent aller geförderten Projekte bzw.

zwischen 7,5 und 12,1 Prozent aller bewilligten Fördermittel (nicht in der Abbildung B 1-14 ausgewiesen).

Im Bereich Dekarbonisierung erfasst die enge Klassifikation Themenfelder von sauberen Energietechnologien über nachhaltigen Transport und Logistik bis hin zu Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS).²¹⁶ Die weite Klassifikation umfasst zusätzlich Energieeffizienz-Technologien sowie nachhaltige Land- und Forstwirtschaft. Der Anteil der Dekarbonisierungsprojekte an allen geförderten Projekten (weite Klassifikation) stieg von unter 10 Prozent in den Jahren 2000 bis 2004 auf Werte um 35 Prozent seit dem Jahr 2011 (mit Ausnahme der Jahre 2013, 2020 und 2023). Dieser Anstieg spiegelt sich jedoch nicht im gleichen Umfang in den Fördersummen wider, mit Ausnahme der Jahre 2022 und 2023 (vgl. Abbildung B 1-15).

Deutliche regionale Unterschiede beim Anteil geförderter Aktivitäten in den Bereichen Digitalisierung und Dekarbonisierung

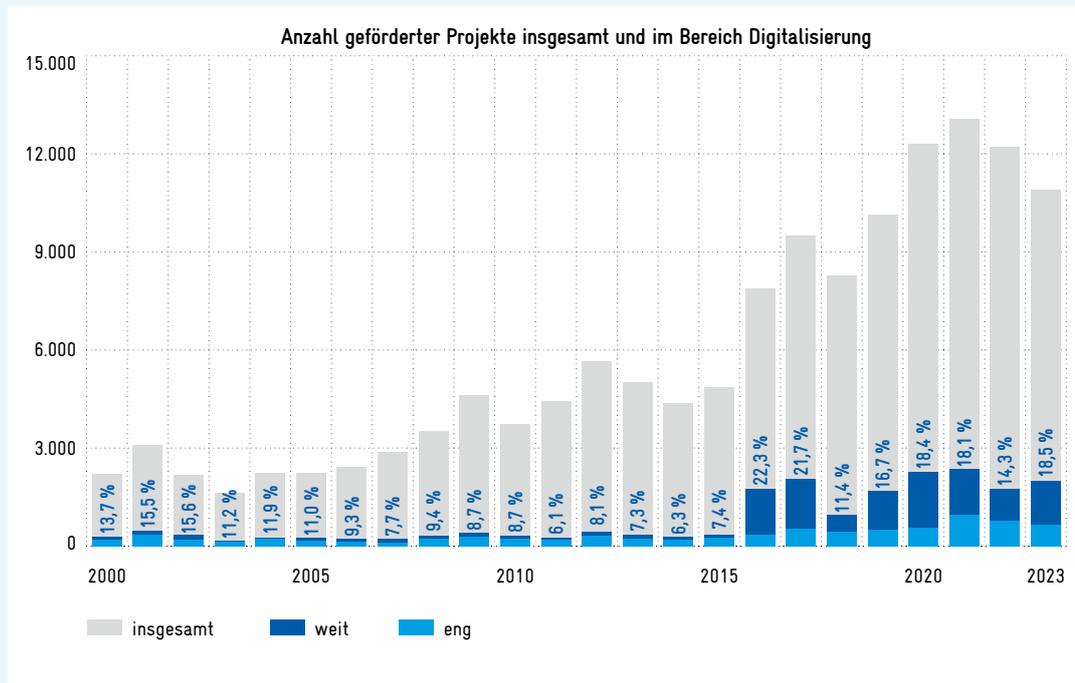
Die Analyse der geförderten Aktivitäten im Bereich Digitalisierung und Dekarbonisierung zeigt für Deutschland deutliche regionale Unterschiede. Einzelne Regionen sind stärker als andere auf die Förderung von Digitalisierungsprojekten spezialisiert²¹⁷, wobei sich das Ausmaß der Unterschiede in der regionalen Spezialisierung seit 2012 nicht deutlich geändert hat. Regionen, die auf Projekte mit Digitalisierungsbezug spezialisiert sind, finden sich in ganz Deutschland, dabei sind Großstädte oft stärker spezialisiert als die umliegenden Landkreise. Im Bereich Dekarbonisierung hat sich ein Anfang der 2010er Jahre bestehendes West-Ost-Gefälle mittlerweile abgeschwächt, jedoch bleiben Unterschiede zwischen städtischen und ländlichen Regionen bestehen. Eine Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit denen der regionalen Patentanalyse in Kapitel B 1-2 zeigt zumindest für die Digitalisierung eine statistisch signifikante, jedoch nicht sehr ausgeprägte Korrelation.²¹⁸

Einwohnerstarke Regionen werben zwar nicht überproportional viele Förderprojekte ein, erzielen allerdings überproportional hohe Fördersummen, sowohl im Bereich Digitalisierung als auch im Bereich Dekarbonisierung.²¹⁹ Dies könnte auf strukturelle Vorteile einwohnerstarker Regionen in der Initiierung von umfangreichen und kostspieligen Projekten hinweisen.

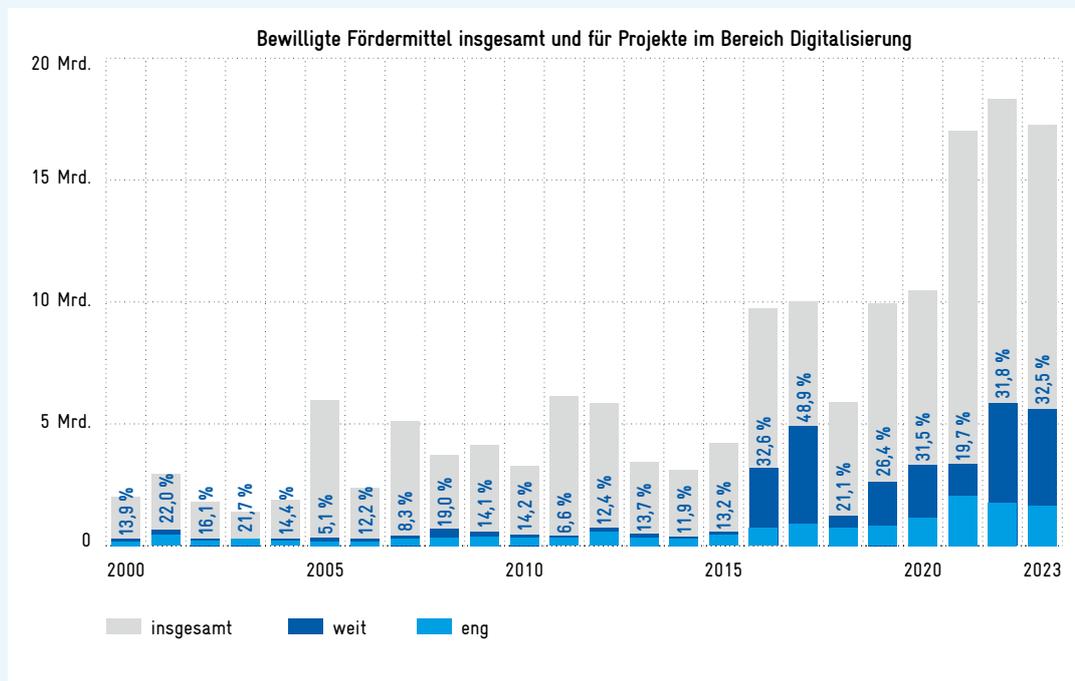


[Download der
Abbildung
und Daten](#)

Abb. B 1-14 Projektförderung des Bundes im Bereich Digitalisierung im Zeitraum 2000–2023



Lesebeispiel: Im Jahr 2020 wurden insgesamt 12.324 Projekte gefördert. 2.270 dieser Projekte entfielen bei der Verwendung der weiten Klassifikation (inkl. u.a. Infrastruktur) auf den Bereich Digitalisierung, was einem Anteil von 18,4 Prozent entspricht. Wird dahingegen die enge Klassifikation verwendet, so waren es 556 geförderte Projekte.



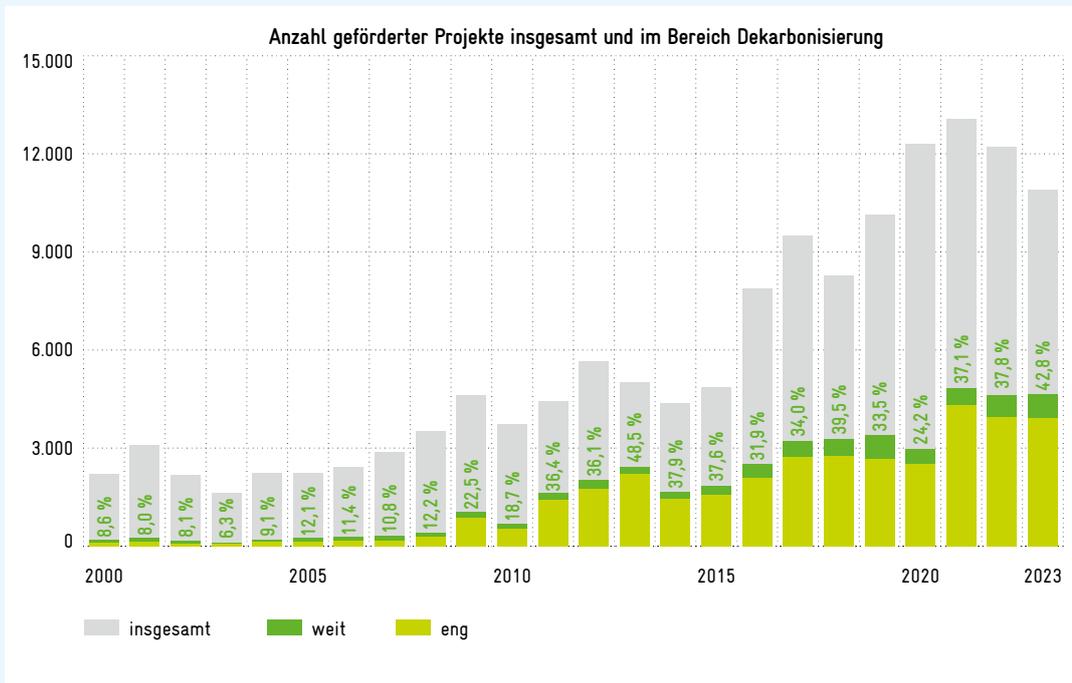
Lesebeispiel: Im Jahr 2020 wurden insgesamt rund 10,5 Milliarden Euro an Fördermitteln bewilligt. Davon entfielen rund 3,3 Milliarden Euro auf Projekte, die bei Verwendung der weiten Klassifikation (inkl. u.a. Infrastruktur) dem Bereich Digitalisierung zugeordnet werden, was einem Anteil von 31,5 Prozent entspricht. Wird dahingegen die enge Klassifikation verwendet, so waren es rund 1,1 Milliarden Euro.

Berechnungen basierend auf Förderkatalog-Daten in Brökel (2025). Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

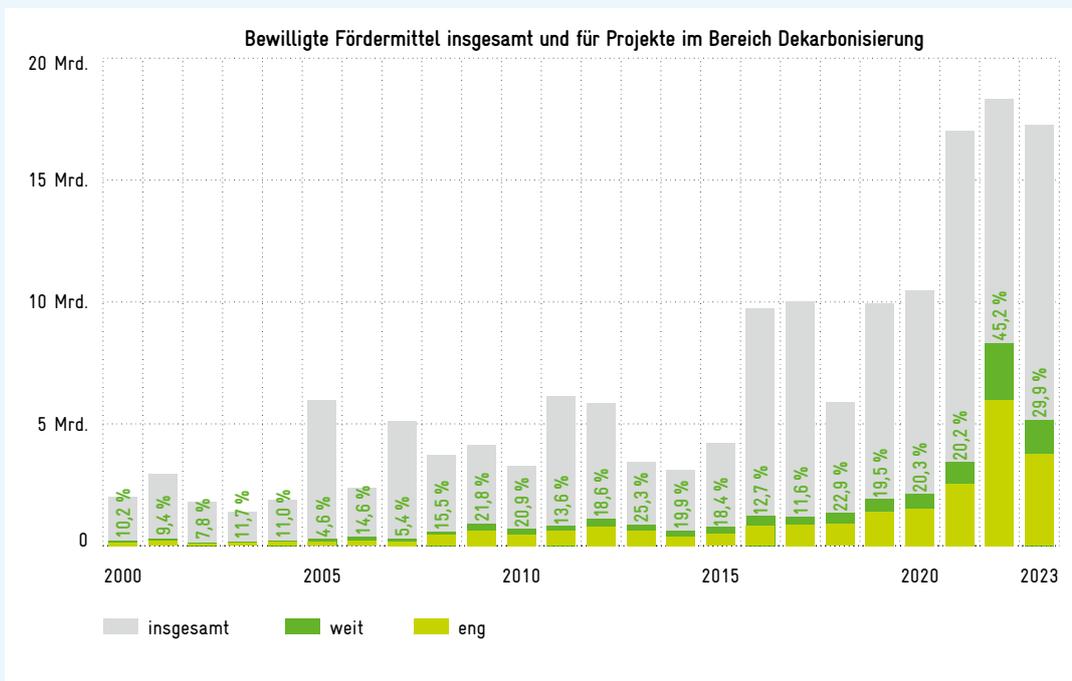
Abb. B 1-15 Projektförderung des Bundes im Bereich Dekarbonisierung im Zeitraum 2000–2023



[Download der Abbildung und Daten](#)



Lesbeispiel: Im Jahr 2020 wurden insgesamt 12.324 Projekte gefördert. 2.986 dieser Projekte entfielen bei der Verwendung der weiten Klassifikation auf den Bereich Dekarbonisierung, was einem Anteil von 24,2 Prozent entspricht. Wird dahingegen die enge Klassifikation verwendet, so waren es 2.518 geförderte Projekte.



Lesbeispiel: Im Jahr 2020 wurden insgesamt rund 10,5 Milliarden Euro an Fördermitteln bewilligt. Davon entfielen rund 2,1 Milliarden Euro auf Projekte, die bei Verwendung der weiten Klassifikation dem Bereich Dekarbonisierung zugeordnet werden, was einem Anteil von 20,3 Prozent entspricht. Wird dahingegen die enge Klassifikation verwendet, so waren es rund 1,5 Milliarden Euro.

Berechnungen basierend auf Förderkatalog-Daten in Brökel (2025). Eigene Darstellung.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Kooperative Projekte²²⁰ mit mehreren beteiligten Organisationen können ein Instrument zur Förderung von Innovationsökosystemen darstellen. Der Anteil kooperativer Projekte an allen Förderprojekten betrug im Zeitraum 2005 bis 2010 ca. 30 Prozent, lag jedoch im Zeitraum 2018 bis 2023 nur noch zwischen 18,0 und 22,1 Prozent. Viele dieser kooperativen Projekte sind Digitalisierungsprojekte²²¹, wohingegen Dekarbonisierungsprojekte²²² nur einen kleinen Anteil ausmachen (jeweils in der engen Klassifikation).

Sofern diese kooperativen Projekte durch die Zusammenarbeit von Verbundpartnern aus verschiedenen Regionen charakterisiert sind, ermöglichen sie den Wissensaustausch über Regionengrenzen hinweg. Zentrale Knotenpunkte solcher überregionalen Kooperationsprojekte im Digitalisierungsbereich sind vor allem Großstädte und Technologiezentren wie Berlin, München, Stuttgart, Dresden und Hamburg.²²³

B 1-7 Handlungsempfehlungen

Der mit Digitalisierung und Dekarbonisierung verbundene transformative Strukturwandel stellt die deutsche Wirtschaft und Gesellschaft vor umfassende Herausforderungen. Er birgt aber auch erhebliche Chancen. Politisches Handeln sollte mit Blick auf die Bereiche der Digitalisierung und der Dekarbonisierung vor allem die allgemeinen Grundlagen verbessern, um neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, Produktionsprozesse umzustellen und neue Arbeitsplätze zu schaffen, sodass die damit jeweils verbundenen neuen Tätigkeitsprofile zum transformativen Strukturwandel beitragen. Aus Sicht der Transformationserfordernisse ist es dabei nachrangig, in welcher Region oder in welchem Sektor bzw. in welcher Branche diese neuen Tätigkeitsprofile konkret entstehen. Dies sollte allein den jeweiligen einzelwirtschaftlichen Abwägungen der Akteure überlassen bleiben. Auf den Einzelfall bezogenen Eingriffen, die diesen Marktprozess hemmen, sollte die Wirtschaftspolitik entsagen, da solche Eingriffe den Strukturwandel – und damit nicht zuletzt das Wohlstandswachstum – an seiner Entfaltung hindern.

Die Analysen in diesem Kapitel deuten auf erhebliche Rückstände Deutschlands hin, neue digitale Produkte, Prozesse und Geschäftsideen zu entwickeln und umzusetzen sowie die Voraussetzungen

dafür zu schaffen. Zugleich ist es für eine erfolgreiche Dekarbonisierung notwendig, dass Klimaschutzmaßnahmen effizient ausgestaltet werden, um die Kosten für alle Beteiligten so gering wie möglich zu halten und Anreize für Innovationen zu setzen. Angesichts der hohen Anteile der Beschäftigten, die in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial oder in umweltschädlichen Berufen hohem Anpassungsdruck ausgesetzt sind, muss ein besonderes Augenmerk der Politik auf Maßnahmen zur Förderung der Arbeitsmarktmobilität und der Qualifizierung von Beschäftigten gelegt werden.

Aspekte des transformativen Strukturwandels wurden nicht nur in den hier vorgelegten Analysen, sondern auch bereits in verschiedenen Schwerpunktkapiteln der früheren Jahresgutachten der Expertenkommission berücksichtigt. Dazu zählen insbesondere Analysen zu „Innovationen für die Energiewende“²²⁴, „Anpassung der beruflichen Aus- und Weiterbildung an die digitale Transformation“²²⁵ und „Innovationen in einer alternden Gesellschaft“²²⁶. Nachfolgend wird daher auch auf frühere Handlungsempfehlungen verwiesen, sofern sie aus Sicht der Expertenkommission im Kontext des transformativen Strukturwandels relevant sind.

Innovation fördern, statt Strukturen zu konservieren

- Der transformative Strukturwandel sollte von der Politik aktiv begleitet werden. Dabei sollte der Fokus darauf liegen, die Entwicklung und Umsetzung digitaler und klimaschonender Aktivitäten zu ermöglichen und ggf. zu unterstützen, anstatt bestehende Strukturen zu konservieren.
- Um rechtzeitig Potenzial zur Schaffung neuer Beschäftigung aufzubauen, sollten Forschung und Innovation (F&I), Technologietransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sowie Unternehmensgründungen breit gefördert werden. Hierbei sollten vor allem Aktivitäten unterstützt werden, die einen Beitrag zum transformativen Strukturwandel leisten. Jedoch sollten Förderprogramme möglichst offen ausgestaltet sein, um das Innovationspotenzial bestmöglich auszuschöpfen und nicht spezifische Sektoren, Akteure oder Technologien gegenüber anderen zu bevorzugen.

Bessere Voraussetzungen für die Digitalisierung schaffen

- Das Glasfasernetz ist zentral für die Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit von Betrieben und sollte insbesondere in ländlichen Regionen zügig weiter ausgebaut werden.
- Der Zugang zu Daten und die Möglichkeit ihrer Verknüpfung sind entscheidend für Produkt-, Prozess- und Geschäftsmodellinnovationen und die Attraktivität Deutschlands als F&I-Standort.²²⁷ Die dafür erforderlichen Voraussetzungen, u. a. durch Anpassung und einheitliche Auslegung rechtlicher Regelungen, sollten endlich geschaffen werden.²²⁸ Die Balance zwischen Datennutzung und Datenschutz sollte neu justiert werden.²²⁹ Das bereits als Referentenentwurf vorliegende Forschungsdatengesetz sollte zeitnah verabschiedet werden.
- Eine effiziente öffentliche Verwaltung ist ein zentraler Kontextfaktor für den transformativen Strukturwandel. Die Digitalisierung der Verwaltung muss entschieden vorangetrieben werden. Eine Registermodernisierung sowie die Bereitstellung digitaler Verwaltungsdienstleistungen müssen zügiger als bisher voranschreiten.²³⁰
- Die Projektförderung des Bundes kann einen bedeutsamen Beitrag zur Erreichung der Transformationsziele leisten. Um diesen Beitrag besser abschätzen zu können, hält es die Expertenkommission für erforderlich, eine belastbare ressortübergreifende Datenbasis zu schaffen, mittels derer der Beitrag der Projektförderung zu den Transformationszielen besser abgeschätzt werden kann. Die vorhandene Evidenz deutet darauf hin, dass im Bereich der Digitalisierung vor allem die Förderung der technischen Infrastruktur ausgebaut wurde (siehe oben Abschnitt B 1-5). Die Expertenkommission empfiehlt, ergänzend auch den Anteil der software-, daten- und automatisierungsorientierten Projekte an der Gesamtprojektförderung zu erhöhen.

Klimapolitik effizient ausgestalten

- Ein über alle Sektoren hinweg einheitlicher CO₂-Preis ist zentrale Voraussetzung, um

Unternehmen dazu anzuregen, möglichst effizient umweltfreundliche Technologien zu entwickeln und zu nutzen.²³¹ Da diese Umstellung zum Teil hohe Kosten aufwirft, sind Erleichterungen an anderer Stelle angezeigt, insbesondere allgemeine, also von der individuellen Betroffenheit durch die Umstellungserfordernisse unabhängige, Steuersenkungen.

- Bei besonders stark durch den CO₂-Preis betroffenen Umstellungsaktivitäten kann es im Einzelfall erforderlich sein, dass sich der Staat an den dabei entstehenden Investitionskosten der Unternehmen beteiligt. Dadurch dürfen jedoch keine dauerhaften Subventionsstatbestände geschaffen werden. Eine solche Unterstützung kann auch die Entwicklung neuer Verfahren und innovativer technischer Umsetzungen begünstigen, durch die neue Marktchancen entstehen. Diese Förderung ist möglichst effizient, transparent und nach sektorübergreifend einheitlichen Kriterien auszugestalten.
- Die Nutzung sogenannter Klimaschutzverträge kann zwar die Markteinführung innovativer Produktionsverfahren unterstützen. Angesichts der mit ihnen verbundenen Informationsasymmetrien zugunsten der geförderten Unternehmen sollten sie allerdings nur dann genutzt werden, wenn durch ausreichenden Wettbewerb um die Förderung eine übermäßige Kostenbelastung des Staates vermieden werden kann.²³²

Regionale Politiken auf Unterstützung des transformativen Strukturwandels ausrichten

- Die Expertenkommission unterstützt die Maßnahmen der Politik, die die ressortübergreifende Koordination verschiedener Politikmaßnahmen und deren Ausrichtung auf den transformativen Strukturwandel verbessern. Dazu zählen etwa die veränderte Fördereinstufung der Regionen bei der GRW-Förderung oder die Entwicklung des Gesamtdeutschen Fördersystems für strukturschwache Regionen.
- Die Anpassungsfähigkeit einer Region an den transformativen Strukturwandel kann dadurch gestärkt werden, dass die Unternehmen gemeinsam mit Forschungseinrichtungen

gen, Investoren und anderen Unternehmen in regionale Innovationsökosysteme eingebunden sind. Verbundförderprojekte können helfen, derartige Innovationsökosysteme weiterzuentwickeln.²³³

- Die Einbindung von Unternehmen außerhalb etablierter Ökosysteme in überregionale Verbundförderprojekte ermöglicht ihnen den Zugang zu Wissen, Technologien und Kooperationen und kann ihr Innovationspotenzial steigern. Die Förderung ist bestmöglich daraufhin auszurichten, dass sie die Transformationsdynamik unterstützt.

Mobilität und Weiterqualifizierung der Beschäftigten fördern

- Ein hoher Anteil der Beschäftigten übt Tätigkeiten aus, die durch Computer oder computergesteuerte Maschinen ersetzt werden können oder negative Umwelteffekte haben. Für diese Beschäftigten ergibt sich aus dem transformativen Strukturwandel ein erhebliches Beschäftigungsrisiko. Zugleich ist zu erwarten, dass sich der bereits bestehende Fach- und Arbeitskräftemangel weiter verstärkt und das Wachstum innovativer Unternehmen behindert.²³⁴ Mobilität zwischen Regionen, Sektoren und Betrieben ist von zentraler Bedeutung, um den punktuellen Abbau von Beschäftigung mit der Überwindung von Wachstumshemmnissen zu verknüpfen. Die Effizienz des Übergangs zu erhöhen und diesen für die Betroffenen möglichst schonend auszugestalten, sollte ein zentrales Politikziel sein.²³⁵

- Die Förderinstrumente der Bundesagentur für Arbeit für die berufsbezogene Weiterbildung zur Anpassung an den transformativen Strukturwandel sind auf eine Weiterbeschäftigung beim bisherigen Arbeitgeber ausgerichtet und setzen oft erst ein, wenn der Arbeitsplatz gefährdet oder bereits verloren ist. Maßnahmen wie das Qualifizierungschancengesetz²³⁶ und Arbeit-von-morgen-Gesetz²³⁷ richten sich direkt an Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer, deren Berufe durch technologischen Fortschritt gefährdet oder durch Strukturwandel betroffen sind, und an Personen, die sich in Engpassberufen weiterbilden möchten.²³⁸ Zukünftig sollte bei präventiven Anpassungsqualifizierungen der Umstieg zu einem branchenfremden Arbeitgeber stärker berücksichtigt werden.²³⁹ Die Tätigkeitsprofile der Beschäftigten werden sich weiter verändern. Deshalb ist es notwendig, die berufliche Ausbildung an die Anforderungen der digitalisierten und umweltgerechten Arbeitswelt anzupassen und die berufsbezogene Weiterbildung zu stärken. Dazu zählt auch, dass die Ausbildungsordnungen an die Veränderungen durch die Digitalisierung und Dekarbonisierung angepasst und hinreichend aktuell gehalten werden.²⁴⁰

B2 Quantentechnologien



[Download der
Abbildung](#)





B 2 Quantentechnologien

Viele Spitzentechnologien wie Computerprozessoren, Laser oder Satellitennavigation basieren auf dem Verständnis quantenphysikalischer Phänomene. Neue Entwicklungen in der Physik ermöglichen mittlerweile die gezielte Kontrolle von Quantensystemen, um Quanteneffekte für innovative Lösungen in bestehenden Anwendungsfeldern zu nutzen, bisher unlösbare technische Probleme anzugehen sowie neue Anwendungsfelder zu erschließen.

Neue Quantentechnologien bergen enorme Innovationspotenziale. So verspricht Quantencomputing eine deutliche Steigerung der Rechenleistung. Die Quantensensorik verbessert die Empfindlichkeit und Präzision von Messtechniken und bildgebenden Verfahren erheblich. Zugleich sind diese Technologien mit sicherheitspolitischen Herausforderungen verbunden, da sie die IT- und Datensicherheit gefährden. Der Schutz vor Cyberangriffen erfordert daher die Entwicklung neuer, langfristig sicherer Verschlüsselungstechnologien. Die Quantenkommunikation bietet hier vielversprechende Möglichkeiten.

Viele dieser neuen Technologien stehen noch am Anfang der Entwicklung, was deutschen Akteuren in Forschung und Innovation (F&I) die Möglichkeit bietet, sowohl an dieser Entwicklung als auch an der Gestaltung zukünftiger Anwendungsfelder aktiv mitzuwirken. Deutschland befindet sich hierbei in einer starken Ausgangsposition, die es im Verbund mit den EU-Partnern zu sichern gilt, um insbesondere gegenüber den USA und China wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Bundesregierung spielt hierbei eine zentrale Rolle, indem sie Forschung und Entwicklung (FuE) gezielt fördert, geeignete Rahmenbedingungen für eine langfristig angelegte Zusam-

menarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ermöglicht und perspektivisch – mittels innovationsorientierter Beschaffung – staatliche Nachfrage nach dem Output aus dieser Zusammenarbeit schafft. Der Aufbau eines F&I-Ökosystems sollte dabei konsequent europäisch gedacht werden. Auf nationaler Ebene sollten die bestehenden regionalen Cluster ausgebaut und miteinander vernetzt sowie in eine nationale Strategie integriert werden.

B2-1 Von der Quantenmechanik zu Quantentechnologien

Vor 125 Jahren legten u. a. deutsche Wissenschaftler den Grundstein für ein neues Verständnis physikalischer Phänomene, indem sie die theoretische Basis für die Quantenphysik schufen.²⁴¹ Deutsche Forschungseinrichtungen spielen weiterhin eine starke Rolle in der globalen Quantenforschung – sowohl in der Grundlagenphysik als auch in der anwendungsorientierten FuE.²⁴²

Die Quantenphysik untersucht die Eigenschaften und Verhaltensweisen von Materie und betrachtet dabei auch Phänomene auf der kleinsten physikalischen Ebene, dem sogenannten „Nanokosmos“.²⁴³ Eine zentrale Theorie in der Quantenphysik ist die Quantenmechanik, die durch zahlreiche präzise Messungen bestätigt wurde (vgl. Box B2-1).

Innovationspotenzial neuer Quantentechnologien hoch

Viele der neuen Quantentechnologien befinden sich in einer frühen Entwicklungsphase und sind weit von der Marktreife und einer breiteren Nut-

Box B 2-1 Besonderheiten der Quantenmechanik

Die Quantenmechanik basiert darauf, dass bei sogenannten **Quantensystemen** (z.B. einem Atom) maßgebliche Veränderungen dadurch ausgelöst werden, dass **Quantenobjekte** (einzelne Bestandteile des Systems wie etwa ein Elektron) durch die Einwirkung eines von außen zugefügten Teilchens (z.B. eines Photons, eines „Lichtteilchens“) ihren Zustand ändern.

Die Quantenmechanik beruht auf den folgenden Prinzipien, die auch für die Funktionsweise von Quantentechnologien zentral sind:²⁴⁴

- **Superposition:** In der Quantenphysik bezeichnet Superposition die Überlagerung mehrerer Quantenzustände. Das bedeutet, dass ein Quantensystem sich ohne Fremdeinwirkung zunächst nicht in einem klar definierten Zustand befindet, sondern mehrere mögliche

Zustände gleichzeitig einnimmt und Ergebnisse von physikalischen Vorgängen immer nur in Form einer Wahrscheinlichkeit prognostiziert werden können.²⁴⁵

- **Dekohärenz:** Überlagerungszustände eines Quantenobjekts existieren nur bei vollständiger Isolation von der Umgebung. Bereits kleinste Umwelteinflüsse führen zur Auflösung der Überlagerung und damit zur Realisierung eines bestimmten Zustandes. Umwelteinflüsse sind jedoch bei jeder Art von Messung unvermeidbar.
- **Verschränkung:** Die Verschränkung erzeugt sogenannte „Quantenkorrelationen“ zwischen Teilchen. Sobald der Zustand eines von zwei verschränkten Quantenobjekten in geeigneter Weise gemessen und damit bestimmt ist, ist auch der Zustand des anderen bestimmt, selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind.

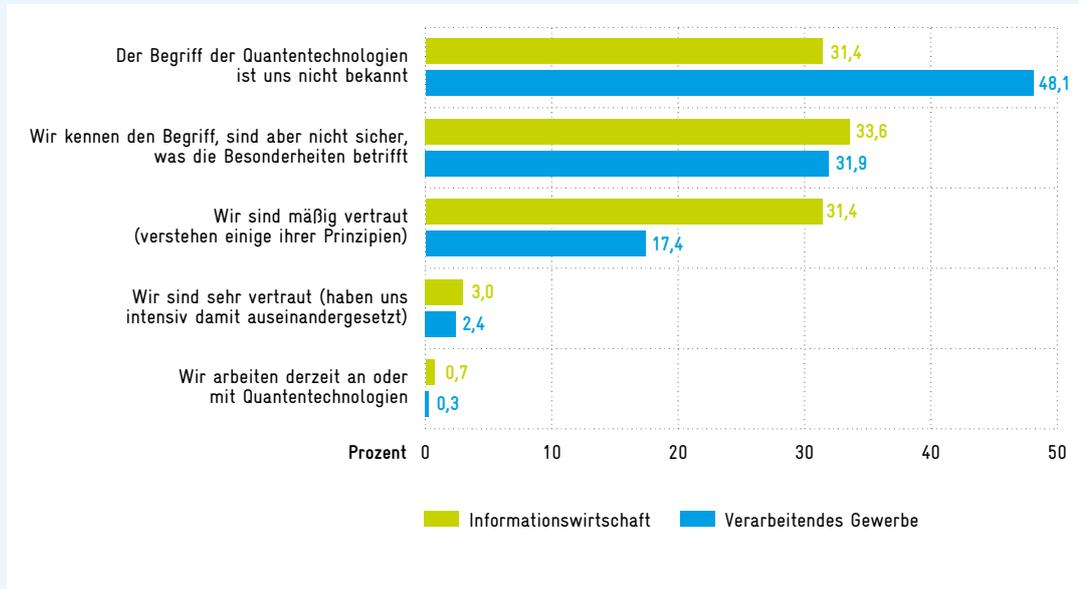
zung entfernt. Diese Einschätzung wird von einer im Auftrag der Expertenkommission durchgeführten repräsentativen Umfrage unterstützt. So geben lediglich etwa 4 Prozent der Unternehmen in der Informationswirtschaft und 3 Prozent im Verarbeitenden Gewerbe an, sich intensiv mit Quantentechnologien auseinandergesetzt zu haben oder derzeit an oder mit ihnen zu arbeiten (vgl. Abbildung B 2-2). Ähnlich gering ist der Anteil der Unternehmen, die in den nächsten fünf Jahren in diesen Bereich investieren wollen. In einer weiteren Frage an die Unternehmensvertreterinnen und -vertreter, denen Quantentechnologien bereits bekannt sind, gaben rund 6 Prozent in der Informationswirtschaft und 4 Prozent im Verarbeitenden Gewerbe an, derzeit oder in den nächsten fünf Jahren in Quantentechnologien investieren zu wollen.

Quantentechnologien zeichnen sich durch ein hohes Potenzial für Leistungssteigerungen aus. Zudem ist davon auszugehen, dass sie in vielen Branchen und im Verbund mit anderen Technologien zur Anwendung kommen und dadurch neue Innovationspotenziale eröffnen. Überschlagsrechnungen zufolge könnten Quantentechnologien bis 2035 allein in den Bereichen Chemie, Biowissenschaften, Finanz-

wesen und Automobilindustrie bis zu zwei Billionen US-Dollar an Wertschöpfung generieren.²⁴⁶ Da diese Potenziale erst noch realisiert werden müssen, zählen Quantentechnologien zu den sogenannten zukünftigen Schlüsseltechnologien.²⁴⁷

Grundsätzlich lassen sich innerhalb der Quantentechnologien drei Technologiefelder unterscheiden, die im Folgenden näher vorgestellt werden: das Quantencomputing, die Quantenkommunikation und die Quantensensorik. Als Indikator der künftigen Relevanz dieser Technologiefelder für die Anwendung in der Wirtschaft lassen sich die transnationalen Patentanmeldungen heranziehen, die als messbare Ergebnisse von FuE-Prozessen gelten. Bei allen drei Technologiefeldern zeigen die transnationalen Patentanmeldungen eine hohe Dynamik. So hat sich im Quantencomputing die Zahl der Patente zwischen 2012 und 2021 bei niedrigen Ausgangswerten fast vervierzigfacht (vgl. Abbildung B 2-3). Auch in den Technologiefeldern Quantenkommunikation sowie Quantensensorik ist im vergangenen Jahrzehnt ein deutliches Wachstum der Zahl transnationaler Patentanmeldungen zu verzeichnen.²⁴⁸

Abb. B2-2 Bekanntheit von Quantentechnologien in Unternehmen in Deutschland 2024 in Prozent

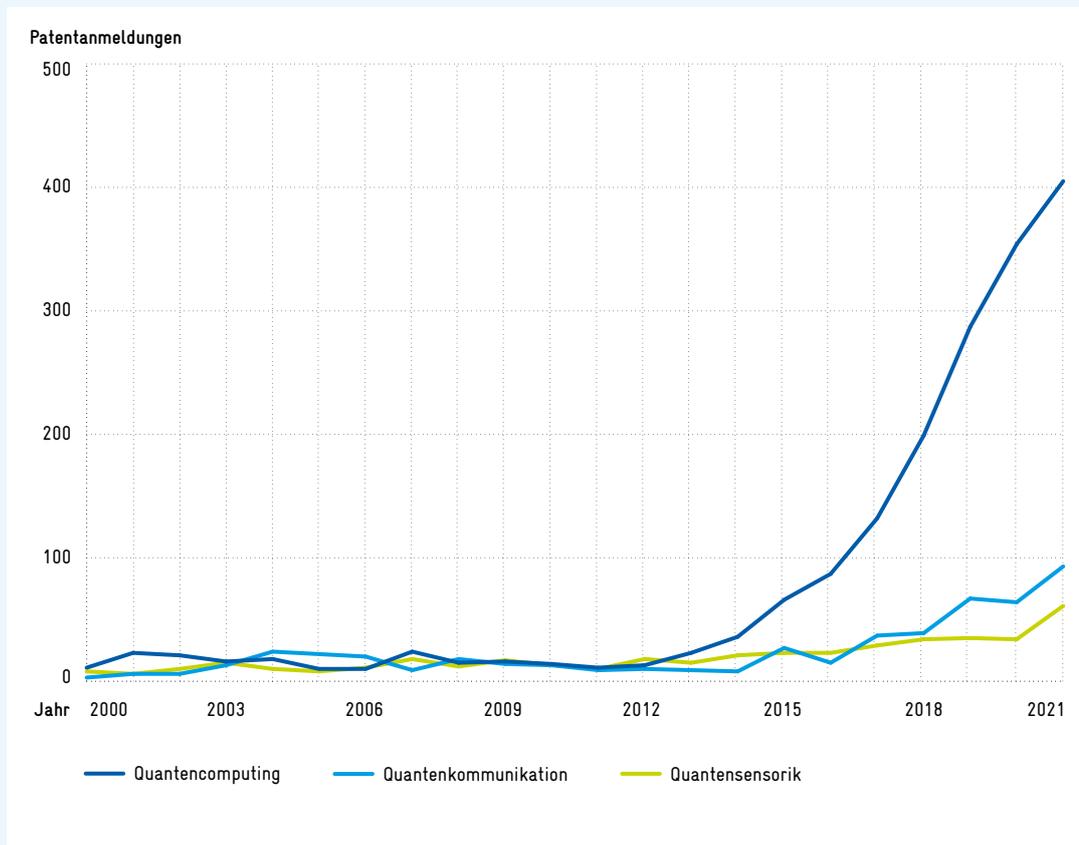


Lesebeispiel: In der Informationswirtschaft gaben 0,7 Prozent der Unternehmen an, dass sie derzeit an oder mit Quantentechnologien arbeiten.
Quelle: ZEW Konjunkturumfrage Informationswirtschaft 3. Quartal 2024.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.



[Download der Abbildung und Daten](#)

Abb. B2-3 Transnationale Patentanmeldungen nach Technologiefeld weltweit 2000–2021



Lesebeispiel: Im Jahr 2021 wurden weltweit 405 Patente im Bereich Quantencomputing angemeldet.
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.



[Download der Abbildung und Daten](#)

B 2-2 Quantencomputing

Klassische Computer haben in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte in Miniaturisierung und Rechenleistung erzielt, stoßen jedoch zunehmend an physikalische Grenzen. Das Quantencomputing macht sich nun Quantenphänomene aktiv zunutze. Dies könnte die Lösung für hochkomplexe Optimierungsprobleme in Bereichen wie Logistik, Pharmazie, Kapitalmärkte, Umwelt, Gesundheit, Ernährung, neue Materialien und Energie erheblich beschleunigen oder erstmals überhaupt ermöglichen.²⁴⁹ Zudem könnten Quantencomputer durch die effiziente Verarbeitung großer Datenmengen Schlüsseltechnologien wie etwa die künstliche Intelligenz voranbringen.²⁵⁰

Quantencomputer und hybride Systeme: Leistungspotenzial immens

Quantencomputer können dank ihrer speziellen Eigenschaften viele Rechenoperationen gleichzeitig durchführen (vgl. Box B 2-4). Dadurch sind sie potenziell in der Lage, komplexe Berechnungen, die für klassische Computer unlösbar oder extrem zeitaufwändig wären, in kurzer Zeit zu bewältigen.²⁵¹ Beispiele hierfür sind die Faktorisierung großer Zahlen, die Simulation komplexer Systeme oder die Optimierung von Prozessen. Ein messbarer Zeitvorteil gegenüber klassischen Hochleistungscomputern wird als „Quantenvorteil“ bezeichnet und konnte bereits im Kontext sehr spezieller Berechnungen nachgewiesen werden.²⁵² Perspektivisch können Quantencomputer auch in hybrider Form mit klassischen Computern zusammenarbeiten. Dabei wird bei der Lösung eines Problems zwischen den für die jeweilige Phase und das konkrete Problem am besten geeigneten Methoden gewechselt.

Die Grundlage von Quantencomputern sind Quantenbits (Qubits, vgl. Box B 2-4), die auf verschiedenen sogenannten Hardware-Plattformen basieren.²⁵³ Ziel dieser Hardware-Plattformen ist es, möglichst viele Qubits präzise zu kontrollieren und für Berechnungen einzusetzen. Derzeit haben die Plattformen allerdings unterschiedliche Entwicklungsstände und eine dominante technologische Lösung hat sich noch nicht etabliert – ein typisches Merkmal neuer Technologien.²⁵⁴ Abhängig vom Anwendungsbereich könnten sich zukünftig unterschiedliche Plattformen als besonders geeignet erweisen. Zu den größten Herausforderungen gehören die begrenzte Anzahl realisierbarer Qubits

und ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen, die Berechnungen verfälschen können. So sind beispielsweise aktuelle NISQ-Quantencomputer (Noise Intermediate-Scale Quantum) zwar in der Lage, viele Qubits zu realisieren, allerdings ist die Fehleranfälligkeit noch nicht hinreichend gering, um Berechnungen zuverlässig durchführen zu können.²⁵⁵

Derzeit laufen verschiedene Forschungsaktivitäten im Bereich des Quantencomputing parallel, mit unterschiedlichen Schwerpunkten und hohem Wertschöpfungspotenzial. Sie verfolgen das Ziel, besonders leistungsfähige, kompakte oder mit existierenden Systemen kompatible Quantencomputer zu entwickeln. Hierzu zählen Projekte zur Maximierung der Rechenleistung für Anwendungen in verschiedenen Branchen²⁵⁶, zur mobilen Nutzung von Quantencomputern²⁵⁷ oder zur Integration in bestehende Rechenzentren und Supercomputer.²⁵⁸

Angesichts der hohen technischen Anforderungen an Bau und Betrieb wird Quantencomputing derzeit als Rechenzentrumstechnologie oder Hochleistungsrechnen kategorisiert.²⁵⁹ Bereits heute werden lokale oder cloudbasierte Zugangsmöglichkeiten als Dienstleistung angeboten, um prototypische Anwendungen zu testen. Derzeit sind diese Anwendungen jedoch auf die Lösung spezifischer Optimierungsprobleme beschränkt.²⁶⁰ Ein universeller Quantencomputer, der eine Vielzahl unterschiedlicher Probleme löst, bleibt laut Expertinnen und Experten ein langfristiges Ziel.²⁶¹ Ob Quantencomputer perspektivisch nur in Rechenzentren eingesetzt werden oder ob sich, ähnlich wie in der klassischen Computerindustrie, eine Entwicklung hin zu einem breiten Angebot an Geräten für den Einsatz in Unternehmen und Privathaushalten vollziehen wird, ist derzeit noch nicht absehbar.

Ein Risiko des Quantencomputing besteht darin, dass es voraussichtlich erhebliche Auswirkungen auf die Datensicherheit haben wird. Während klassische Verschlüsselungsverfahren derzeit als sicher gelten, könnten Quantencomputer diese in Zukunft brechen und damit neue Herausforderungen für die sichere Kommunikation schaffen (vgl. Unterkapitel B 2-3).

USA von China beim Quantencomputing eingeholt

Die Ergebnisse einer von der Expertenkommission beauftragten Studie zeigen, dass chinesische

Box B 2-4 Verarbeitung von Informationen in klassischen Computern und Quantencomputern

Klassische Computer

Klassische Computer speichern und verarbeiten Informationen in Form von Nullen und Einsen, den sogenannten Bits. Vereinfacht ausgedrückt entspricht ein Bit den Zuständen „Strom aus“ (0) oder „Strom an“ (1). Zur Darstellung komplexer Informationen werden mehrere Bits zusammengefasst, z.B. zu einem Byte (8 Bits), das 256 Zustände nacheinander darstellen kann. Die Verarbeitung erfolgt durch Transistoren, die in der zentralen Prozesseinheit (Central Processing Unit – CPU) – dem „Gehirn“ des Systems – angeordnet sind. Moderne CPUs mit Milliarden von Transistoren arbeiten in der Regel mit 32- oder 64-Bit-Systemen und führen Milliarden von

Rechenoperationen pro Sekunde durch. Doch selbst Supercomputer stoßen bei hochkomplexen Berechnungen an ihre Grenzen.

Quantencomputer

Quantencomputer speichern Informationen in Quantenbits (Qubits), die die Zustände 0 und 1 gleichzeitig annehmen können (sogenannte Superposition, vgl. Box B 2-1). Die Qubits können ein gemeinsames System bilden und ermöglichen dadurch parallele Rechenoperationen. Mit jedem zusätzlichen Qubit verdoppelt sich die Anzahl der möglichen Zustände des Gesamtsystems, sodass die Anzahl der darstellbaren Zustände exponentiell mit der Anzahl der Qubits wächst. Allerdings sind Quantencomputer derzeit noch sehr stör anfällig. Für jedes Qubit, das die Rechenleistung erbringt, werden zahlreiche weitere Qubits zur Fehlerkorrektur benötigt.

Einrichtungen seit Beginn der 2000er Jahre eine zunehmend bedeutende Rolle in der Forschung zu Quantencomputing einnehmen.²⁶² Während zu Beginn der 2000er Jahre etwa 85 Prozent der globalen Publikationen unter US-amerikanischer oder europäischer Beteiligung entstanden sind, hat China diese beiden Spitzenreiter mittlerweile überholt (vgl. Abbildung B 2-5).²⁶³ Der Anteil von Publikationen mit deutscher Beteiligung ist im Zeitverlauf mit 11 bis 16 Prozent relativ konstant geblieben. Trotz der vorderen Positionierung Deutschlands findet sich keine Forschungseinrichtung aus Deutschland unter den Forschungseinrichtungen mit den weltweit meisten Publikationen im Bereich Quantencomputing. Unter den Top 10 befinden sich ausschließlich Institutionen in China, dem Vereinigten Königreich, den USA, Kanada und der Schweiz. Das Max-Planck-Institut für Quantenoptik belegt als beste deutsche Forschungseinrichtung Rang 17. Diese relativ schlechte Platzierung ist möglicherweise eine Folge davon, dass Forschung in Deutschland dezentraler organisiert ist als in anderen Ländern.

Bei den Patentanmeldungen der vergangenen zwei Jahrzehnte nehmen US-amerikanische Organisationen eine dominante Position ein.²⁶⁴ Von den weltweit insgesamt 1.791 registrierten transnationalen Patentanmeldungen im Bereich Quantencomputing entfällt knapp die Hälfte auf die USA (870), gefolgt

von der Europäischen Union (EU) (282, darunter Deutschland mit 71), China (159), Kanada (118) und Japan (104) (vgl. Abbildung B 2-5). Führend bei den transnationalen Patentanmeldungen sind die Unternehmen IBM, Microsoft und Google mit Hauptsitz in den USA und D-Wave Systems mit Hauptsitz in Kanada.

Über eine ergänzende Analyse von Unternehmensdatenbanken konnten weltweit 473 Unternehmen identifiziert werden, die beabsichtigen, Quantencomputing zu kommerzialisieren.²⁶⁵ Sie verteilen sich folgendermaßen auf die verschiedenen Regionen und Länder: Wie bei der Patentanalyse sind Unternehmen aus den USA mit 36 Prozent stark vertreten. Aus China und Deutschland stammen jeweils 7 Prozent und aus der EU insgesamt 19 Prozent der Unternehmen (vgl. Abbildung B 2-5). Unter den identifizierten Unternehmen befinden sich 131 Start-ups.²⁶⁶ Auch in dieser Gruppe bilden Unternehmen aus den USA den größten Anteil (29 Prozent).

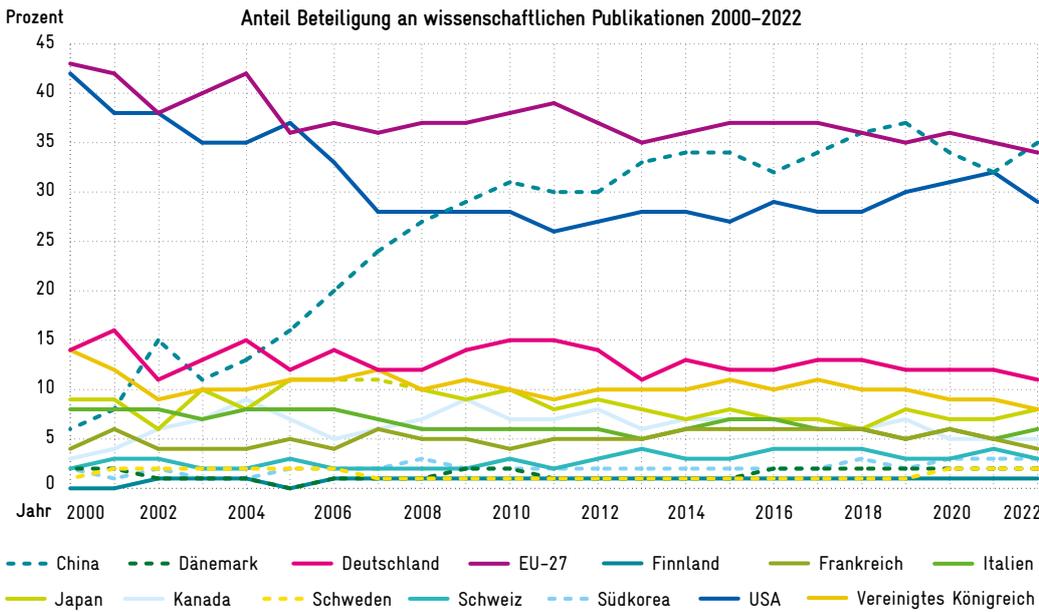
B 2-3 Quantenkommunikation

Sensible Daten können durch Verschlüsselung abhörsicher übertragen und gespeichert werden. Aktuelle Verschlüsselungstechniken basieren auf mathematischen Algorithmen, deren Entschlüsselung für leistungsstarke Computer zeitaufwändig,

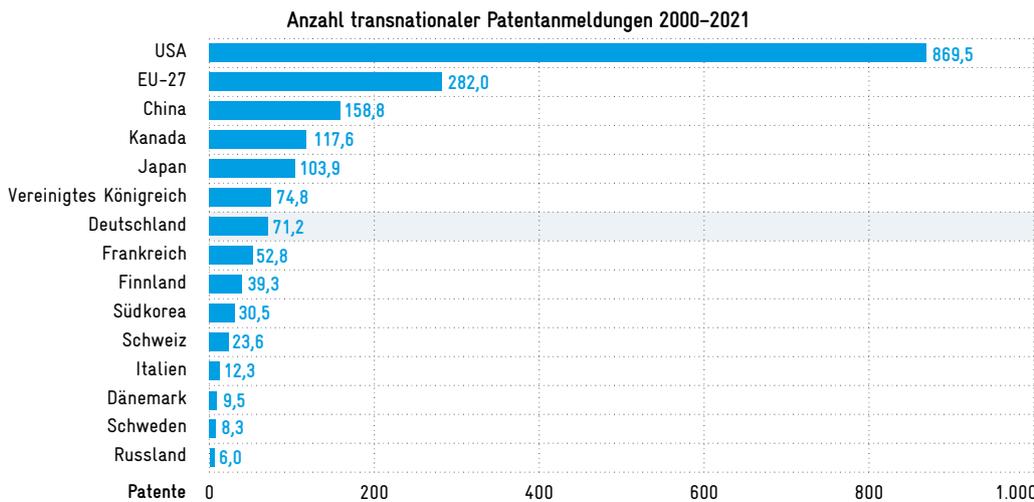
Abb. B 2-5 Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantencomputing



[Download der Abbildung und Daten](#)

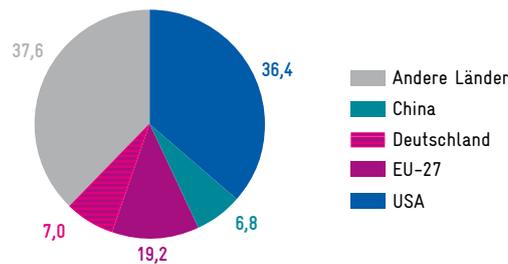


Lesebeispiel: Etwa 12 Prozent der im Jahr 2020 veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantencomputing entstanden unter Beteiligung von Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit.
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).



Lesebeispiel: Im Zeitraum 2000-2021 entfielen 71 transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantencomputing auf Erfinderrinnen und Erfinder aus Deutschland.
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen. Fraktionierte Zählweise.

Anteil aktiver Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantencomputing im Jahr 2024



Lesebeispiel: Im Jahr 2024 waren 19,2 Prozent der identifizierten Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantencomputing in der EU ansässig.
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

aber prinzipiell möglich ist. Mit der Entwicklung von Quantencomputern könnte sich die Dynamik im Wettrennen zwischen modernen Methoden zur Verschlüsselung und Abhörtechnik ändern, da Quantencomputer herkömmliche Verschlüsselungsmethoden in kurzer Zeit brechen können.²⁶⁷

Aus diesem Grund wird daran gearbeitet, klassische kryptografische Verfahren „quantensicher“ zu machen, indem mathematische Probleme zur Verschlüsselung verwendet werden, die selbst für Quantencomputer schwer zu lösen sind.²⁶⁸ Die Sicherheit solcher Verfahren hängt allerdings davon ab, dass auch zukünftige Algorithmen oder mathematische Durchbrüche diese Probleme nicht effizient lösen können. Die Quantenkommunikation nutzt für die Verschlüsselung quantenmechanische Prinzipien, sodass die Sicherheit als unabhängig von zukünftigen technologischen Entwicklungen gilt. Sie ermöglicht dadurch die abhörsichere Übertragung von Nachrichten mithilfe der sogenannten Quantenschlüsselverteilung (vgl. Box B2-6).

Quantenkommunikation für künftige Sicherheitsarchitekturen hochrelevant

Die potenzielle Fähigkeit von Quantencomputern, klassische kryptografische Verfahren zu entschlüsseln, kann Quantenkommunikation zu einem unverzichtbaren Element moderner Sicherheitsarchitekturen machen. Die Sicherheitsmerkmale

der Quantenkommunikation bieten langfristigen Schutz für Daten und Nachrichtenübermittlung, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie politischer und militärischer Kommunikation sowie der Absicherung kritischer Infrastrukturen. Derzeit wird die Nachfrage daher vor allem von staatlichen Akteuren geprägt. Langfristig kann die Quantenkommunikation den Aufbau eines „Quantennetzwerks“ aus Quantencomputern und -sensoren ermöglichen.²⁶⁹

Obwohl erste Verfahren der Quantenkommunikation bereits kommerziell verfügbar sind, bestehen noch große Herausforderungen. So ist die Informationsübertragung²⁷⁰ empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen, wodurch die Reichweite in bestehenden Glasfasernetzen derzeit lokal begrenzt ist.²⁷¹ Zudem erfordern der Ausbau der Infrastruktur und die Miniaturisierung von Hardware erhebliche Investitionen.

China und USA in der Quantenkommunikation führend

China und die USA haben bereits in den 1990er Jahren große Summen in FuE im Bereich der Quantenkommunikation investiert und wichtige Pionierarbeit geleistet. In der Folge hat die Beteiligung chinesischer Forschungseinrichtungen an wissenschaftlichen Publikationen seit den frühen 2000er Jahren erheblich zugenommen. Am aktuel-

Box B2-6 Quantenmechanik in der Kommunikation: Quantentechnologien nutzen, um vor Quantentechnologien zu schützen

Die Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution – QKD) ist eine Methode zur Sicherung von Kommunikationskanälen. Dabei wird der Schlüssel zum Ver- und Entschlüsseln der Nachricht in Quantenzuständen kodiert und über eigens dafür eingerichtete Kommunikationskanäle ausgetauscht. Die eigentliche Nachricht kann über klassische Kommunikationswege übertragen werden. Eine anschauliche Metapher für QKD ist der Austausch eines Aktenkoffers mit sensiblen Informationen zwischen zwei Diplomatinen, dessen Inhalt zerstört würde, falls eine unautorisierte

Person versucht, auf die Dokumente zuzugreifen. Im Gegensatz zu traditionellen kryptografischen Verfahren, die mathematische Algorithmen zur Schlüsselgenerierung nutzen, beruht QKD auf Prinzipien der Quantenmechanik (vgl. Box B2-1). Ein zentrales Konzept hierbei ist die Superposition zwischen zwei Zuständen. Sie ändert sich messbar, sobald versucht wird, die Information über den Zustand des Quantensystems während der Übertragung zwischen Sender und Empfänger abzufangen. Dieses Prinzip macht QKD zu einer physikalisch sicheren Methode für den Informationsaustausch. Die tatsächliche Sicherheit hängt jedoch immer von der konkreten Hardware-Implementierung ab. Daher wird an der Entwicklung von Standardtests zur Bewertung von QKD-Hardware gearbeitet.

len Rand sind Autorinnen und Autoren mit chinesischer Organisationszugehörigkeit an einem deutlich größeren Anteil neuer Publikationen beteiligt als ihre Kolleginnen und Kollegen mit EU- oder US-amerikanischer Organisationszugehörigkeit (vgl. Abbildung B 2-7). Der Anteil von Publikationen mit deutscher Beteiligung ist im Zeitverlauf mit 7 bis 13 Prozent relativ konstant geblieben. Die Rolle Chinas im Bereich Quantenkommunikation wird bei der Betrachtung der Forschungseinrichtungen mit der weltweit höchsten Anzahl an Publikationen unterstrichen. Von den Top-10-Forschungseinrichtungen stammen sieben aus China, die übrigen aus den USA, der Schweiz und Kanada.²⁷²

Bei den transnationalen Patentanmeldungen der letzten zwei Jahrzehnte nehmen US-amerikanische Organisationen eine führende Position ein. Von den weltweit insgesamt 526 transnationalen Patentanmeldungen zwischen 2000 und 2021 entfallen 135 auf die USA. Darauf folgen China (98), die EU (94, davon 40 aus Deutschland), Vereinigtes Königreich (45) und Japan (38).²⁷³ Eine Analyse von Unternehmensdatenbanken identifizierte weltweit 86 Unternehmen, die beabsichtigen, Quantenkommunikation zu kommerzialisieren, darunter 17 Start-ups. Über die Hälfte dieser Unternehmen stammt aus China (43 Prozent) und den USA (16 Prozent). Der Anteil der EU liegt hingegen bei nur 11 Prozent, davon 2 Prozentpunkte aus Deutschland.

B 2-4 Quantensensorik

Technologien im Bereich Quantensensorik nutzen zur Messung physikalischer Größen die hohe Empfindlichkeit von Quantensystemen gegenüber Einflüssen aus ihrer direkten Umgebung (vgl. Box B 2-1).²⁷⁴ So können Umgebungsvariablen wie elektrische und magnetische Felder, Temperatur, Druck oder Beschleunigung in einer bisher unerreichbaren Präzision bestimmt werden. Während einige auf Quanteneffekten beruhende Sensortechnologien bereits fest in verschiedenen Märkten etabliert und aus dem Alltag kaum noch wegzudenken sind, befinden sich neue Quantentechnologien, die eine nochmals höhere Messpräzision ermöglichen, häufig noch in einer frühen Entwicklungsphase.

Unter den heute etablierten Technologien der Quantensensorik sind Magnetfeldsensoren, gemessen am Marktvolumen, besonders relevant. Sie spielen eine wichtige Rolle in der medizinischen Diag-

nostik, etwa bei der Messung feiner magnetischer Felder des Herzens oder Gehirns durch Magnetresonanztomografen (MRT). In Form von Atomuhren, die präzise Zeitsignale zur Positionsbestimmung senden, liefert die Quantensensorik darüber hinaus den Grundstein für die heutige satellitengestützte Navigation (z. B. GPS). Zudem kommen quantenbasierte Technologien in der Halbleiterproduktion zum Einsatz.

Messen mit hoher Präzision durch neuartige Quantensensoren möglich

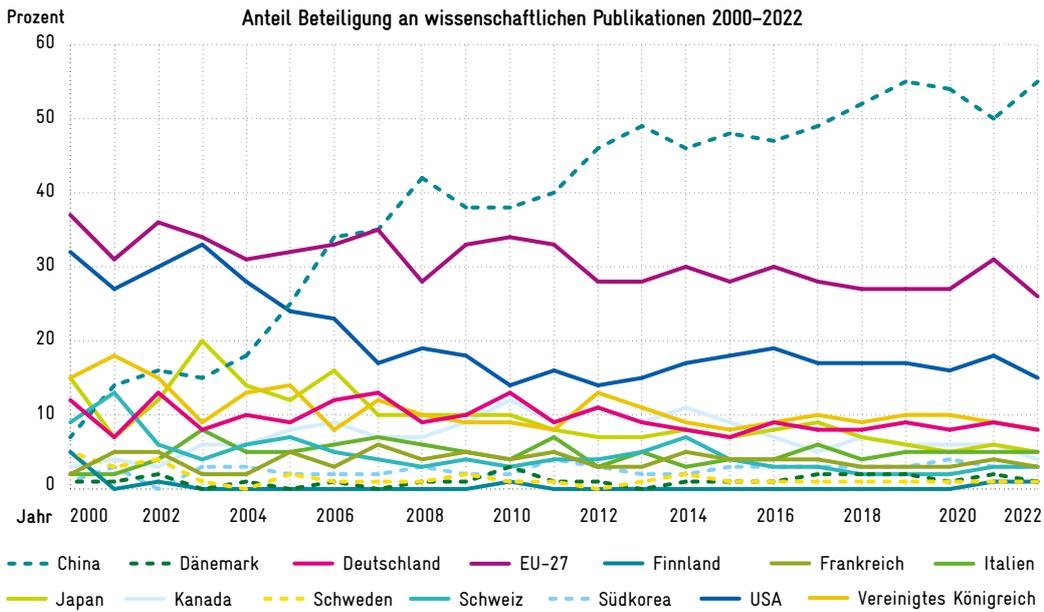
Insbesondere in Anwendungsfeldern mit sehr hohen Präzisionsanforderungen können neuartige Quantensensoren eine zunehmend bedeutende Rolle einnehmen. So lassen sich beispielsweise die Einsatzmöglichkeiten bestehender Technologien durch neuartige Magnetfeldsensoren deutlich erweitern, da sie genauere Messungen ermöglichen oder keine aufwändige Kühlung mehr benötigen. Zudem kann die Entwicklung optischer Atomuhren, die eine 100-fach höhere Genauigkeit als etablierte Atomuhren bieten, die satellitengestützte Standortbestimmung künftig bis auf wenige Zentimeter oder gar Millimeter präzisieren. Darüber hinaus kann die Störanfälligkeit satellitengestützter Systeme durch neuartige Magnetfeldsensoren umgangen und damit die vollautonome Navigation ermöglicht werden. Quantenverfahren mit verschränkten Photonen versprechen Fortschritte in der medizinischen Diagnostik, z. B. bei der Früherkennung von Krebs (vgl. Box B 2-1). So ermöglichen Verfahren wie das Ghost Imaging hochauflösende Bilder bei schwacher Beleuchtung, etwa für die Bildgebung auf zellulärer Ebene. Diese Methoden minimieren die Strahlenbelastung und erlauben detaillierte, lang andauernde Messungen lichtempfindlicher Zellen, ohne diese zu beschädigen.²⁷⁵

Quantensensoren sind in der Regel Investitionsgüter, die auf B2B-Märkten gehandelt werden und große Wertschöpfungspotenziale für Anwendungen in den nachgelagerten Märkten versprechen. Die Entwicklung neuer Technologien muss sich deshalb eng an den jeweiligen Anwenderbedarfen ausrichten. Es wird erwartet, dass Fortschritte in der Quantensensorik eher durch kontinuierliche Verbesserungen als durch radikale Technologiesprünge erfolgen werden. Besondere Herausforderungen bestehen derzeit darin, die Anwenderfreundlichkeit, Miniaturisierung und Robustheit zu verbessern.

Abb. B2-7 Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantenkommunikation

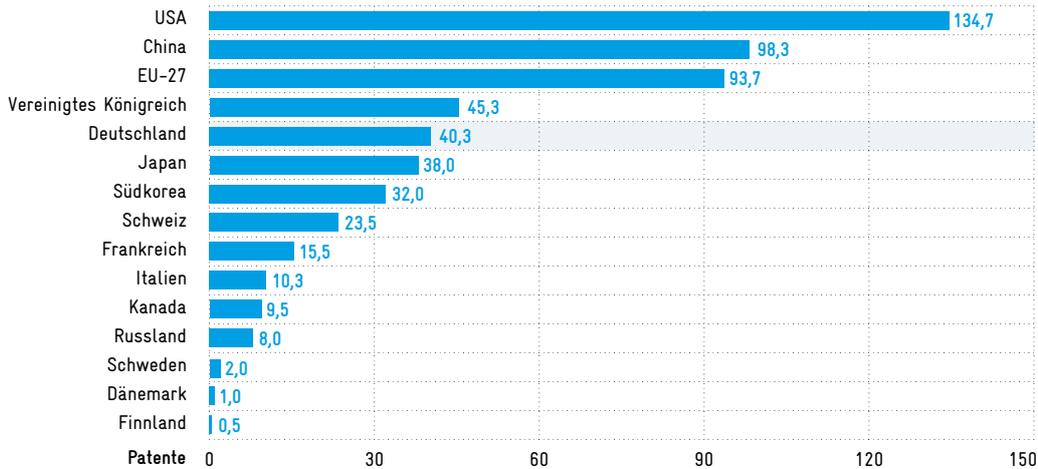


[Download der Abbildung und Daten](#)



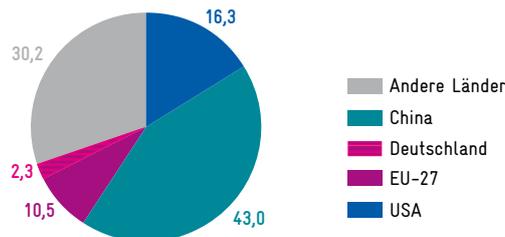
Lesebeispiel: Etwa 8 Prozent der im Jahr 2020 veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantenkommunikation entstanden unter Beteiligung von Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit.
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).

Anzahl transnationaler Patentanmeldungen 2000-2021



Lesebeispiel: Im Zeitraum 2000-2021 entfielen 40 transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantenkommunikation auf Erfinderrinnen und Erfinder aus Deutschland.
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen. Fraktionierte Zählweise.

Anteil aktiver Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantenkommunikation im Jahr 2024



Lesebeispiel: Im Jahr 2024 waren 10,5 Prozent der identifizierten Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantenkommunikation in der EU ansässig.
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).
© EFI - Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

USA und China bei Publikationen und Patenten dominant

Bei wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantensensorik haben chinesische Institutionen im Zeitraum von 2000 bis 2022 an Bedeutung gewonnen und waren im Jahr 2022 an 42 Prozent der veröffentlichten Publikationen beteiligt (vgl. Abbildung B 2-8). Deutschland belegt recht kontinuierlich Rang drei hinter China und den USA. In der Liste der Top-10-Forschungseinrichtungen mit der weltweit höchsten Anzahl an Publikationen stammen fünf aus China, zwei aus den USA und eine aus Deutschland.²⁷⁶

Zwischen 2000 und 2021 wurden 431 transnationale Patente in der Quantensensorik angemeldet, wobei die USA, China, Japan und Südkorea führend waren (vgl. Abbildung B 2-8). Mit deutlichem Abstand folgen Deutschland und Frankreich. Die weitaus größte Anzahl der Patentanmeldungen sowie die drei patentaktivsten Organisationen stammen aus den USA. Auf Basis von Unternehmensdatenbanken können weltweit nur 22 Unternehmen identifiziert werden, die einen expliziten Fokus auf Quantensensorik haben.²⁷⁷ Die Anteile der USA (36 Prozent) und Chinas (32 Prozent) fallen hierbei höher aus als die der EU (18 Prozent) (vgl. Abbildung B 2-8).²⁷⁸ Es ist davon auszugehen, dass eine weitaus größere Zahl von Unternehmen, darunter auch Großunternehmen, Quantensensorik in ihre Anwendungen integrieren.

B 2-5 EU, USA und China: Quantenstrategien im Vergleich

Die Analysen zu Publikationen und Patenten zeigen, dass der Wettlauf um die Führungsrolle in der Quantenforschung insbesondere zwischen den USA, China und der EU stattfindet. Alle drei Regionen setzen strategische Konzepte und gezielte Förderprogramme zur Weiterentwicklung von Quantentechnologien ein, die darauf abzielen, Quanten-Ökosysteme zu schaffen, in denen F&I-Aktivitäten im Bereich der Quantentechnologien koordiniert, eine leistungsfähige Infrastruktur aufgebaut und finanzielle Mittel bereitgestellt werden.

Die Förderung von FuE stellt ein gemeinsames Element dar. Gleichzeitig unterscheiden sich die Strategien in ihrer institutionellen Ausgestaltung und im Umgang mit zentralen Fragen der F&I-Politik.

In den USA wird F&I stark von der DARPA und den großen Technologiekonzernen vorangetrieben. In China wird überwiegend staatlich gesteuert. In der EU stehen die Koordination der nationalen Programme und die Vernetzung zentraler F&I-Akteure im Vordergrund.²⁷⁹

Institutioneller Rahmen unterschiedlich ausgestaltet

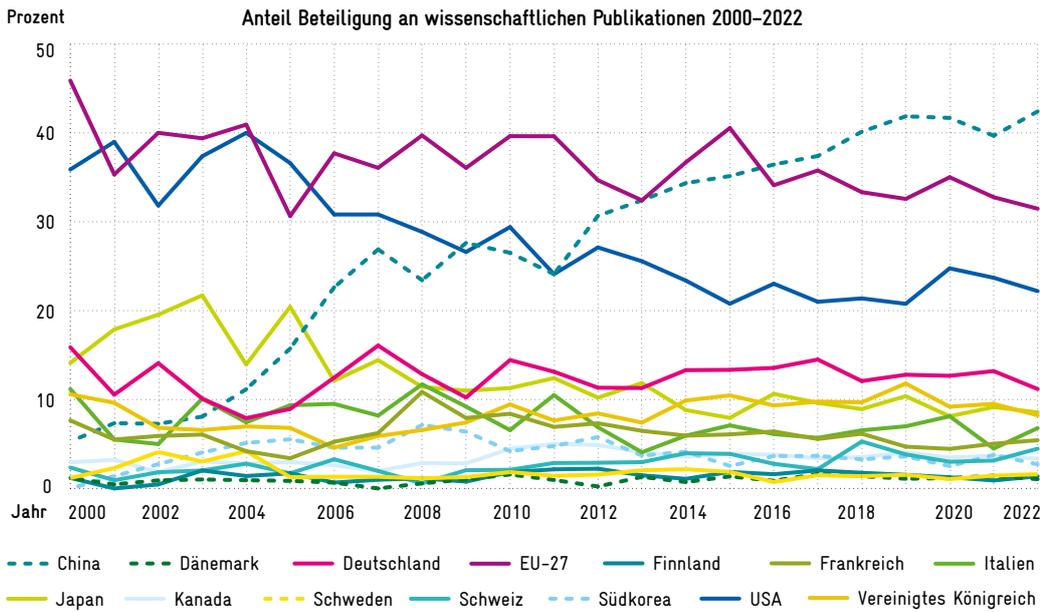
In den USA ist F&I-Politik traditionell missions- und themenorientiert aufgestellt und es gibt kein eigenständiges Forschungsministerium. Schlüsselakteure der Ende 2018 gestarteten und von der National Quantum Initiative (NQI) koordinierten Strategie sind das Energieministerium, das Verteidigungsministerium sowie ihm zugehörige Behörden wie die DARPA.²⁸⁰ Außerdem spielen in den USA große Technologiekonzerne und private Investoren bei der Weiterentwicklung des Quantencomputing eine wichtige Rolle.

China verfolgt mit der „Vision 2035“ eine umfassende Industriestrategie, die durch Fünfjahrespläne und Programme wie „Made in China 2025“ unterstützt wird. Quantentechnologien, insbesondere das Quantencomputing und die Quantenkommunikation, sind seit 15 Jahren ein zentraler Bestandteil dieser Strategie, die das Ziel verfolgt, bis 2035 eine Führungsrolle in wichtigen Technologien zu erreichen. Die zentralstaatliche Planung ist strukturell verankert, wobei neben dem Ministerium für Industrie und Informationstechnik (MIIT) und dem Ministerium für Wissenschaft und Technologie (MoST) auch die Chinesische Akademie der Wissenschaften (CAS) als höchstes Beratungsgremium für Wissenschaft und Technologie eine Schlüsselrolle einnimmt. Als größte Forschungsorganisation der Welt, direkt dem Staatsrat unterstellt, koordiniert die CAS bedeutende Initiativen wie Satellitenprojekte und den Aufbau von Quantenkommunikations-Infrastrukturen. Im Jahr 2017 wurde außerdem ein „Nationales Labor für Quanteninformation“ eingerichtet, das Expertenberichten zufolge mit großen finanziellen Mitteln ausgestattet wurde.²⁸¹

Die EU hat 2018 die Quantum-Flagship-Initiative gestartet, einen Zehnjahresplan zur Förderung von Quantentechnologien unter der Leitung der Europäischen Kommission. Der Fokus liegt auf der Koordination nationaler Programme, der Vernetzung zentraler Akteure und der Förderung strategischer Partnerschaften.²⁸² Innerhalb der Europäischen

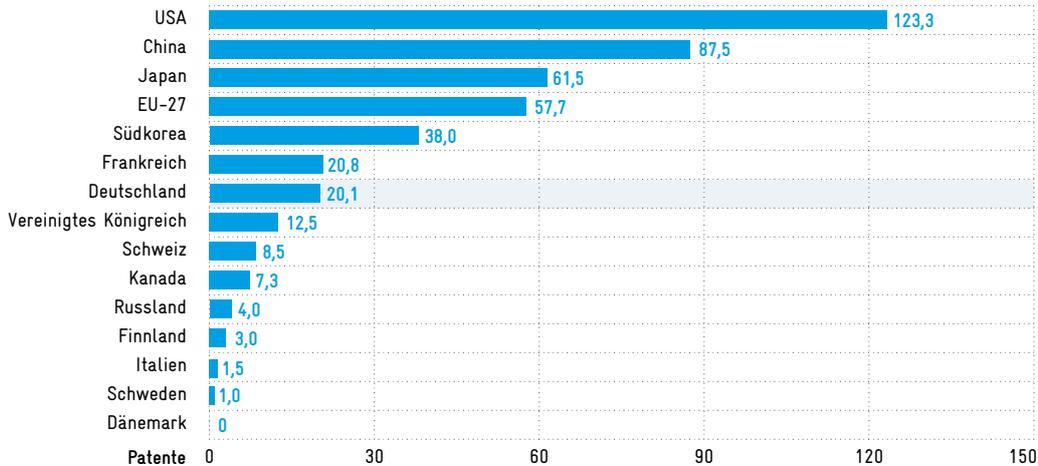
Abb. B2-8 Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantensensorik

 [Download der Abbildung und Daten](#)



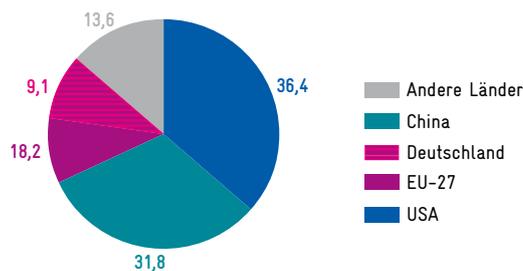
Lesebeispiel: Etwa 13 Prozent der im Jahr 2020 veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantensensorik entstanden unter Beteiligung von Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit.
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).

Anzahl transnationaler Patentanmeldungen 2000–2021



Lesebeispiel: Im Zeitraum 2000–2021 entfielen 20 transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantensensorik auf Erfinderinnen und Erfinder aus Deutschland.
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen. Fraktionierte Zählweise.

Anteil aktiver Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantensensorik im Jahr 2024



Lesebeispiel: Im Jahr 2024 waren 18,2 Prozent der identifizierten Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantensensorik in der EU ansässig.
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025)
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Kommission waren bisher insbesondere die Generaldirektion Kommunikationsnetze, Inhalte und Technologien (DG CONNECT) für digitale Strategien und die Generaldirektion Forschung und Innovation (DG RTD) für die Förderung von Projekten über Horizon Europe zuständig. Der Europäische Forschungsrat (ERC) unterstützt zudem die Grundlagenforschung im Bereich Quantentechnologien.

Technologietransfer in allen Strategien berücksichtigt

Der Technologietransfer, d. h. die Überführung wissenschaftlicher Erkenntnisse in die ökonomische Anwendung, wird in den USA durch öffentlich-private Kooperationen beschleunigt. Das Energieministerium arbeitet mit Forschungseinrichtungen und der Industrie zusammen, um fünf Forschungszentren für Quanteninformationswissenschaften (QIS-Zentren) einzurichten, die Forschung, Prototypentwicklung und Kommerzialisierung fördern.

In China wird der Technologietransfer staatlich gefördert, indem Forschungseinrichtungen und Unternehmen mit staatlicher Unterstützung vernetzt werden, um beispielsweise das Quantencomputing zur Marktreife zu bringen. Über die Provinzregierungen werden lokale Industriecluster aufgebaut, um Investitionen und Fachkräfte anzuziehen.²⁸³

In der EU unterstützt der Europäische Innovationsrat (EIC) Innovationen und Start-ups im Bereich der Quantentechnologien durch Förderprogramme und Finanzierung. Die Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU (DG GROW) fördert die industrielle Basis und Wettbewerbsfähigkeit der EU, einschließlich der Unterstützung von KMU und der Förderung von Innovationen im Bereich der Quantentechnologien. Die Europäische Investitionsbank (EIB) stellt zudem Kapital für Start-ups und KMU bereit, um Projekte im Bereich der Quantentechnologien zu finanzieren.

EU bei zivil-militärischer FuE-Zusammenarbeit zurückhaltend

Das Zusammenwirken von ziviler und militärischer FuE kann Effizienzsteigerungen bewirken, indem militärische FuE-Aufträge an Unternehmen weitere privatwirtschaftliche FuE-Aufwendungen auslösen, Wissen und Erkenntnisse aus dem militärischen Sektor im zivilen Sektor übernommen wer-

den (Spillover) oder Technologien sowohl zivil als auch militärisch angewendet werden können (Dual Use).²⁸⁴ Quantentechnologien sind aufgrund ihrer potenziellen Anwendungsbreite und ihrer sicherheitspolitischen Bedeutung, beispielsweise in der Quantenkommunikation, für zivile und militärische Bereiche relevant. In der Quantenforschung können deshalb Effizienzsteigerungen durch Größen- und Verbundeffekte in FuE-Projekten besonders zum Tragen kommen.

In den Strategien und Förderinitiativen der USA und Chinas ist dieser Ansatz klar verankert. In den USA wird die NQI regelmäßig durch den National Defense Authorization Act ergänzt, der u. a. Finanzierungsschwerpunkte für die Quantenforschung mit Blick auf militärische Interessen festlegt und die Koordination relevanter Einrichtungen und Programme sicherstellt.²⁸⁵ China hat das Zusammenwirken militärischer und ziviler FuE, auch bei der Quantenforschung, explizit in den 13. und 14. Fünfjahresplan aufgenommen, mit dem Ziel, nationale Sicherheit und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit gleichermaßen zu stärken. Dies soll durch gemeinsame Nutzung von Ressourcen, den Austausch von Forschungsergebnissen und deren Anwendung in beiden Bereichen erreicht werden.²⁸⁶

Die EU zeigt sich diesbezüglich bisher zurückhaltend. Militärische und zivile FuE sind in den Förderprogrammen strikt getrennt und ein Zusammenwirken dieser Bereiche ist weder in der Quantum-Flagship-Initiative noch im breiter ausgerichteten Horizon-Europe-Programm beschrieben.²⁸⁷ Allerdings werden auch auf europäischer Ebene der strategische Nutzen sowie mögliche Szenarien zur Förderung von Technologien mit Dual-Use-Potenzial, darunter Quantentechnologien, diskutiert.²⁸⁸

Standardisierungsinitiativen für Fortschritt zentral

Standardisierung ist auch in Quantentechnologien eine zentrale Voraussetzung für den Fortschritt. Standardisierte Leistungstests und Benchmarking-Methoden ermöglichen den systematischen Vergleich von FuE-Ergebnissen.²⁸⁹ Zudem fördern Normen die Austauschbarkeit und Interoperabilität technischer Komponenten wie Quantenmodule sowie die flexible Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette durch einheitliche Entwicklungsumgebungen und Software.²⁹⁰

In den USA arbeitet das nationale Standardisierungsinstitut (NIST) an neuen Standards für Kryptografie. Kürzlich veröffentlichte es neue Verschlüsselungsstandards unter Beteiligung deutscher Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.²⁹¹ In China zielt der im April 2024 vorgestellte Aktionsplan 2024–2027 darauf ab, die Entwicklung von Standards im Bereich Quantentechnologien zu beschleunigen. In der EU koordiniert ein technisches Komitee unter deutschem Sekretariat und Ko-Vorsitz die Entwicklung relevanter Standards für Quantentechnologien und deren Abstimmung mit internationalen Organisationen.²⁹²

B 2-6 Deutschland: nationales Handlungskonzept und bestehende Herausforderungen

Mit ihrem Handlungskonzept Quantentechnologien hat die Bundesregierung einen Förderrahmen für den Zeitraum 2023 bis 2026 geschaffen und eine Vision bis 2036 formuliert.²⁹³ Dafür stehen über vier Jahre drei Milliarden Euro zur Verfügung.²⁹⁴ Tabelle B 2-9 zeigt, dass das deutsche Konzept im internationalen Vergleich finanziell sehr gut ausgestattet ist.²⁹⁵

Das Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung ist technologieoffen ausgerichtet, d. h. innerhalb der Quantentechnologien gelten konkurrierende Lösungen für konkrete Probleme als grundsätzlich förderwürdig. Der Förderansatz setzt auf Verbundprojekte und staatliche Ko-Finanzierung, wobei öffentliche Aufträge private Investitionen stimulieren sollen. Ergänzend dazu haben Bundesländer eigene Förderprogramme entwickelt, aus denen sich regionale F&I-Cluster mit internationalem Renommee herausgebildet haben, darunter das Munich Quantum Valley (80 Millionen Euro, Bayern) und QuantumBW (115 Millionen Euro, Baden-Württemberg). Weitere Programme sind die Berlin Quantum Alliance, Hamburg Quantum Innovation Capital und Quantum Valley Lower Saxony.

Zukünftige Innovationen in Quantentechnologien erfordern erhebliche Anfangsinvestitionen in Grundlagenforschung und die dafür notwendige Infrastruktur, während die technologischen Unsicherheiten hoch sind und viele Anwendungen erst in einigen Jahren realisierbar sein werden.²⁹⁶ Dies kann zu Unterinvestition der privatwirtschaftlichen Akteure führen, obwohl Quantentechnologien erhebliche gesellschaftliche und gesamtwirtschaftliche Vorteile bieten. Der Planungshorizont der

Tab. B 2-9 Eckdaten ausgewählter Quantenstrategien

| Land | Strategie | Zentrale Initiativen | Budget | Laufzeit |
|------------------------|--|--|--|-----------------------------------|
| Deutschland | Handlungskonzept Quantentechnologie | Fachprogramm Quantensysteme; Fachprogramm IT-Sicherheit; Quantencomputing Initiative | 3 Mrd. Euro | 2023–2026 |
| EU | Quantum Flagship | EuroHPC; EuroQCI | 1 Mrd. Euro | 2018–2028 |
| Frankreich | Quantum Plan – France National Quantum Strategy | – | 1,8 Mrd. Euro | 2021–2025 |
| Vereinigtes Königreich | National Quantum Strategy (NQS) | National Quantum; Technologies Programme (NQTP) | NQS: £2,5 Mrd. (ca. 2,97 Mrd. Euro); NQTP: £1 Mrd. | NQS: 2023–2033 NQTP: 2014–2024 |
| China | Made in China 2025; 14th Five-year-Plan | National Key R&D Projects; National Laboratory of Quantum Information | Geschätzt 15 Mrd. Euro | Bis 2025 2021–2025 |
| Japan | Quantum Technology Innovation Strategy; Vision of Quantum Future Society | Moonshot R&D Program; Quantum Innovation Hubs | 259 Mrd. Yen (ca. 1,5 Mrd. Euro) | 2018–2023 |
| Südkorea | Korea's National Quantum Strategy | – | 3 Mrd. Won (ca. 2 Mrd. Euro) | 2023–2035 |
| USA | National Quantum Initiative Act | – | 1,2 Mrd. USD (ca. 1,1 Mrd. Euro) | 2019–2023 |
| Kanada | Canada's National Quantum Strategy | – | 360 Mio. CAD (ca. 240,9 Mio. Euro) | 2021–2028 |

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025)
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.



[Download der Abbildung und Daten](#)

Bundesregierung bis 2026 ist aus Sicht der Akteure zu kurz, um langfristige Investitionen in FuE im Bereich der Quantentechnologien zu begründen. Angesichts der langen Entwicklungszyklen der Projekte bedarf es einer vorausschauenden, langfristigen Strategie.

Bedarf an Vernetzung zwischen Akteuren hoch

Innerhalb der drei Technologiefelder werden verschiedene technologische Ansätze parallel erforscht und hinsichtlich ihrer Eignung für spezifische Anwendungen verglichen. Ein Beispiel ist die Herstellung von Qubits im Quantencomputing, die entweder auf atomischen oder auf festkörperbasierten Hardware-Plattformen erfolgen kann. Zugleich bestehen enge Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Grundlagenforschung, angewandter Forschung und Anwendungsentwicklung. So ist beispielsweise ein fundiertes Verständnis der Nutzerbedarfe entscheidend, um die Weiterentwicklung von Hardware und Software gezielt voranzutreiben. Aufgrund dieser Interdependenzen ist eine Vernetzung der FuE-Aktivitäten und ein intensiver Austausch zwischen den Akteuren innerhalb eines Technologiefelds erforderlich.²⁹⁷

Neben der Vernetzung innerhalb eines Technologiefeldes ist auch die Vernetzung zwischen den verschiedenen Feldern entscheidend, da Fortschritte in einem Feld wie der Quantensensorik auch andere Felder wie das Quantencomputing vorantreiben können. Viele Forschungsinfrastrukturen basieren auf gemeinsamen Basistechnologien, etwa Lasertechnologie, rauscharmer Mikroelektronik oder Tieftemperaturtechnik. Eine gute Vernetzung ermöglicht es, Vorteile einzelner Technologien schneller zu identifizieren und zu nutzen. Langfristig kann durch die Integration der drei Technologiefelder Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik ein globales Quantennetzwerk (Quantenweb) entstehen, in dem Quantentechnologien abhörsicher miteinander vernetzt sind.²⁹⁸ Dazu ist die frühzeitige Entwicklung von Normen und Standards erforderlich, die allerdings eine enge Zusammenarbeit zwischen Akteuren in allen Technologiefeldern voraussetzt.

Um ineffiziente Parallelstrukturen zu vermeiden und Anwendungsoptionen frühzeitig in die Forschung zu integrieren, sind ein intensiver Austausch zwischen den Akteuren innerhalb eines Techno-

logiefelds sowie eine starke Vernetzung zwischen Technologiefeldern unerlässlich. Regionale F&I-Cluster fördern durch geografische Konzentration die Vernetzung von Akteuren, erleichtern Wissens-Spillover und stärken damit die FuE-Aktivitäten.²⁹⁹

Technologische Souveränität bei Quantentechnologien gefährdet

Technologische Abhängigkeiten von Drittstaaten sind vor dem Hintergrund unsicherer geopolitischer Entwicklungen für Deutschland ein Risiko. Als Reaktion darauf hat die deutsche F&I-Politik verstärkt das Ziel der technologischen Souveränität in den Fokus gerückt. Langfristige technologische Souveränität erfordert vorausschauende strategische Konzepte, die darauf abzielen, die technologische Entwicklung und Standardisierung selbst voranzutreiben oder sicherzustellen, dass Technologien auch langfristig ohne einseitige Abhängigkeiten von anderen Wirtschaftsräumen bezogen werden können.³⁰⁰

Quantentechnologien gehören zweifellos zu den Zukunftstechnologien, bei denen die Sicherstellung technologischer Souveränität von zentraler Bedeutung ist. Dazu zählt auch, die Nutzung von Quantentechnologien zu beherrschen, indem die notwendige Wissensbasis sowie die erforderlichen Kompetenzen in Deutschland ausgebaut und gehalten werden. Gleichzeitig muss gewährleistet werden, dass Quantentechnologien langfristig verfügbar bleiben – entweder durch eine eigenständige Produktion innerhalb der EU oder durch eine diversifizierte Beschaffungsstrategie im internationalen Handel.³⁰¹ Ein weiterer Ansatz zur Vermeidung einseitiger Abhängigkeiten ist der strategische Aufbau von Alleinstellungsmerkmalen. Diese könnten perspektivisch von anderen Akteuren benötigt werden und Deutschland bei internationalen Verhandlungen in eine stärkere Verhandlungsposition bringen („Bargaining Chips“).

Quantencomputing mit Sicherheitsrisiken verbunden

Die Prognosen, wann ein universell einsetzbarer Quantencomputer für praktische Anwendungen verfügbar sein wird, variieren erheblich.³⁰² Dennoch herrscht unter Expertinnen und Experten Einigkeit, dass zukünftige Quantencomputer eine Rechenleistung erreichen werden, die das Brechen aktueller Verschlüsselungsstandards in der Kommunikation und Datensicherheit ermöglicht. Dies stellt eine

erhebliche Gefahr für die Sicherheitsarchitekturen in militärischer, politischer und ziviler Kommunikation dar. Anpassungen der Sicherheitsstandards sind daher unverzichtbar, um Daten- und Kommunikationssicherheit langfristig zu gewährleisten, insbesondere bei kritischen Infrastrukturen. Dem Staat kommt dabei eine zentrale Rolle zu.

Besonders kritisch ist die Gefahr von sogenannten „Harvest now, decrypt later“-Attacken. Dabei werden sensible Daten abgefangen, über Jahre oder Jahrzehnte gespeichert und später mit ausreichender Rechenleistung entschlüsselt. Angesichts der langen Übergangszeit bis zur vollständigen Einführung neuer Verschlüsselungsmethoden sowie der Tatsache, dass diese Angriffe bereits heute ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen, ist der Handlungsbedarf hier zeitkritisch.

Neben sicherheitspolitischen Gefahren, die sich aus der perspektivischen Rechenleistung von Quantencomputern ergeben, sind Risiken absehbar, die sich aus einseitigen Abhängigkeiten bei der Bereitstellung von Hardware ergeben können. So schafft beispielsweise ein Quantencomputer, der von einem außereuropäischen Unternehmen geliefert und betrieben wird, nicht nur Abhängigkeiten hinsichtlich der Verfügbarkeit der Infrastruktur, sondern ist auch für militärische Anwendungen mit sensiblen Daten und Fragen des geistigen Eigentums an Software und Daten problematisch.³⁰³

Anwendung durch Kompetenz- und Fachkräftemangel limitiert

Im Bereich der Quantentechnologien besteht die Gefahr, dass FuE-Aktivitäten perspektivisch durch einen Mangel an hochqualifizierten Absolventinnen und Absolventen aus den MINT-Disziplinen gebremst werden. Laut Expertinnen und Experten könnte zudem das begrenzte Fachwissen der derzeitigen Arbeitskräfte die Einführung und Verbreitung anwendungsreifer Quantentechnologien erheblich verzögern.³⁰⁴ Deutschlands (Weiter-)Bildungsangebot im Bereich Quantentechnologien ist im internationalen Vergleich aktuell gut ausgebaut. Im Jahr 2021 haben sechs deutsche Universitäten einen Masterstudiengang mit spezifischem Fokus auf Quantentechnologien angeboten – mehr gab es nur im Vereinigten Königreich (8) und in den USA (16).³⁰⁵

Inhalte zu Quantenphysik und Quantentechnologien sind in Deutschland weitgehend in die Lehrangebote

von Schulen und Hochschulen integriert.³⁰⁶ Ergänzend wurden gezielte Fördermaßnahmen gestartet³⁰⁷, um im Bereich Quantentechnologien Fachwissen zu entwickeln und Nachwuchskräfte auszubilden, beispielsweise durch das Nachwuchsförderprogramm Quantum Futur³⁰⁸ oder die Einführung berufs begleitender Studiengänge.³⁰⁹ Allerdings bleibt ungewiss, ob diese Maßnahmen ausreichend sind, um den spezifischen Personalbedarf langfristig zu decken.³¹⁰

Kommerzielle Vermarktung von Quantencomputing herausfordernd

Ein leistungsfähiges Innovationsökosystem zeichnet sich u. a. dadurch aus, dass es Erkenntnisse aus Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung in innovative marktfähige Produkte überführt.³¹¹ Abbildung B 2-10 zeigt, dass Forschende aus der EU mit 12.121 Publikationen in den vergangenen zwei Jahrzehnten an einem großen Teil der weltweiten Publikationen zu Quantencomputing beteiligt waren (grüne Balken).³¹² Allerdings werden nur knapp 10 Prozent der Publikationen mit EU-Beteiligung bereits in Patenten zitiert, die bis Ende 2023 erteilt wurden, während dieser Wert bei Publikationen mit US-Beteiligung mit fast 20 Prozent doppelt so hoch ist (blaue Balken). In China liegt der Anteil mit 5,5 Prozent weitaus niedriger.³¹³

Bei der Erklärung der höheren Patentrelevanz von US-Publikationen gegenüber EU-Publikationen könnten schwächere Netzwerke zwischen Forschung und Anwendung in der EU, Unterschiede in der Art der Forschung, eine geringere Karriere durchlässigkeit sowie höhere bürokratische Hürden oder geringere Anreize für Patentanmeldungen eine Rolle spielen.

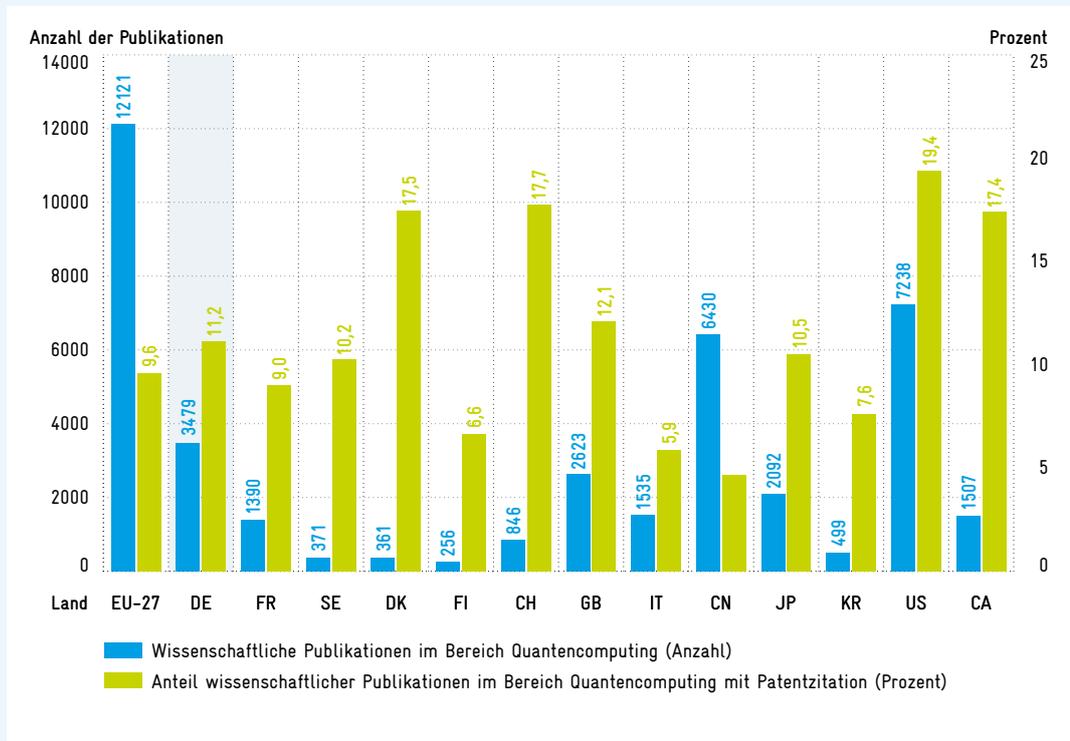
Als Systemintegratoren vereinen große Technologieunternehmen den gesamten Prozess von FuE bis hin zur Kommerzialisierung unter einem Dach. Dies erleichtert ihnen den Transfer neuer Ideen in die Anwendung. In den USA investieren beispielsweise Google und IBM über ihre internen Strukturen nicht nur große Summen in die Grundlagenforschung, sondern erforschen auch systematisch Anwendungspotenziale und lassen Innovationen patentieren. In Deutschland hingegen werden die verschiedenen Schritte im F&I-Prozess von unterschiedlichen Akteuren durchgeführt.

Um sicherzustellen, dass in Deutschland und der EU hervorragende Forschung zukünftig nicht ohne

Abb. B2-10 Anzahl Beteiligung an wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantencomputing 2000–2022 und Anteil zitiert in Patenten bis einschließlich 2023



[Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit waren zwischen 2000 und 2022 an 3.479 Publikationen im Bereich Quantencomputing beteiligt. Bis Ende 2023 wurden 11,2 Prozent dieser Publikationen in mindestens einem Patent zitiert.
Quelle: RelianceOnScience/Scopus/OpenAlex, eigene Berechnungen.
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

konkreten Beitrag zur Problemlösung und kommerziellen Vermarktung erfolgt, sollten Start-ups im Quantencomputing eine Schlüsselrolle spielen. Start-ups entwickeln innovative Anwendungen und bringen sie auf den Markt. Häufig entstehen sie als Ausgründungen aus Forschungsinstitutionen und fungieren durch ihre Nähe zu Forschungseinrichtungen sowie ihr spezialisiertes Wissen als wichtiges Bindeglied zwischen Forschung und Anwendung. Start-ups stehen in Deutschland allerdings sowohl in der Gründungs- als auch in der Wachstumsphase vor strukturellen Herausforderungen. Insbesondere der im Vergleich zu den USA begrenzte Zugang zu Risikokapital stellt ein großes Problem für Start-ups dar, weil sie sowohl einen hohen Kapitalbedarf als auch ein hohes Risiko des Scheiterns aufweisen. Zudem ist der Kreis möglicher Investoren begrenzt, da sie spezifisches Fachwissen benötigen, um das Potenzial von Quantenprojekten einschätzen zu können. Bislang fallen private Investitionen in deutsche Quantencomputing-Start-ups im Vergleich zu den staatlichen Fördersummen sehr gering aus.³¹⁴ Fehlende Anschlussfinanzierungen, insbesondere

zwischen der frühen Seed-Phase (z. B. durch Gründungskapital, Förderprogramme oder Angel-Investoren) und späteren Wachstumsphasen, verhindern häufig, dass sich Start-ups in Deutschland gut entwickeln können.

B2-7 Handlungsempfehlungen

Quantentechnologien sind potenzielle zukünftige Schlüsseltechnologien, deren Erforschung und Entwicklung hohe Kosten und Unsicherheiten mit sich bringen. Damit deutsche Unternehmen im globalen Wettbewerb mit China und den USA konkurrenzfähig bleiben und Deutschland langfristig technologisch souverän und auf sicherheitspolitische Bedrohungen gut vorbereitet ist, sollte die Bundesregierung zeitnah eine umfassende Quantenstrategie auf den Weg bringen und dabei eine bedeutende Rolle beim Aufbau eines leistungsfähigen europäischen Quanten-Ökosystems einnehmen. Hierzu empfiehlt die Expertenkommission:

Quantenstrategie national aufsetzen und europäisch verankern

- Die Expertenkommission ist der Ansicht, dass für die Entwicklung eines kohärenten Strategierahmens für aktuelle und zukünftige Schlüsseltechnologien wie etwa Quantentechnologien eine geeignete Governance dringend erforderlich ist. Demnach sollten die übergreifende Koordination und strategische Steuerung zentral im Bundeskanzleramt angesiedelt sein.³¹⁵
- Angesichts begrenzter Ressourcen und der internationalen Konkurrenz durch die USA und China ist eine isolierte nationale Strategie ineffizient. Stattdessen sollten nationale Strategien innerhalb der EU stärker abgestimmt, Synergien genutzt und gemeinsame Ressourcen mobilisiert werden, um eine wettbewerbsfähige Position der Unternehmen der EU im globalen F&I-Wettbewerb zu sichern. Das Ziel sollte ein leistungsfähiges europäisches Quanten-Ökosystem sein.
- Deutschland und die EU sollten sich frühzeitig in die Entwicklung einheitlicher Standards zur Sicherheitsbewertung und Zertifizierung einbringen und eine führende Rolle in den entsprechenden Gremien übernehmen. Es sollte auf international und weltweit gültige Standards hingearbeitet werden, die eine Repräsentation der deutschen und europäischen Interessen sicherstellen. Eine Kooperation mit Institutionen wie dem US-amerikanischen NIST könnte ebenfalls in Betracht gezogen werden.
- Deutsche und europäische Quantenstrategien sollten darauf abzielen, gute Voraussetzungen für ein Quantenweb zu schaffen, das Quantentechnologien miteinander verbindet. Um dies zu erreichen, müssen die verschiedenen Quantentechnologien von Anfang an integriert gedacht und ihre Kompatibilität, z. B. auf Software- und Sprachebene, sichergestellt werden.
- Da es weder sinnvoll noch realistisch ist, dass langfristig alle Rohstoffe und Komponenten für das Quantencomputing aus Deutschland oder der EU kommen, sollten frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um einseitige Abhängigkeiten von einzelnen außereuropäi-

schen Unternehmen oder Regionen zu vermeiden. Während Unternehmen hierfür in erster Linie ihre Lieferketten analysieren, Lieferanten diversifizieren und strategische „Bargaining Chips“ entwickeln sollten, liegt es in der Verantwortung der politischen Entscheidungsträger in Deutschland und der EU, eine strategische Außenwirtschaftspolitik zu betreiben.

Handlungskonzept aktualisieren und an die Technologiefelder anpassen

- Der Förderrahmen des aktuellen Handlungskonzepts Quantentechnologien der Bundesregierung endet 2026. Um langfristige Investitionen in laufende und zukunftsweisende Projekte zu begründen, sollte die Bundesregierung dringend ein ambitioniertes Folgekonzept entwickeln und zügig in die Umsetzung bringen. Die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien unterscheiden sich in ihren potenziellen Anwendungsbereichen und den Anforderungen an die F&I-Politik. Das Nachfolgekonzept sollte daher auch spezifische Maßnahmen für jedes Technologiefeld beinhalten und im Rahmen einer Roadmap klar definierte Meilensteine setzen.
- Europa ist derzeit im Bereich des klassischen Computing weitgehend von außereuropäischen Unternehmen abhängig. Im Quantencomputing hat Europa jedoch die Chance, global wettbewerbsfähige Technologien und Unternehmen zu entwickeln und zu etablieren. Nationale Kompetenzen und Anstrengungen müssen daher europaweit gebündelt werden, um ein Quantencomputing „Made in Europe“ zu ermöglichen und Abhängigkeiten von außereuropäischen Großunternehmen mittel- und langfristig zu vermeiden. Hierfür braucht es eine langfristig angelegte Technologie-Roadmap, die bei neuen Erkenntnissen dynamisch anpassbar ist.³¹⁶
- In der Quantenkommunikation ist rasches und entschlossenes Handeln notwendig, um neue Technologien zum Schutz vor Abhörangriffen und zur Sicherung der Datenintegrität zu entwickeln und zu implementieren. Dazu sollten Aktivitäten deutschlandweit koordiniert und gebündelt sowie bereits erfolgreiche Aktivitäten langfristig gesichert werden.

- In der Quantensensorik hat Deutschland dank exzellenter Grundlagenforschung und einer breiten Unternehmens- und Anwenderbasis bereits eine hervorragende Ausgangsposition, die im Unterschied zu anderen Technologiefeldern trotz neuer technologischer Entwicklungen bislang gehalten werden konnte. Um eine internationale Spitzenposition langfristig zu sichern, sollte sich die Bundesregierung einer langfristigen Förderung der Grundlagenforschung auf diesem Gebiet verpflichtet sehen.

Regionale F&I-Cluster ausbauen und überregionale Vernetzung fördern

- Bestehende regionale F&I-Cluster für Quantentechnologien sollten in die Lage versetzt werden, sich mit jeweils klaren Schwerpunkten und Zielen weiterzuentwickeln und dabei Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Investoren einzubinden.
- Um Synergiepotenziale in der Forschung zu identifizieren, den Wissensaustausch zwischen Clustern und die Offenheit gegenüber alternativen technologischen Ansätzen zu fördern, sollte die Vernetzung der F&I-Cluster untereinander aktiv unterstützt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass einem breiten Kreis an Akteuren überregional ein niedrigschwelliger Zugang zur Forschungs- und Recheninfrastruktur der jeweiligen Cluster ermöglicht wird.

Transfer in die Anwendung sicherstellen und Synergiepotenziale nutzen

- Die Bundesregierung sollte verstärkt den Abschluss von Ankerkundenverträgen mit Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien für spezifizierte, aber technologieoffene Aufträge mit klaren Abbruchkriterien prüfen. Einem Ankerkundenvertrag sollte ein wettbewerbles Verfahren vorgeschaltet werden, bei dem Anbieter in mehreren Stufen im Wettbewerb neue Produkte entwickeln.
- Zur Förderung des Technologietransfers und zur Optimierung von Feedbackschleifen zwischen FuE und Anwendungen sollte eine gemeinsame Quanten-Benchmarking-Plattform aufgebaut werden. Sie sollte es ermöglichen, spezifische Vorteile einzelner Quanten-

technologien und technologischer Lösungen anhand umfassender, klar definierter und allgemein akzeptierter Kriterien zu bewerten.³¹⁷ Dabei ist ein starker Fokus auf den Anwendungsnutzen der Technologien zu legen.

- Synergien zwischen militärischer und ziviler Nutzung von Quantentechnologien hinsichtlich potenzieller Größen- und Verbundeffekte sowie Spillover-Effekte, z. B. zur Verschlüsselung oder Navigation, sollten stärker berücksichtigt werden.
- Start-ups sind zentral für den Transfer quantenwissenschaftlicher Erkenntnisse in die Anwendungen und sind oft Ausgründungen aus der Forschung. Es sollte ein unterstützendes Umfeld mit niedrigen bürokratischen Hürden geschaffen werden, um Forschende zu motivieren, ihre Erkenntnisse in Anwendungen zu überführen. Außerdem sollten Maßnahmen wie die Vereinfachung des IP-Transfers und die Schaffung durchlässiger Karrierewege umgesetzt werden, um Gründungsaktivitäten zu fördern.
- Für die Wachstumsphase junger Unternehmen bedarf es ausreichenden Kapitals. Dieser Bedarf ist im Bereich der Quantentechnologien besonders ausgeprägt. Daher sollte die Bundesregierung weitere Maßnahmen zur Stärkung des Risikokapitalmarktes ergreifen, z. B. durch Steuererleichterungen und die Einrichtung von Investitionsfonds. Diese Ansätze könnten privates Kapital mobilisieren, die Skalierung von Quantenunternehmen erleichtern und zu einem attraktiven Standort für unternehmerisches Handeln beitragen.

Kompetenzen aufbauen und Standortattraktivität für Fachkräfte steigern

- Die Expertenkommission begrüßt die auf Bundes- und Länderebene bestehenden Programme zur Fachkräftesicherung im Bereich der Quantentechnologien. Diese Programme sollten durch zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden, wie z. B. durch die Einführung spezialisierter Studiengänge, spezifischer Studienmodule sowie praxisorientierter Weiterbildungsprogramme.

- Die Bundesregierung sollte gezielte Maßnahmen ergreifen, um ein attraktives Umfeld für international mobile MINT-Akademikerinnen und -Akademiker sowie Quantenexpertinnen und -experten zu schaffen. Dies umfasst nicht zuletzt die zügige Bearbeitung von Visumanträgen und Erstellung von Arbeits- und Aufenthaltserlaubnissen.³¹⁸

B3 Innovationen in der Wasserwirtschaft



[Download der
Abbildung](#)





B 3 Innovationen in der Wasserwirtschaft

Wasser dient Menschen, Tieren und Pflanzen als Lebensgrundlage. Es gilt als nicht substituierbar, hat aber eine Vielzahl unterschiedlicher, rivalisierender Nutzungsmöglichkeiten und -ansprüche.³¹⁹ Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bewertet die Versorgung mit Wasser in Deutschland als Daseinsvorsorge und damit als grundlegende Staatsaufgabe, woraus sich ein individuelles Recht auf (Trink-)Wasser in ausreichender Menge und Güte ableiten lässt.³²⁰ Somit ist bei allen Überlegungen, auch bei innovationsökonomischen Erwägungen, stets darauf zu achten, dass Trinkwasser der Bevölkerung für grundlegende Bedürfnisse zu jedem Zeitpunkt und zu vertretbaren Konditionen zur Verfügung steht. Darüber hinaus wird Wasser im Bergbau, im Verarbeitenden Gewerbe und in der Energieversorgung – z. B. als Kühl-, Reinigungs- und Lösungsmittel – sowie in der Landwirtschaft – z. B. zur Bewässerung von Feldern – eingesetzt. Laut WHG bedarf die Nutzung von Gewässern wie die Entnahme oder Wiedereinleitung oder das Einbringen von Stoffen einer Zulassung durch die zuständigen Wasserbehörden.³²¹

Die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, im Folgenden die Wasserwirtschaft genannt, sind öffentlich regulierte Bereiche.³²² Ver- und Entsorgungsgebiete werden einzelnen Gebietskörperschaften und Unternehmen zugewiesen, sodass ein Wettbewerb innerhalb und zwischen Ver- und Entsorgungsgebieten nicht stattfindet. Außerdem kommt es aus mehreren Gründen zu Marktversagen. So werden etwa die Kosten der Wasserverschmutzung nicht allein von jenen getragen, die dafür verantwortlich sind. Aufgrund dieser externen Kosten bestehen unzureichende Anreize, Verschmutzungen zu reduzieren oder zu vermeiden.³²³

Obwohl Deutschland ein wasserreiches Land ist, kann es regional und saisonal zu Wasserknappheiten kommen, die Nutzungskonflikte unter und zwischen privaten, gewerblichen und landwirtschaftlichen Verbrauchern zur Folge haben. Außerdem müssen die Wasserinfrastrukturen an mittlerweile häufiger auftretende Extremwetterereignisse wie Trockenperioden oder Starkregen angepasst werden. Schließlich zeigen sich auch Herausforderungen in Bezug auf die Gewässerqualität infolge des Einsickerns von Düngemitteln und Pestiziden aus der Landwirtschaft in das Grundwasser und durch Medikamentenrückstände sowie Mikroplastik, die bislang nur unzureichend aus den Abwässern geklärt werden.

Wasserwirtschaftliche Innovationen können helfen, diesen Herausforderungen zu begegnen. Im internationalen Vergleich zeigt sich Deutschland hier in einer starken Position. Die Adoption dieser Innovationen stößt jedoch in der heimischen Wasserwirtschaft auf zahlreiche Hemmnisse, die u. a. auf ihrer starken Fragmentierung, einer hohen Risikoaversion und einer starken Fokussierung auf die Einhaltung vorgegebener technischer Standards beruhen.

Die Expertenkommission empfiehlt, Anreize zur Erprobung und Adoption von Innovationen in der Wasserwirtschaft zu stärken. Dazu sollten den Wasserversorgern und Wasserentsorgern in Reallaboren³²⁴ erweiterte Möglichkeiten eingeräumt werden, neue Technologien unter angepassten regulatorischen Rahmenbedingungen zu testen. Für ein effektives und effizientes Wassermanagement müsste die Datenverfügbarkeit in Bezug auf Wassernutzung allerdings verbessert und eine Bepreisung eingeführt werden, die die Knappheit von Wasser widerspiegelt. Auf diese Weise können knappheitsinduzierte Anreize zur Adoption und Generierung

innovativer technologischer Lösungen entstehen. Zudem sollten auch Maßnahmen eingeführt werden, die den Einsatz innovativer Technologien und Lösungen zur Behebung von Verschmutzungsproblemen attraktiver machen. Dazu zählen eine Bemessung der Abwasserabgabe anhand der tatsächlichen Schadstoffemissionen, die Einführung der erweiterten Herstellerverantwortung sowie eine Abgabe auf Pflanzenschutz- und Düngemittel.

und führt zu steigenden Kosten der Wasseraufbereitung.

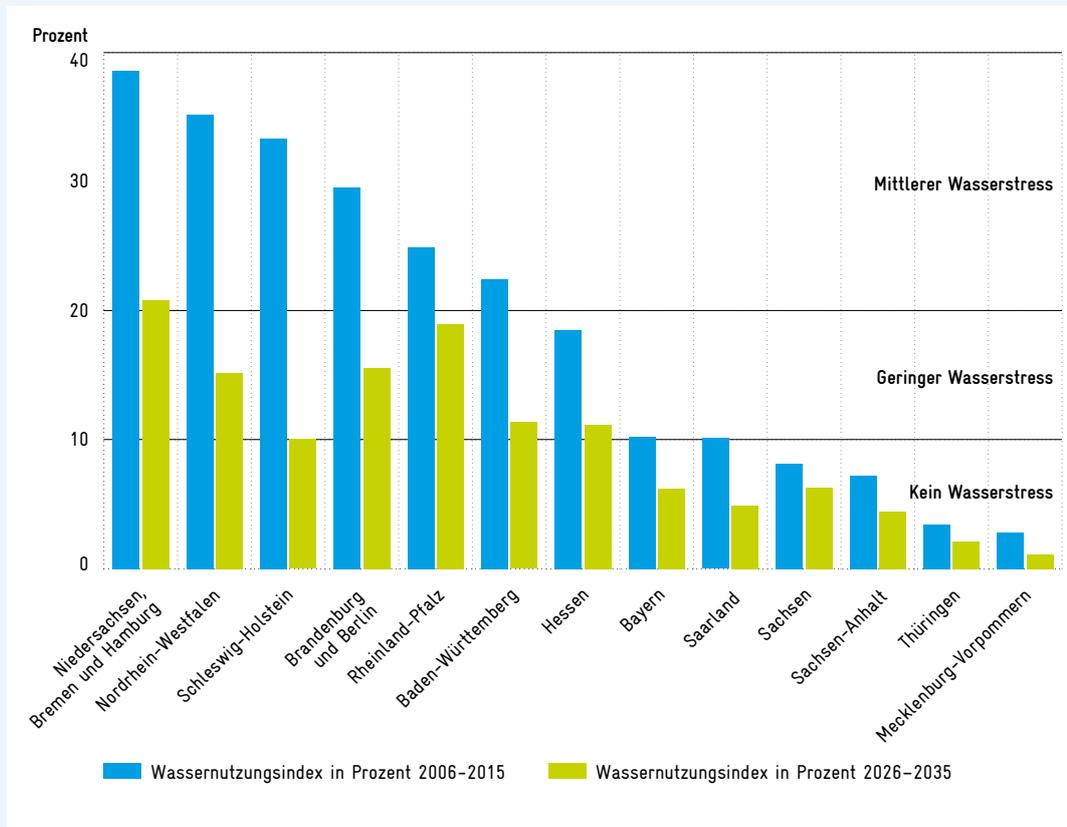
Wasserverfügbarkeit: saisonale und regionale Schwankungen im Wasserdargebot

In Deutschland zeigen sich hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit erhebliche regionale Unterschiede. Als Maß für die Wasserverfügbarkeit lässt sich der Wassernutzungsindex heranziehen, der die tatsächlichen Wasserentnahmen eines Jahres zum langfristig verfügbaren Wasserdargebot³²⁵ ins Verhältnis setzt.³²⁶ Bei einem Wassernutzungsindex zwischen 10 und 20 Prozent spricht man von geringem Wasserstress, bei mehr als 20, aber weniger als 40 Prozent von mittlerem Wasserstress.³²⁷ Eine nach Bundesländern differenzierte Darstellung für die Zeiträume 2006 bis 2015 sowie Prognosen für die Jahre 2026 bis 2035 zeigt Abbildung B 3-1. Daten liegen allerdings nur bis 2015 vor. Daher beruhen die Prognosewerte für 2026 bis 2035 auf den Daten bis 2015.

B 3-1 Wasserquantität und Gewässerqualität in Deutschland

Deutschland ist grundsätzlich ein wasserreiches Land. Starkregenereignisse und Dürreperioden, die infolge des Klimawandels vermehrt auftreten, können jedoch zu saisonalen und regionalen Herausforderungen in Bezug auf die Wasserverfügbarkeit führen. Kritisch ist auch die derzeitige Qualität sämtlicher Oberflächengewässer in Deutschland. Sie entspricht nicht den EU-Qualitätsvorgaben

Abb. B 3-1 Median des Wassernutzungsindex in den Zeiträumen 2006–2015 und 2026–2035 nach Bundesländern in Prozent



[Download der Abbildung und Daten](#)

Bei der Bemessung des Wassernutzungsindex wurden aufgrund der geringen Fläche die Stadtstaaten Bremen und Hamburg in Niedersachsen und Berlin in Brandenburg integriert. Bei der Berechnung des Medians werden die fünf Jahreswerte eines Bundeslands ihrer Größe nach geordnet. Der Median entspricht dann dem genau in der Mitte liegenden Wert dieser Reihe. Im Vergleich zum klassischen Durchschnitt haben Jahre mit außergewöhnlich hohem und niedrigem Wert keinen Einfluss auf den Median. Lesebeispiel: Im Zeitraum von 2006 bis 2015 war das Bundesland Baden-Württemberg von mittlerem Wasserstress betroffen. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Luetkemeier und Awad (2025). © EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Die Bundesländer Baden-Württemberg, Brandenburg und Berlin, Niedersachsen, Bremen und Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein waren von 2006 bis 2015 von mittlerem, Bayern, Hessen und das Saarland hingegen von geringem Wasserstress betroffen. Gemäß der Prognose befinden sich für den Zeitraum 2026 bis 2035 nur noch Niedersachsen, Bremen und Hamburg oberhalb der Grenze zum mittleren Wasserstress. Baden-Württemberg, Brandenburg und Berlin, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein werden im Bereich des geringen Wasserstress liegen. Bei allen Bundesländern nimmt der Wasserstress jedoch durchgängig ab. Ab 2036 werden alle Bundesländer allenfalls von geringem Wasserstress betroffen sein.³²⁸ Das Wasserdargebot wird sich dabei zwar nur unwesentlich verändern, allerdings deutet vieles darauf hin, dass die Wasserentnahmen signifikant zurückgehen werden. Denn erwartet wird nicht nur ein deutlicher Bevölkerungsrückgang, sondern auch eine effizientere Wassernutzung durch den Einsatz neuer Technologien.³²⁹

Diese Prognosen sind allerdings kein Signal der Entwarnung, denn sie bilden regionale und saisonale Schwankungen nicht ab. So kann es innerhalb eines Bundeslandes sowohl Kommunen mit Wasserstress als auch welche ohne Wasserstress geben.

Aufgrund des Klimawandels ist in Deutschland künftig mit einer erheblichen Zunahme an Extremwetterereignissen wie Dürre, Starkregen und Hochwasser zu rechnen. Klimaprognosen gehen von höheren Temperaturen im Sommer und steigenden Niederschlägen im Winter aus. Diese unterjährige Volatilität des Wasserdargebots droht das Wassermanagement vor große Herausforderungen zu stellen.³³⁰ In Zeiten längerer Trockenperioden können Nutzungskonkurrenzen auftreten. Starkregen- oder Hochwasserereignisse sorgen hingegen für einen zeitweiligen Wasserüberschuss. Um diese erhöhten Volatilitäten zeitlich wie überregional auszugleichen und für Versorgungssicherheit zu sorgen, bedarf es innovativer technologischer und institutioneller Lösungen.

Gewässerqualität: Deutschland mit großen Problemen

Bei der Bewertung der Gewässerqualität wird zwischen den Oberflächengewässern und dem Grundwasserkörper unterschieden. Bei den Oberflächen-

gewässern wird hinsichtlich des ökologischen und des chemischen Zustands differenziert, während bei den Grundwasserkörpern der mengenmäßige und der chemische Zustand gemessen werden (vgl. Box B3-2).

- Lediglich 9,2 Prozent der Oberflächengewässer sind in einem guten oder sehr guten, 18,4 Prozent hingegen in einem schlechten ökologischen Zustand. Der überwiegende Anteil von 72,4 Prozent der Oberflächengewässer befindet sich in einem mäßigen oder unbefriedigenden Zustand.³³¹ Noch ungünstiger ist es um den chemischen Zustand der Oberflächengewässer bestellt, der zu 100 Prozent als schlecht eingestuft wird. Dies liegt vor allem an der Belastung mit Quecksilber und Flammenschutzmitteln.³³²
- Bei 95,2 Prozent der Grundwasserkörper ist der mengenmäßige Zustand gut. Allerdings befinden sich die Grundwasserkörper in einzelnen Regionen in einem mengenmäßig schlechten Zustand, so etwa in Teilen des Rheinlands oder der Lausitz. Das liegt zum einen an fehlenden Niederschlägen in den vergangenen Jahren und zum anderen an einer Absenkung des Grundwasserspiegels für und durch den Bergbau.³³³ Der chemische Zustand ist bei 67,3 Prozent der Grundwasserkörper gut und bei einem knappen Drittel (32,7 Prozent) schlecht. Verantwortlich dafür sind vor allem die Belastungen mit Pflanzenschutz- und Düngemitteln.³³⁴

Insgesamt wird in Deutschland flächendeckend weder bei Oberflächengewässern noch bei Grundwasserkörpern ein guter oder gar sehr guter Zustand erreicht. Um hier Verbesserungen zu erreichen und eine Versorgung von Wasser in hinreichender Qualität und Menge zu gewährleisten, muss zum einen ein zunehmender Aufwand bei der Gewinnung und Bereitstellung von Wasser betrieben werden, zum anderen sind Maßnahmen zur Reinhaltung von Wasser³³⁵ nach der (europäischen) Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) erforderlich. Zukünftig drohen sich die Probleme angesichts verunreinigter Gewässerkörper durch die hohe Volatilität der temporären und regionalen Wasserverfügbarkeit deutlich zu verschärfen. Innovationen technologischer und institutioneller Art bieten sich hier als Ansatzpunkte für Verbesserungen an.

Box B 3-2 Bewertung von Gewässerqualität in der EU

In der EU wird die Gewässerqualität einheitlich nach der Wasserrahmenrichtlinie aus dem Jahr 2000 bewertet, die eine Einteilung in Oberflächengewässer (Flüsse, Seen, Küstengewässer und Übergangsgewässer) und Grundwasserkörper vorsieht. Bei den Oberflächengewässern wird hinsichtlich des ökologischen und des chemischen Zustands differenziert, während bei den Grundwasserkörpern der mengenmäßige und der chemische Zustand gemessen werden.

- **Ökologischer Zustand:** Der ökologische Zustand ergibt sich aus dem Vergleich der im Wasser lebenden Organismen mit dem Bestand, der natürlicherweise dort vorhanden sein sollte.³³⁶
- **Chemischer Zustand:** Der chemische Zustand von Gewässern wird anhand von 50 ausgewählten Chemikalien – darunter Schwermetallen und Stoffen aus Pflanzenschutzmitteln – bewertet. Ein guter chemischer Zustand ist erreicht, wenn keiner dieser Stoffe seinen in der EU-Wasserrahmenrichtlinie definierten Grenzwert überschreitet.³³⁷
- **Mengenmäßiger Zustand:** Um einen guten mengenmäßigen Zustand des Grundwassers

zu gewährleisten, müssen die zulässigen Entnahmen deutlich unter der Neubildungsrate liegen. Der Grundwasserspiegel darf keinen von Menschen verursachten Veränderungen unterliegen, die dazu führen, dass

- a. die ökologischen Ziele in Oberflächengewässern, die mit dem Grundwasser in Verbindung stehen, verfehlt werden,
- b. die Qualität dieser Gewässer signifikant schlechter wird,
- c. Landökosysteme, die unmittelbar vom Grundwasserkörper abhängen, signifikant geschädigt werden, oder
- d. es zu einem Zustrom von Salzwasser oder sonstigen Zuströmen (Intrusionen) in das Grundwasser kommt.³³⁸

Ziel der Wasserrahmenrichtlinie ist es, bei den Gewässern in der EU bis 2027 einen guten ökologischen und chemischen Zustand zu erreichen. Der Zustand wird alle sechs Jahre überprüft und bei Verfehlung der Ziele in den Berichtsjahren müssen Maßnahmen durch die Mitgliedstaaten ergriffen werden.³³⁹ Die Kosten der Maßnahmen im Zeitraum 2010 bis 2027 werden in Deutschland auf insgesamt 61,5 Milliarden Euro geschätzt, 21 Milliarden Euro davon für den Zeitraum 2022 bis 2027. Der Großteil der Investitionen wird für Abwassermaßnahmen verwendet.³⁴⁰

B 3-2 Forschung und Innovation in der deutschen Wasserwirtschaft

Die zunehmenden Schwankungen im Wasserdargebot und die erheblichen Beeinträchtigungen der Gewässerqualität in Deutschland stellen die Wasserwirtschaft vor die Herausforderung, entweder selbst innovative Lösungen hervorzubringen oder sie von anderen zu adoptieren.

Viele neue Erkenntnisse, Techniken und Verfahren, die in der Wasserwirtschaft Anwendung finden, werden nicht in der Wasserwirtschaft selbst entwickelt. Die Forschung zum Thema Wasser wird an nahezu allen Universitäten und Fachhochschulen, aber auch an außeruniversitären Forschungseinrichtungen oder an Behörden wie dem Umweltbundesamt (UBA) betrieben.³⁴¹ Wasserwirtschaft-

liche Innovationen werden im Wesentlichen von Unternehmen aus anderen Branchen wie etwa dem Maschinenbau, der Elektrotechnik, der Informationswirtschaft oder auch der Chemieindustrie hervorgebracht.

So zeigt eine durch die Expertenkommission durchgeführte Auswertung der Patentaktivitäten von Wasserversorgern und Abwasserentsorgern in Deutschland, dass diese im Zeitraum von 2017 bis 2021 lediglich 20 bzw. 33 Patente angemeldet haben.³⁴² Gegenüber der gesamten Anzahl von 1.827 Patenten, die in diesem Zeitraum von Organisationen aus Deutschland für den Bereich Wasser angemeldet wurden, machen die Patentaktivitäten der Wasserwirtschaft selbst somit nur einen sehr geringen Anteil aus.³⁴³

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen (FuE-Aufwendungen) sowie dem FuE-Personal in der Wasserwirtschaft. Eine von der Expertenkommission beauftragte Analyse des Stifterverbandes von FuE-aktiven Unternehmen in Deutschland zeigt, dass im Zeitraum von 2017 bis 2021 Unternehmen der Wasserwirtschaft mit durchschnittlich etwa 386.000 Euro jährlich deutlich weniger in FuE investiert haben als Unternehmen aller Sektoren mit durchschnittlich rund 5,6 Millionen Euro pro Jahr. Im selben Zeitraum lag das FuE-Personal, gemessen in Vollzeitäquivalenten, bei Unternehmen der Wasserwirtschaft mit 3,4 deutlich unter dem Durchschnitt der Unternehmen aller Sektoren mit 27,0.³⁴⁴ Diese Befunde deuten an, dass in der Wasserwirtschaft der Adoption von außerhalb der Wasserwirtschaft erzeugten Innovationen eine hohe Bedeutung zukommt. Dabei sind kreative Anpassungsmaßnahmen und experimentelles Vorgehen notwendig, um neue Lösungen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung zu erproben und in bestehende Strukturen zu integrieren.

Hierbei spielen Branchenverbände eine wichtige Rolle. Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) und die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) betreiben selbst anwendungsnahe (Verbund-) Forschung, beraten ihre Mitglieder zu aktuellen Innovationen und bündeln die Forschungsinteressen ihrer Mitglieder. Mit ihrem Water Innovation Circle haben sie eine Plattform gegründet, auf der Anwender, Hersteller, Forschungseinrichtungen und politische Entscheidungsträger zusammenfinden können. Diese Plattform soll zum einen den Praxistransfer von Forschungsergebnissen unterstützen und zum anderen Forschungsbedarfe aus der Praxis für die Forschungseinrichtungen und Fördermittelgeber formulieren.³⁴⁵

Es gibt in Deutschland nur wenige große Ver- und Entsorger, die über hinreichende Ressourcen verfügen, um proaktiv neue Techniken und Verfahren zu erproben. Die meisten kleineren Ver- und Entsorger beschränken sich auf die Umsetzung vorgegebener technischer Standards zu möglichst geringen Kosten. Daher stoßen besonders Innovationen, die eine Kostenreduktion versprechen, auf ihr Interesse. Somit kommt den technischen Standards bei der Adoption von Innovationen in der Wasserwirtschaft eine zentrale Rolle zu.

Damit eine neue Technologie Eingang in die Standards findet, bedarf es ihrer Erprobung durch mehrere – insbesondere auch kleinere – Ver- und Entsorger, die prüfen, inwieweit sich die neue Technik bewährt, und die eine Einschätzung der zu erwartenden Betriebskosten abgeben. Eine starke Orientierung an regulatorischen Vorgaben kann sich sowohl als Ansporn als auch als Hindernis für die Adoption von Innovationen erweisen,³⁴⁶ je nachdem, wie schnell die vorgeschriebenen Standards weiterentwickelt werden und der technologischen Entwicklung folgen.

B 3-3 Forschung und Innovation in Technologien für die Wasserwirtschaft

Ausgehend von den beschriebenen Herausforderungen stellt sich die Frage, welche Position Deutschland bei der Forschung, Entwicklung und Innovation in verschiedenen Bereichen der Wassertechnologien im internationalen Vergleich einnimmt. Dies lässt sich anhand der Indikatoren wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und Außenhandelsspezialisierungen beantworten.³⁴⁷

Publikationen: China führend

Die Anzahl wissenschaftlicher Publikationen gibt Auskunft über die Zahl neuer wissenschaftlicher Ideen. Die wachsende Bedeutung des Themenfeldes Wasser hierzulande lässt sich daran ablesen, dass die wissenschaftlichen Publikationen von Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit in diesem Feld im Vergleich zu allen Publikationen aus Deutschland überdurchschnittlich zunehmen.³⁴⁸ Um Deutschlands Position bei der Forschung zu Wassertechnologien im internationalen Vergleich zu bestimmen, werden im Folgenden für ausgewählte Länder die wissenschaftlichen Publikationen im Zeitraum 2017 bis 2021 als aktuellem Rand mit denen des Zeitraums 2007 bis 2011 verglichen. Die Berechnung des sogenannten Veränderungsfaktors (VF) zeigt, wie stark sich die Publikationszahlen eines Landes zwischen den beiden betrachteten Zeiträumen verändert haben. Der Vergleich der Veränderungsfaktoren unterschiedlicher Länder lässt Aussagen über die Veränderung von Wissensvorsprüngen zwischen diesen Ländern zu.³⁴⁹

Abb. B3-3 Anzahl der Publikationen zu Wassertechnologien im Jahresdurchschnitt für ausgewählte Länder und Regionen 2007–2011 und 2017–2021



[Download der Abbildung und Daten](#)



Der hellere Farbton zeigt die gemittelte Publikationsanzahl der Jahre 2007 bis 2011, der dunklere Farbton die der Jahre 2017 bis 2021. Die Sortierung und somit die Reihenfolge der Länder innerhalb eines jeden Wassertechnologiebereichs folgt den Mittelwerten der Jahre 2017 bis 2021. Der Veränderungsfaktor (VF) gibt an, wie sich Publikationszahlen der letzten fünf Jahre zu den Publikationszahlen der ersten fünf Jahre verhalten. Ein Veränderungsfaktor kleiner als eins bedeutet einen Rückgang und ein Veränderungsfaktor größer als eins einen Anstieg der Publikationszahlen im betrachteten Zeitraum. Ein Veränderungsfaktor von eins bedeutet, dass sich die Publikationszahlen zwischen den Betrachtungszeiträumen nicht verändert haben.
 Lesebeispiel: Deutschland weist bei den Wassertechnologien insgesamt vom Zeitraum 2007 bis 2011 zum Zeitraum 2017 bis 2021 einen VF von 2,1 auf.
 Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Niederste-Hollenberg et al. (2025).
 © EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Abbildung B 3-3 verdeutlicht für beide betrachteten Zeiträume, dass China, die EU-27 und die USA die meisten wassertechnologisch relevanten Publikationen veröffentlicht haben. Der Vergleich der beiden Zeiträume zeigt, dass China seine Publikationsaktivitäten mit einem Veränderungsfaktor von 4,4 auf mehr als das Vierfache deutlich gesteigert hat. Die EU-27 erhöhten ihr Publikationsaufkommen mit einem Veränderungsfaktor von 2,2 nur auf etwas mehr als das Doppelte. Deutschland steigerte mit einem Veränderungsfaktor von 2,1 sein Publikationsaufkommen in ähnlichem Maße wie die EU-27.

Bei den Publikationsaktivitäten werden die Technologiebereiche nachhaltige Wasserinfrastruktur, Abwasserentsorgung, Wasserversorgung, Bewässerung und Hochwasserschutz, Gewässergüte, Digitalisierung sowie innovative Einzelverfahren unterschieden. Auch bei dieser Detailbetrachtung fällt die starke Position Chinas auf. China war im letzten betrachteten Zeitraum in fünf der sieben Technologiebereiche führend und wies für sechs der sieben Technologiebereiche die höchsten Veränderungsfaktoren auf.

Deutschland lag beim Publikationsaufkommen in beiden Zeiträumen und in fast allen Technologiebereichen hinter China und den USA – mit Ausnahme des Bereiches Gewässergüte. Hier konnte Deutschland seine Position vor den USA behaupten, wurde aber von China überholt. Ein Blick auf die Veränderung zwischen den beiden Zeiträumen zeigt, dass Deutschland in den Technologiebereichen Bewässerung und Hochwasserschutz sowie Gewässergüte eher aufholen konnte, während es in den übrigen Bereichen aufgrund – zum Teil deutlich – geringerer Veränderungsfaktor-Werte zurückgefallen ist.

Patente: EU-27 führend

Transnationale Patentanmeldungen können als Indikator für die Anzahl neuer Ideen mit ökonomischer Relevanz herangezogen werden. Im Folgenden werden erneut die Zeiträume 2007 bis 2011 und 2017 bis 2021 miteinander verglichen; anhand des Veränderungsfaktors wird beurteilt, wie sich die technologische Lücke zwischen verschiedenen Ländern und Regionen entwickelt hat.³⁵⁰

Beim Vergleich der beiden Betrachtungszeiträume zeigt sich weltweit ein Anstieg der transnationalen Patentanmeldungen. Am aktuellen Rand, d. h. im Zeitraum 2017 bis 2021, kam die Mehrheit der

Patentanmeldungen aus den EU-27, den USA und China (vgl. Abbildung B 3-4). Deutschland lag seiner Größe entsprechend hinter den USA, China und Japan. Der Veränderungsfaktor für Deutschland entsprach mit 1,1 in etwa jenen der USA und Japans. Mit einem Veränderungsfaktor von 4,7 konnte China die technologische Lücke gegenüber den USA und den EU-27 deutlich verringern.

Die Detailbetrachtung der sieben Wassertechnologiebereiche zeigt die Breite der Dynamik Chinas, das in allen Technologiebereichen die höchsten Veränderungsfaktoren aufwies. Deutschland konnte in nur drei von sieben Technologiebereichen seine Patentanmeldungen steigern, und zwar in den Bereichen Wasserversorgung, Bewässerung und Hochwasserschutz sowie innovative Einzelverfahren.

Außenhandel: Deutschland stark spezialisiert

Die Handelsbilanz eines Landes kann zur Beurteilung seiner Spezialisierung im internationalen Handel herangezogen werden. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen eines Landes ziehen. Deutschland exportierte im Jahr 2021 Güter, die in der Wasserwirtschaft einsetzbar sind, im Wert von 48,2 Milliarden US-Dollar. Das entsprach 2,9 Prozent aller deutschen Warenexporte. Weltweit entfielen im Jahr 2021 hingegen nur 1,7 Prozent aller Exporte auf wasserwirtschaftliche Technologiegüter. Im Folgenden wird der sogenannte offenbarte komparative Vorteil (Revealed Comparative Advantage, RCA)³⁵¹ herangezogen, um Deutschlands Grad der Außenhandelspezialisierung bei wasserwirtschaftlichen Technologiegütern darzustellen.³⁵²

Deutschland wies 2021 eine hohe Spezialisierung bei Wassertechnologien insgesamt auf (vgl. Abbildung B 3-5) und lag diesbezüglich deutlich vor China, den USA und Japan. Darüber hinaus zeigt sich, dass Deutschland und die USA in allen einzelnen Technologiebereichen einen positiven RCA aufwiesen. Die dahinterstehenden Unternehmen waren in diesen Bereichen also wettbewerbsfähig. Im Gegensatz dazu wies China – neben komparativen Vorteilen in einzelnen Technologien, beispielsweise der Wassernutzungseffizienz – komparative Nachteile in anderen Bereichen wie insbesondere bei der Wasseranalytik auf. Chinesische Unternehmen zeigten in diesen Bereichen noch keine hohe Wettbewerbsfähigkeit.

Abb. B3-4 Anzahl der transnationalen Patentanmeldungen zu Wassertechnologien im Jahresdurchschnitt für ausgewählte Länder und Regionen 2007–2011 und 2017–2021



[Download der Abbildung und Daten](#)



Der hellere Farbton zeigt die gemittelte Anzahl der Patente der Jahre 2007 bis 2011, der dunklere Farbton die der Jahre 2017 bis 2021. Die Sortierung und somit die Reihenfolge der Länder innerhalb eines jeden Wassertechnologiebereichs folgt den Mittelwerten der Jahre 2017 bis 2021. Der Veränderungsfaktor (VF) gibt an, wie sich die Patentanmeldungen der letzten fünf Jahre zu den Patentanmeldungen der ersten fünf Jahre verhalten. Ein Veränderungsfaktor kleiner als eins bedeutet einen Rückgang und ein Veränderungsfaktor größer als eins einen Anstieg der Patentanmeldungen im betrachteten Zeitraum. Ein Veränderungsfaktor von eins bedeutet, dass sich die Patentanmeldungen zwischen den Betrachtungszeiträumen nicht verändert haben. Aufgrund von Rundungen bei der Berechnung des VFs, kann es vorkommen, dass die Balken zwar geringfügige Veränderungen anzeigen, diese beim VF jedoch nicht vollständig abgebildet werden können. * wird verwendet, wenn der Wert im Zeitraum 2007 bis 2011 bei Null lag und somit kein VF berechenbar ist.

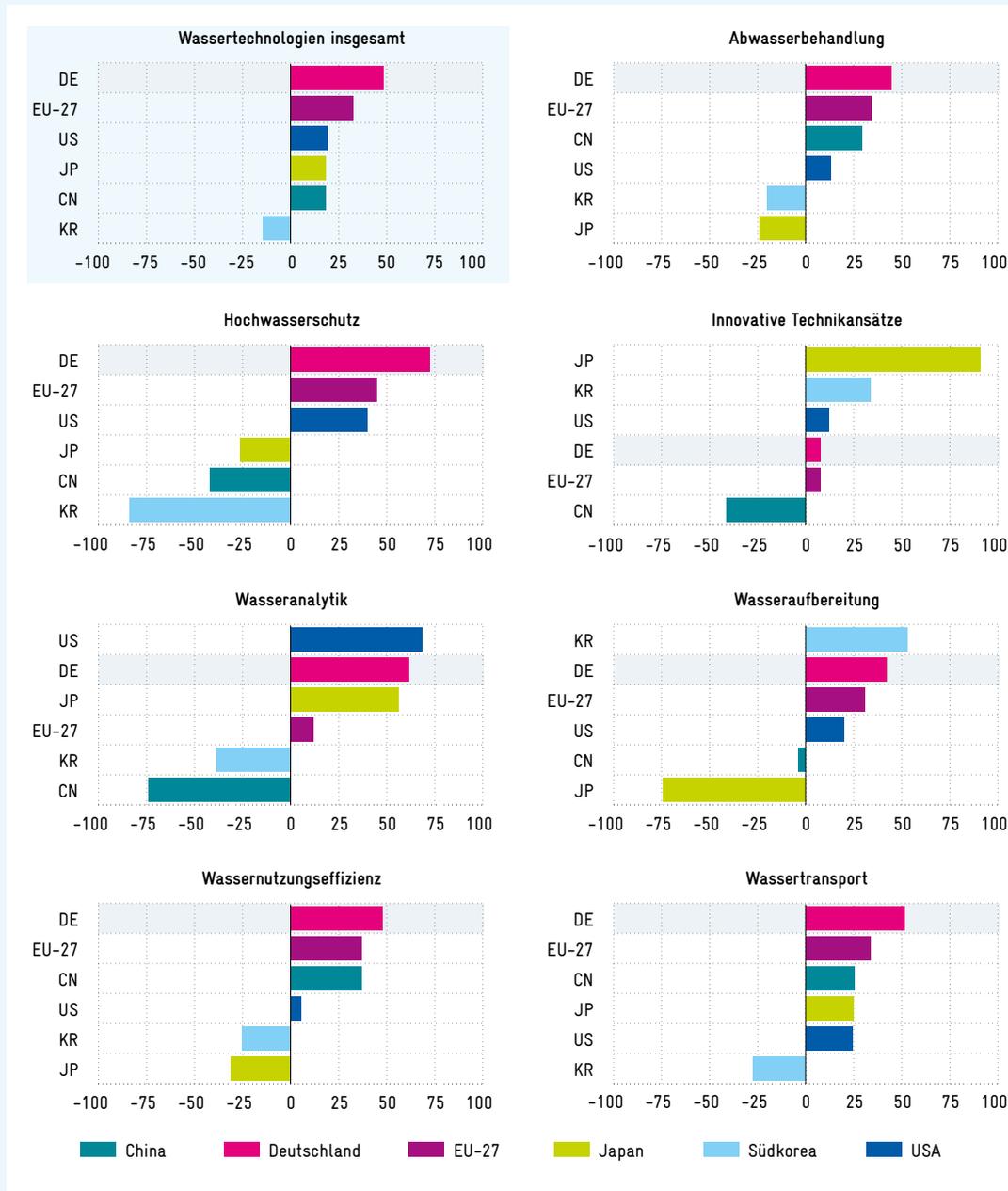
Lesbeispiel: Deutschland weist bei den Wassertechnologien insgesamt vom Zeitraum 2007 bis 2011 zum Zeitraum 2017 bis 2021 einen VF von 1,1 auf.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Niederste-Hollenberg et al. (2025).
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.



[Download der
Abbildung
und Daten](#)

Abb. B3-5 Jahresdurchschnitt des komparativen Vorteils in Wassertechnologien insgesamt und in einzelnen Technologiebereichen für ausgewählte Länder und Regionen 2017–2021



Im Vergleich zu der Patent- und Publikationsanalyse werden die einzelnen Wassertechnologiebereiche anders aufgeteilt.
Lesebeispiel: Deutschland hat bei Wassertechnologien insgesamt einen komparativen Vorteil.
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Niederste-Hollenberg et al. (2025).
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

B3-4 Strukturen und Neuerungsanreize in der deutschen Wasserwirtschaft

Das Forschungs- und Innovationssystem Deutschlands bietet gute Voraussetzungen für die Bewältigung klimabedingter und die Gewässerqualität betreffender Herausforderungen bei Wasserversor-

gung und Abwasserentsorgung. Es gilt nun, innovative Lösungen in die Anwendung zu bringen. Dabei weist die Wasserwirtschaft als öffentlich betriebener Bereich einige Besonderheiten auf, die sich auf die Adoptions- und Innovationsaktivitäten auswirken können.

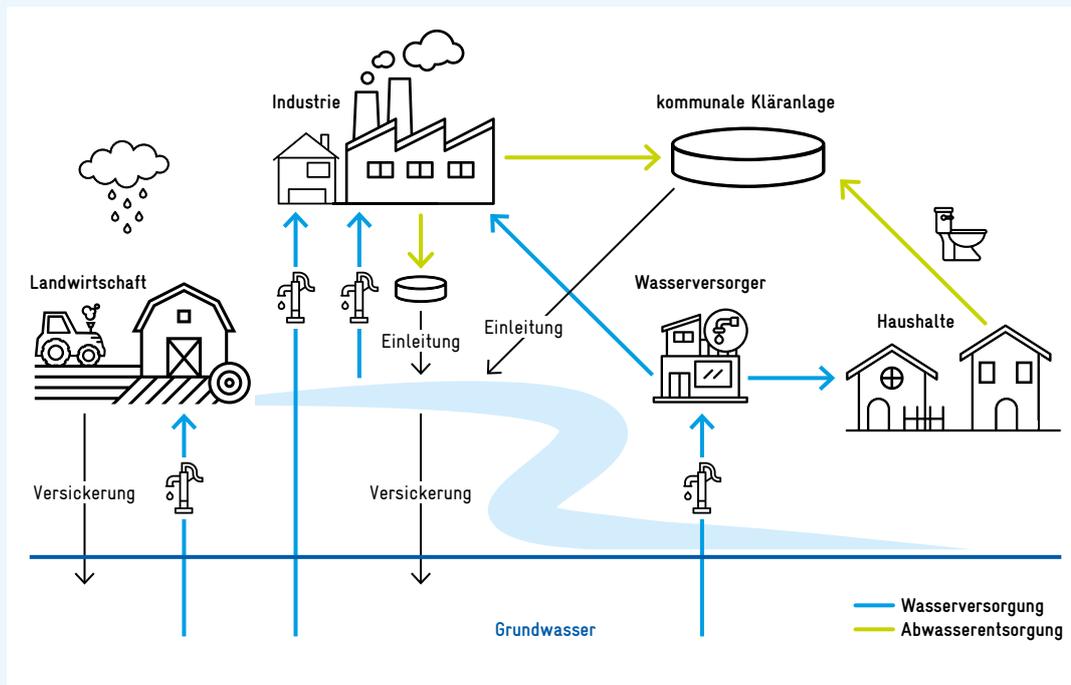
Die Unternehmen der Wasserwirtschaft greifen in den natürlichen Wasserkreislauf ein. Im Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts, dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG), sind diese Eingriffe für Deutschland im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung und zum Schutz von Gewässern geregelt. Die Schutzbedürftigkeit ergibt sich daraus, dass Gewässer und Wasser als Bestandteil des Naturhaushalts gelten, als Lebensgrundlage des Menschen und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen dienen sowie als nutzbares Gut (§ 1 WHG) verwendet werden. Dies gilt für oberirdische Gewässer, Küstengewässer und das Grundwasser. Um diesen Erfordernissen nachkommen zu können, sieht das WHG grundsätzlich die Bewirtschaftung durch den Staat vor.³⁵³

Die öffentliche Wasserversorgung bereitet in Wasserwerken das aus Oberflächengewässern und über Brunnen aus dem Grundwasser entnommene Wasser für die Nutzung auf und stellt es privaten Haushalten, Kleingewerbetreibenden, gewerblichen sowie sonstigen Abnehmern als Trinkwasser zur Verfügung. Auch der Bergbau und das Verarbeitende Gewerbe nutzen Wasser der öffentlichen Wasserversorgung, gewinnen jedoch – ebenso wie

Energieversorger und die Landwirtschaft – auch selbst Wasser. Eine Übersicht über den anthropogenen Wasserkreislauf findet sich in Abbildung B 3-6.

Im Jahr 2019 entnahmen alle Nutzergruppen zusammen etwa 20 Milliarden m³ Wasser aus Grund- und Oberflächengewässern und damit rund 12 Prozent des gesamten Wasserdargebots von 176 Milliarden m³.³⁵⁴ Die Gesamtentnahmen sind seit Jahren rückläufig; 1991 lagen sie noch bei über 46 Milliarden m³ (vgl. Abbildung B 3-7). Die Energieversorgung verringerte ihren Wasserverbrauch am stärksten, und zwar um 20 Milliarden m³. Trotzdem entnahm sie mit 8,8 Milliarden m³ (44,2 Prozent) auch 2019 noch den größten Anteil. Wasser wurde in der Energieversorgung insbesondere zur Kühlung in Kohlekraftwerken genutzt. Kühlung bedeutet jedoch keinen „echten“ Wasserverbrauch, wenn das Kühlwasser dem natürlichen Wasserkreislauf wieder zugeführt wird. Sie führt aber zu einer thermischen Wasserverschmutzung, die das Ökosystem stark beeinträchtigen kann.³⁵⁵ Diese Art der Nutzung dürfte im Zuge der Energiewende und der Stilllegung der Kohlekraftwerke allerdings weiter zurückgehen.

Abb. B 3-6 Darstellung des anthropogenen Wasserkreislaufes



[Download der Abbildung](#)

Lesebeispiel: Die Landwirtschaft entnimmt für die Bewässerung ihrer Felder direkt Wasser aus dem Grundwasser oder aus Oberflächengewässern. Das Wasser versickert anschließend ins Grundwasser, wodurch unter Umständen Schadstoffe ins Grundwasser gelangen. In der Industrie nutzen die verschiedenen Unternehmen bei der Wasserversorgung Grund- oder Oberflächengewässer, das direkt entnommen wird oder durch einen Wasserversorger bereitgestellt wird. Die Abwasserentsorgung erfolgt durch eine unternehmensinterne oder kommunale Kläranlage. Dabei werden nicht alle Schadstoffe beseitigt, wodurch diese in die Oberflächengewässer gelangen und anschließend ins Grundwasser versickern. Die Wasserversorgung der Haushalte erfolgt durch einen öffentlichen Wasserversorger. Die Abwasserentsorgung übernimmt die kommunale Kläranlage. Das geklärte Wasser wird anschließend in die Oberflächengewässer eingeleitet.

Quelle: Eigene Darstellung.

© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Auf die öffentliche Wasserversorgung entfiel 2019 mit 5,4 Milliarden m³ rund ein Viertel der gesamten Wasserentnahmen.³⁵⁶ Ein weiteres Viertel wurde durch den Bergbau/Verarbeitung von Erden und Steinen (1,3 Milliarden m³) sowie durch das Verarbeitende Gewerbe (4,1 Milliarden m³) beansprucht. Die Landwirtschaft, die Wasser zur landwirtschaftlichen Beregnung einsetzt, entnahm 0,4 Milliarden m³ und damit nur 2,2 Prozent der Gesamtwasserentnahmen. Die Landwirtschaft ist dennoch der einzige Bereich, in dem die Entnahmen seit 2007 – dem erstmaligen Ausweisen der Daten – stiegen.³⁵⁷ Derzeit werden ca. 3 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Flächen bewässert. Es ist allerdings davon auszugehen, dass Trockenperioden zukünftig mehr Bewässerung notwendig machen werden.³⁵⁸

Nach der Nutzung gelangt das Wasser, sofern es nicht versickert oder verdunstet, über das Kanalisationssystem zurück in den natürlichen Wasserkreislauf. Dabei werden durch Abwasseraufbereitung die

durch die verschiedenen Wassernutzer verursachten Schadstoffeinträge reduziert.³⁵⁹

Wasserwirtschaft in Deutschland stark fragmentiert

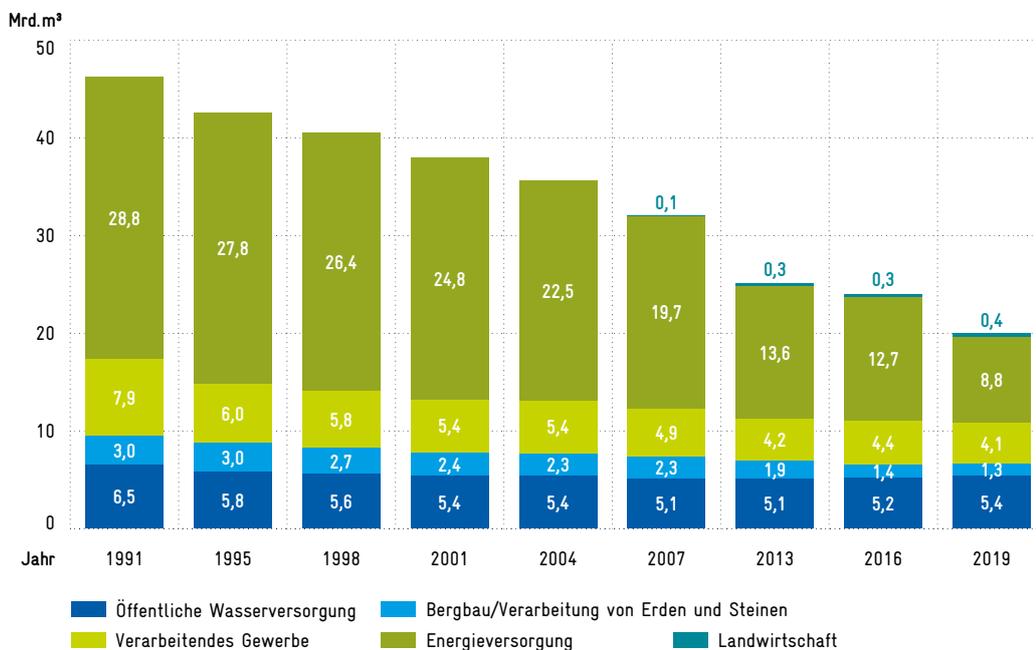
Im Jahr 2022 gab es in Deutschland 5.599 Wasserversorger,³⁶⁰ von denen der größte Teil öffentlich-rechtlich organisiert war.³⁶¹ Im Jahr 2010 betrug die Anzahl der Wasserversorger noch 6.065 und war somit seitdem leicht rückläufig.³⁶² Die Anbieter beliefern regional festgelegte Versorgungsgebiete, die nicht miteinander in Konkurrenz stehen.³⁶³ Nur 4.155 der Versorger gewannen selbst Wasser.³⁶⁴ Die übrigen bezogen ihr Wasser von Fremdversorgern. Darüber hinaus verfügte Deutschland im Jahr 2022 über 8.659 Abwasserbehandlungsanlagen zur Abwasserentsorgung.³⁶⁵

Diese Zahlen verdeutlichen die hohe Fragmentierung des Wassersektors.³⁶⁶ Im europäischen Vergleich verfügt Deutschland mit 88 Wasser-

Abb. B3-7 Wasserentnahmen durch die öffentliche Wasserversorgung, Bergbau/Verarbeitung von Erden und Steinen, Verarbeitendes Gewerbe, Energieversorgung und Landwirtschaft in Milliarden m³



[Download der Abbildung und Daten](#)



Der aktuelle Rand der verfügbaren Jahre ist das Jahr 2019. Danach wurde die Zeitreihe eingestellt. Außerdem wurden die Daten für die Landwirtschaft erst ab 2007 erhoben.
 Lesebeispiel: Im Jahr 2019 entnahm die öffentliche Wasserversorgung 5,4 Milliarden m³ Wasser.
 Quelle: Eigene Darstellung basierend auf <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischer-bericht-wasser-oeffentlich-2190211229005.html?nn=211848> (letzter Abruf am 16. Januar 2025)
 © EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

sorgern je eine Million Einwohnerinnen bzw. Einwohner über ein deutlich stärker fragmentiertes Versorgungssystem als z. B. die Niederlande mit 4,4, Italien mit 2,3, Großbritannien mit 0,7 sowie Frankreich mit 0,13 Wasserversorgern je eine Million Einwohnerinnen bzw. Einwohner.³⁶⁷ Hinsichtlich der Größe des Versorgungsgebietes, gemessen an der jeweils versorgten Einwohnerzahl, zeigen sich in Deutschland erhebliche Unterschiede. So bedienten etwa im Jahr 2019 nur 17 Versorger Gebiete mit einer Einwohnerzahl von 500.000 und mehr, während 2.660 Versorger in Gebieten mit einer Einwohnerzahl zwischen 1.000 und 10.000 tätig waren.³⁶⁸

Adoptions- und Innovationsanreize gering

Die hohe Fragmentierung der Wasserwirtschaft und die Unterschiede in der Größe der Versorgungsgebiete können ambivalente Auswirkungen auf die Adoption und die Schaffung von Innovationen haben. Einerseits sind stärker fragmentierte Strukturen oftmals flexibler und anpassungsfähiger, können bei der Adoption innovativer Lösungen lokale Gegebenheiten besser berücksichtigen und innovative Lösungen passgenauer bereitstellen.³⁶⁹ Andererseits kann die Fragmentierung zu einer Vielzahl dezentraler und möglicherweise nicht kompatibler innovativer Lösungen führen, was Schnittstellenprobleme nach sich zieht. Dies gilt insbesondere dann, wenn es sich um größere systemische, mehrere Versorgungsgebiete betreffende Neuerungen handelt, etwa bei der Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungs-Infrastruktur oder bei der Digitalisierung der Ver- und Entsorgungssysteme.

Die hohe Fragmentierung erschwert zudem die umfassende Zusammenarbeit der Unternehmen der Wasserwirtschaft, was den Wissensaustausch, die Verbreitung und Umsetzung technologischer Lösungen hemmen und so die Effizienz und Effektivität der Nutzung von Innovationen beeinträchtigen kann. Darüber hinaus ist der Anreiz der Versorger, zur Verfügung stehende Innovationen zu adoptieren oder selbst zu innovieren, umso geringer, je kleiner das Versorgungsgebiet ist. Das liegt daran, dass es sich bei den Kosten für den Einsatz neuer Technologien zum großen Teil um Fixkosten handelt, die unabhängig von der Größe des Versorgungsgebietes anfallen. Bei kleineren Versorgungsgebieten müssen diese Kosten also auf weniger Verbraucher umgelegt werden, sodass zur Kostendeckung höhere Gebühren erforderlich sind. Je

höher die notwendige Gebührenanpassung, umso größer sind allerdings die politischen Widerstände in den Kommunen.³⁷⁰

Die Wassernetze verursachen 70 bis 85 Prozent der Gesamtkosten für die Trinkwasserbereitstellung und die Abwasserentsorgung.³⁷¹ Je mehr Verbraucher ein Versorgungsgebiet aufweist, umso unkritischer ist eine Umlage der Fixkosten. Aufgrund der hier vorliegenden Skaleneffekte sind Gebietsmonopole effizient und ein Parallelbetrieb mehrerer Wassernetze durch Wettbewerber ist nicht sinnvoll.³⁷² Man spricht in diesem Falle von „natürlichen Monopolen“. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass die beschriebenen Skaleneffekte in Deutschland optimal genutzt werden, da die Größe der Gebietsmonopole nach politischen und nicht nach ökonomischen Kriterien bestimmt wird.

Darüber hinaus verringert der ausbleibende Wettbewerb in und zwischen den Versorgungsgebieten die Anreize für die Ver- und Entsorger, Kosten zu reduzieren und ihr Angebot stetig zu verbessern. Entsprechend haben sie weniger Anreize, selbst zu innovieren oder vielversprechende Innovationen zu adoptieren. Es stehen allerdings Regulierungsschemata zur Verfügung, die einen Wettbewerb und damit Innovationsanreize induzieren können.³⁷³

Ein weiterer Grund für geringe Innovations- und Adoptionsaktivitäten sind die damit verbundenen hohen Kosten und der starke Fokus der Ver- und Entsorger auf der Umsetzung der technischen Regelwerke. Viele (kleine) Ver- und Entsorgungsbetriebe in der Wasserwirtschaft adoptieren Innovationen mit hohen Kosten oft nur aufgrund regulatorischer Vorgaben. Daher ist beispielsweise die Abwasserentsorgung bisher nur unzureichend auf die Beseitigung von Mikroverunreinigungen vorbereitet. Denn dazu müsste eine vierte Reinigungsstufe eingeführt werden, die mittels verschiedener Techniken wie Ozonierung, Membranfiltration oder Aktivkohlefiltration Spurenstoffe herausfiltern kann.³⁷⁴ Nach Angaben der Bundesregierung verfügten 2024 jedoch nur 55 der fast 9.000 Kläranlagen über diese Reinigungsstufe.³⁷⁵ Die EU-Kommunalabwasserrichtlinie sieht diese Reinigungsstufe für Anlagen ab einer bestimmten Größe bis 2045 vor. Nach einer Schätzung im Auftrag des Verbands kommunaler Unternehmen e. V. (VKU) sind in Deutschland 647 Anlagen zu dieser Aufrüstung verpflichtet; die Kosten würden sich auf 8,7 Milliarden Euro belaufen.³⁷⁶

Ein möglicher Grund für ihre geringe Innovationsleistung ist die hohe Risikoaversion der Wasserbetriebe.³⁷⁷ Sie sind verpflichtet, die Versorgung der Bevölkerung zu vertretbaren Preisen zu gewährleisten, und beschränken sich deshalb auf die dafür notwendigen Investitionen.³⁷⁸ Die Bereitschaft, noch nicht hinreichend getestete neue Lösungsansätze zu verwenden und damit Gefahr zu laufen, die Versorgungsleistung nicht mehr sicherstellen oder die Investitionen nicht refinanzieren zu können, ist daher sehr gering. Reallabore, wie sie in der von der Bundesregierung verabschiedeten Nationalen Wasserstrategie³⁷⁹ vorgesehen sind, böten die Chance, Innovationen in die Anwendung zu bringen und Wasserbetriebe von der Praktikabilität sowohl technischer als auch institutioneller Innovationen zu überzeugen.

B 3-5 Verbesserte Instrumente zur Lösung zunehmender Wassernutzungskonflikte

Die Auswirkungen eines saisonal und regional stark schwankenden Wasserdargebots führen bereits heute zu Nutzungskonkurrenzen um die Ressource Wasser.³⁸⁰ Nutzungskonkurrenz liegt dann vor, wenn nicht alle Wasserbedarfe uneingeschränkt gedeckt werden können und daher einzelne Verbraucher ihre Wasserentnahmen einschränken müssen. Nutzungskonkurrenz kann sich aber auch dadurch äußern, dass der aktuelle Wasserverbrauch so hoch ist, dass neue Verbraucher nicht ausreichend versorgt werden könnten und folglich neue Projekte vom Wasserversorger abgelehnt werden müssen. Wasser wird dadurch zum Standortfaktor, etwa wenn Unternehmen ihre Produktion drosseln oder Landwirte die Bewässerung reduzieren müssen.³⁸¹

Aufgrund der zunehmenden Volatilität des Wasserdargebots ist davon auszugehen, dass sich Nutzungskonkurrenzen regional und temporär verschärfen werden. Zwar kann die Anordnung von Einschränkungen bei der Wasserentnahme in Dürreperioden sinnvoll sein, um vorrangigen Nutzergruppen den notwendigen Zugang zu Wasser zu ermöglichen. Doch führt dies zu Planungsunsicherheiten an anderer Stelle, etwa der Landwirtschaft oder der Industrie.

Technologische Innovationen können dazu beitragen, die Probleme zu lösen, die sich für Deutschland aus der zunehmend volatilen Wasserverfügbarkeit

ergeben. Dies erfordert allerdings Strukturen und Prozesse im Wasserversorgungssektor, die Anreize zu Adoption und Innovation geben.

Überblick über Wasserentnahmerechte für effektives Wassermanagement erforderlich

Das WHG bietet einen Rahmen, Wassernutzungskonflikte aufzulösen, indem die Entnahmen durch die Vergabe von Wasserentnahmerechten gesteuert werden.³⁸² Wasserentnahmerechte sind behördliche Genehmigungen, die zu einer Wasserentnahme aus Grund- und Oberflächengewässern berechtigen. Die genehmigten Grundwasserentnahmen orientieren sich dabei in der Regel am längerfristigen lokalen Wasserdargebot. Die Laufzeiten der Entnahmerechte unterscheiden sich zwischen den Bundesländern. So sind beispielsweise in Niedersachsen, sofern ein ausreichend großer Grundwasservorrat gegeben ist, Wasserentnahme-Genehmigungen mit einer Laufzeit von zehn Jahren in der Landwirtschaft üblich.³⁸³ In Bayern hingegen werden die Entnahmerechte sogar teilweise unbefristet erteilt.³⁸⁴

Langfristige bzw. umfangreiche Wasserentnahmerechte können allerdings bei zunehmender Volatilität des Wasserdargebots zum Problem werden. Sie rational und den sich verändernden Bedingungen anzupassen, setzt umfassende Informationen voraus. Doch obwohl Nutzungskonflikte evident sind, werden Wasserentnahmerechte und tatsächliche Wasserentnahmen bislang nur unzureichend dokumentiert.

Die Datenlage zu Wasserentnahmerechten beispielsweise ist je nach Bundesland unterschiedlich. Journalistische Recherchen zeigen, dass die Bundesländer die Entnahmemengen unterschiedlich erfassen. So sind teilweise nur die maximal genehmigten Entnahmemengen bekannt.³⁸⁵ Daten zu den tatsächlich entnommenen Wassermengen durch Industrieakteure werden nicht flächendeckend erhoben.³⁸⁶ In der Landwirtschaft werden die Wasserentnahmemengen ebenfalls nur unsystematisch dokumentiert.³⁸⁷ Einer rationalen Wasserbewirtschaftung, die starken Schwankungen im Wasserdargebot über regionale und intertemporale Ausgleichsmaßnahmen begegnen soll, steht dies entgegen. Entsprechend sind hier deutliche Verbesserungen und gegebenenfalls innovative digitale Lösungen bei der Datenerhebung und deren Nutzung im Management von Knappheiten notwendig.

Eine weitere Lösung des Volatilitätsproblems ist die Einführung eines Marktes für (in begrenzter Zahl vergebene) Wasserrechte,³⁸⁸ der den Kauf und Verkauf von Rechten oder Ansprüchen auf die Nutzung von Oberflächen- oder Grundwasserressourcen umfasst. Dabei können grob drei Arten von Wasserhandel unterschieden werden: ein kurzfristiger Zuteilungshandel mit Wasser für die unmittelbare Nutzung, ein mittelfristiges Wasser-Leasing, das saisonale Zuteilungen umfasst und den Marktteilnehmern für eine vertraglich festgelegte Zeit einen sicheren Zugriff auf Wasser ermöglicht, und ein permanenter Handel von Wasserrechten.³⁸⁹ Diese institutionelle Innovation kann eine effiziente und bedarfsgerechte Nutzung von Wasser ermöglichen. Dadurch können ökologische Schäden und sich daraus ergebende ökonomische Kosten vermindert werden. Ein Marktpreis für Wasser, der dessen Knappheit widerspiegelt, kann zudem preisinduzierte Innovationen hervorrufen.

Um den Nutzen eines solchen Wasserrechtshandels beurteilen zu können, sind jedoch empirische Untersuchungen erforderlich, die derzeit noch nicht vorliegen. International wird Wasserrechtshandel beispielsweise in mehreren US-Bundesstaaten, Australien, Chile, China, Mexiko und Südafrika betrieben, innerhalb Europas etwa im Vereinigten Königreich und in Spanien.³⁹⁰

Entnahmeentgelte als Instrument rationaler Wasserbewirtschaftung

Bei der Wasserentnahme wird vielerorts ein Wasserentnahmeentgelt erhoben.³⁹¹ Derzeit haben 13 von 16 Bundesländern ein solches Wasserentnahmeentgelt, wobei es preisliche Unterschiede hinsichtlich der genutzten Wasserressource und der Wassernutzer gibt. Bayern, Hessen und Thüringen erheben derzeit keine Wasserentnahmeentgelte.³⁹²

Hieraus ergeben sich mehrere Probleme. Wird ein Gut wie Wasser zu einem Preis von Null oder einem sehr niedrigen Preis abgegeben, dann bestehen, wenn überhaupt, nur sehr geringe ökonomische Anreize, die Wasserversorgung und die dahinterstehenden Technologien durch innovative Lösungen zu verbessern. Liegt eine höhere Bepreisung von Wasser vor, die die Knappheiten unvollständig widerspiegelt, führt dies auch nur zu einer geringen Bereitschaft, bei Wasserbereitstellung und Wasserverbrauch technologische Neuerungen einzuführen.

Bei regional sehr unterschiedlichen Preisen werden mögliche Innovationstätigkeiten in die Regionen mit höheren Wasserpreisen gelenkt. Dies ist aber nur sinnvoll, wenn die Wasserpreise auch die Knappheiten und damit die Herausforderungen an die Versorgungssicherheit widerspiegeln.

Eine bundeseinheitliche Systematik zur Bestimmung von Wasserentnahmeentgelten gibt es derzeit nicht. Laut UBA fehlen „klare Regelungen zur Bemessungsgrundlage, zur Berücksichtigung regionaler Gegebenheiten, eine Differenzierung nach Normal- und Dürresituationen sowie zur Anpassung an hydrologische Anforderungen (quantitative und qualitative Aspekte)“.³⁹³ Im Mai 2024 wurde deshalb vom UBA eine Studie ausgeschrieben, die diese bundeseinheitliche Systematik erstellen soll.

Nutzungskonflikte durch dynamische Bepreisung entschärfen

Sofern in Deutschland zumindest einige Verbraucher ihren Wasserverbrauch in Trockenzeiten reduzieren oder auf andere Zeiträume verlagern können, könnte – als institutionelle Innovation – ein System dynamischer Preise entsprechende Anreize hierzu setzen und damit Nutzungskonkurrenzen abschwächen.³⁹⁴ Eine dynamische Bepreisung bedeutet, dass saisonal oder temporär die Preise so erhöht werden, dass sie einen besonders starken Anreiz schaffen, in Engpasszeiten Wasser zu sparen und auf lange Sicht in neue wassersparende Technologien zu investieren.

Eine dynamische Bepreisung der Wasserentnahme kann entweder in als kritisch bekannten Zeiträumen oder auch situationsabhängig stattfinden. Sie könnte sich also beispielsweise daran ausrichten, dass eine bestimmte Anzahl an Knappheitsindikatoren einen vorher bestimmten Schwellenwert überschreitet.³⁹⁵ Da die Wassernachfrage privater Haushalte kaum auf Preisänderungen reagiert und auch angesichts der Rolle des Wassers in der Daseinsvorsorge, könnte die dynamische Bepreisung auf bestimmte Nutzergruppen wie etwa einzelne Branchen mit starker Wassernutzung beschränkt werden.³⁹⁶ In diesem Fall müsste die dynamische Bepreisung eher an den Wasserentnahmeentgelten als an den Trinkwasserpreisen ansetzen, weil die Wirtschaft den Großteil ihres Bedarfs über eigene Entnahmen deckt.

Die dynamische Bepreisung erfordert den Einsatz von Smart-Meter-Technologien, die eine zeitlich differenzierte Erfassung der Verbrauchsmenge ermöglicht. Mit der üblichen jährlichen Ablesung von Wasserzählern ist eine dynamische Bepreisung nicht möglich, da die Verbräuche nicht den Zeiten erhöhter Preise zugeordnet werden können. Bisher fehlen jedoch praktische Erfahrungen über die Wirksamkeit von dynamischen Tarifen in der Wassernutzung.³⁹⁷ Daher ist nicht bekannt, ob die Vorteile der dynamischen Bepreisung die Kosten der dafür notwendigen Infrastruktur und Dokumentationsaufwendungen aufwiegen.

B 3-6 Internalisierung externer Kosten zur Verbesserung der Gewässerqualität

Bei der Nutzung von Wasser und bei der Einleitung von Abwässern kommt es zu einer Reihe von externen Kosten. Deshalb fordert die EU-Wasserrahmenrichtlinie die „Deckung der Kosten der Wassernutzung einschließlich umwelt- und ressourcenbezogener Kosten im Zusammenhang mit Beeinträchtigungen oder Schädigungen der aquatischen Umwelt [...] entsprechend dem Verursacherprinzip“.³⁹⁸ Werden Verhaltensweisen mit externen Kosten adäquat bepreist, entstehen höhere Anreize, Innovationen zu deren Vermeidung oder Minderung zu adoptieren und zu entwickeln.

Option 1: Anpassung der Abwasserabgabe

Damit die durch Abwasser verursachten Schäden besser in wirtschaftlichen Entscheidungen berücksichtigt werden, wirkt die seit 1976 gesetzlich verankerte Abwasserabgabe als umweltpolitisches Lenkungsinstrument.³⁹⁹ Sie bietet den Abgabepflichtigen Anreize, die Schadstoffemissionen zu senken und gleichzeitig Innovationsbemühungen anzustrengen. Der Abgabesatz liegt allerdings seit 1997 unverändert bei 35,79 Euro pro Schadeinheit und hat damit stark an Lenkungswirkung eingebüßt.⁴⁰⁰ Ein inflationsbereinigter Abgabesatz läge zum Ende des Jahres 2024 bei knapp 60 Euro pro Schadeinheit.

Die Lenkungsfunktion der Abwasserabgabe wird auch dadurch geschwächt, dass sich die Abgabe an behördlich genehmigten Schadstoffkontingenten und nicht an der tatsächlichen Emission bemisst, solange letztere unter der genehmigten Menge bleibt.⁴⁰¹

Werden die gesetzlichen Anforderungen an den „Stand der Technik“ eingehalten, halbiert sich der Abgabesatz.⁴⁰² Weiter vermindern lässt sich die Abgabelast durch Investitionen in technische Anlagen, die über diesen „Stand der Technik“ hinausgehen. Damit bietet die Abwasserabgabe Anreize für Innovation. Die Stärke dieser Anreize hängt aber davon ab, wie häufig der „Stand der Technik“ fortgeschrieben wird. Wird er nicht kontinuierlich und hinreichend angepasst, sind die Innovationsanreize nur sehr gering.⁴⁰³

Option 2: Einführung der erweiterten Herstellerverantwortung

In Deutschland stellen Mikroverunreinigungen, die aus Arzneimitteln, Kosmetika, Reinigungsmitteln und anderen Haushalts- und Industriechemikalien stammen, große Herausforderungen für die Qualität der Oberflächengewässer dar (siehe dazu Box B 3-2).⁴⁰⁴ Abhilfe könnte die in der EU-Kommunalabwasserrichtlinie vorgesehene vierte Reinigungsstufe in Kläranlagen schaffen. Diese Reinigungsstufe ist jedoch bislang nur in weniger als 1 Prozent der Kläranlagen vorhanden. Die Abwasserrichtlinie sieht vor, dass die Hersteller von spezifischen Produktgruppen, die zu Mikroverunreinigungen führen, bei der Finanzierung der vierten Reinigungsstufe eingebunden werden. Mittels der erweiterten Herstellerverantwortung sollen sie mindestens 80 Prozent der Kosten für Ausbau und Betrieb der vierten Reinigungsstufe tragen. Die Richtlinie sieht vor, dass sich der jeweilige Beitrag sowohl an der Schädlichkeit als auch an „der Menge der in den in Verkehr gebrachten Produkten enthaltenen Stoffe“⁴⁰⁵ bemisst. Dadurch entstehen Anreize, entsprechende Mikroverunreinigungen durch Innovationen zu reduzieren.⁴⁰⁶

Option 3: Erhebung einer Pflanzenschutz- und Düngemittelabgabe

Pflanzenschutz- und Düngemittel gelangen zunehmend in das Grundwasser (siehe dazu Box B 3-2).⁴⁰⁷ Landwirtschaftliche Betriebe beziehen aber in der Regel die teils erheblichen Umweltbelastungen, die durch den Einsatz dieser Mittel entstehen, nicht in ihre Kostenkalkulation ein. Dadurch fehlen ihnen Anreize, ökologisch weniger schädliche Wirkstoffe zu nutzen oder auf umweltschonende Präzisionstechnologien bei der Ausbringung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln umzusteigen. Eine Änderung könnte durch eine Steuer oder Abgabe auf

umweltschädliche Betriebsmittel erreicht werden.⁴⁰⁸ Dadurch würden herkömmliche, wenig nachhaltige Agrartechnologien teurer und neue (Präzisions-) Technologien wettbewerbsfähiger.⁴⁰⁹ Dänemark hat ein solches Modell bereits umgesetzt.⁴¹⁰

B 3-7 Handlungsempfehlungen

Deutschland ist ein im internationalen Vergleich wasserreiches Land mit hoher Versorgungssicherheit. Die deutsche Wasserwirtschaft sieht sich allerdings mit einer Reihe von Herausforderungen konfrontiert. Es gilt, den Auswirkungen von häufiger werdenden Extremwetterereignissen wie Trockenperioden oder Starkregen zu begegnen und die Gewässerqualität zu verbessern. Technologische wie auch institutionelle Innovationen können helfen, diese Herausforderungen zu bewältigen. Innovative Technologien werden der Wasserwirtschaft im Wesentlichen aus anderen Branchen angeboten. Strukturelle und regulatorische Gegebenheiten können einer raschen und breiten Adoption dieser Technologien entgegenstehen. Zur Lösung zunehmender Nutzungskonkurrenzen im Zuge des Klimawandels kann der verbesserte Einsatz von Instrumenten einer rationalen Wasserbewirtschaftung beitragen, mit positiven Wirkungen auf die Adoption und Entwicklung neuer technologischer Lösungen. Hinsichtlich der Verbesserung der Gewässerqualität ist es erforderlich, externe Kosten zu internalisieren und damit neue nachhaltige Technologien attraktiver zu machen. Konkret schlägt die Expertenkommission der Bundesregierung folgende Maßnahmen vor:

Erprobung und Adoption von Innovationen stärken

- Die Expertenkommission unterstützt die in der Nationalen Wasserstrategie vorgesehene Erprobung innovativer Konzepte wie neuartiger Sanitärsysteme oder wassersensibler Städte in Reallaboren.⁴¹¹ Dort sollten zudem institutionelle Innovationen wie die Anpassung der Wasserentnahmerechte oder der Wasserhandel erprobt werden.

Innovationsanreize durch rationale Wasserbewirtschaftung erhöhen

- Für ein nachhaltiges Wassermanagement sowie den Umgang mit Nutzungskonflikten sind Daten zu den vergebenen Wasserrech-

ten und den tatsächlichen Wasserentnahmen erforderlich. Die Erfassung in einem umfassenden und transparenten Wasserregister, wie in der nationalen Wasserstrategie angekündigt, ist zügig und in digitaler Form umzusetzen.

- Soweit möglich, sollte zur Deckung der Datenbedarfe gemäß dem Once-only-Prinzip auf bereits verfügbare oder absehbar verfügbare Daten zurückgegriffen werden, um eine Belastung von Unternehmen durch redundante Bürokratiepflichten zu vermeiden.
- Die Wasserentnahmeentgelte müssen derart angepasst werden, dass sie die Knappheit von Wasser insbesondere in Zeiten längerer Trockenheit und damit die externen Kosten der Wasserentnahme berücksichtigen. Hierdurch ergeben sich Innovationsanreize. Die Expertenkommission unterstützt die Entwicklung einer bundeseinheitlichen Systematik zur Berechnung der Wasserentnahmeentgelte. Harmonisierungsmöglichkeiten in dieser Berechnung, die derzeit durch eine Studie geprüft werden, sollten genutzt werden, sofern sie den Ländern erlauben, auf regionale Besonderheiten und vorübergehende Wasserknappheiten zu reagieren.
- Die dynamische Bepreisung von Wasserentnahmen sollte in ausgewählten, wasserintensiven Branchen in einem begrenzten Umfeld erprobt werden, um die Kosten der dafür notwendigen zusätzlichen Datenerhebung gegen die Effizienzgewinne in der Wassernutzung abwägen zu können.
- Die Daten, die als Grundlage für Lenkungsinstrumente erhoben werden, sollten für FuE zur Verfügung gestellt werden.

Innovationsanreize durch Internalisierung externer Kosten setzen

- Die Höhe der Abwasserabgabe sollte an den tatsächlich ausgebrachten Schadstoffemissionen und nicht an den genehmigten Emissionen bemessen werden, um Anreize zur Schadstoffreduktion zu schaffen.
- Minderungsmöglichkeiten bei der Abwasserabgabe sollten nicht bereits beim vorgeschriebenen „Stand der Technik“ greifen, sondern

nur diejenigen belohnen, die ihn übertreffen. Dazu sollte der vorgeschriebene „Stand der Technik“ hinreichend häufig überprüft und angepasst werden.

- Die erweiterte Herstellerverantwortung der Industrie ist ein wichtiges Anreizinstrument für den Einsatz neuer Technologien – auch zur Vermeidung von Mikroschadstoffen im Abwasser. Sie sollte daher schnell in nationales Recht überführt und umgesetzt werden.
- Die Ausbringung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln sollte nach dem Vorbild Dänemarks mit einer Abgabe belegt werden, damit die Verursacher die Schadstoffbelastung des Wassers verringern. Die Abgabe ist zu evaluieren und ihre Ausgestaltung gegebenenfalls anzupassen.⁴¹²

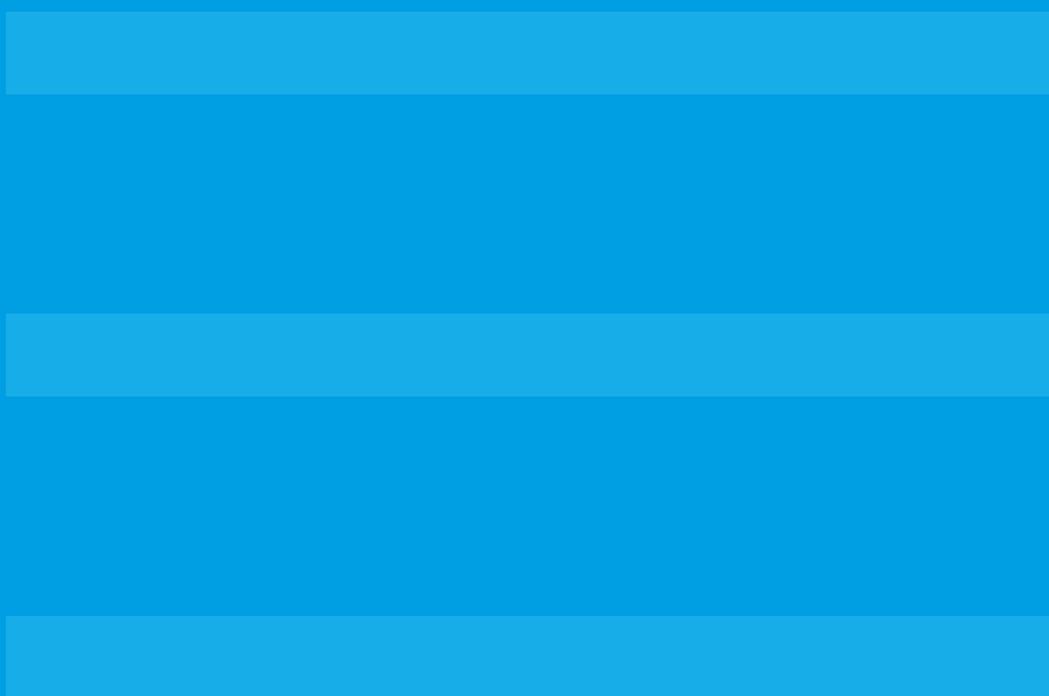
Innovationsanreize durch Strukturanpassungen und Yardstick-Wettbewerb schaffen

- Um stärkere Anreize für die Adoption und Entwicklung von Neuerungen zu setzen, sollten Konzepte und Maßnahmen entworfen werden, die es für kleinere Versorgungseinheiten attraktiver machen, sich zu größeren Versorgungseinheiten zusammenzuschließen. Hierdurch werden Effizienzverbesserungen

erreicht. Außerdem kann der Zusammenschluss von Versorgungsgebieten dazu beitragen, dass bei Problemlagen, die über mehrere Versorgungsgebiete hinweg entstehen, wie etwa bei Hochwasser oder bei Dürren, innovative strukturelle Lösungen besser koordiniert und schneller eingeführt werden.

- Anreize zu Innovation und Adoption könnten über bestimmte Regulierungsschemata geschaffen werden. Das Grundprinzip einer derartig ausgelegten Regulierung ist die Belohnung einer Übererfüllung von Zielvorgaben. Die Zielvorgabe kann zum einen individuell für jeden einzelnen Versorger oder Entsorger festgelegt werden. Dabei stehen die Aktivitäten der Unternehmen zur Zielerfüllung in keinerlei Wettbewerb zueinander. Zum anderen kann sich die Zielvorgabe am Durchschnitt vergleichbarer Unternehmen orientieren. In diesem Falle ergibt sich ein regulierter Wettbewerb unter vergleichbaren Ver- bzw. Entsorgern, ein sogenannter Yardstick-Wettbewerb. Beide Regulierungsschemata bewirken, dass sich der Grad der Übererfüllung des Regulierungsziels in höheren Erlösen niederschlägt, die dann zur Deckung der Innovations- und Adoptionskosten verwendet werden können. Alternative Formen der Regulierung von Innovationsanreizen sollten in Reallaboren vergleichend erprobt werden.

VERZEICHNISSE



Inhalt

| | | |
|------------|--|-----|
| C 1 | Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Boxen | 121 |
| C 2 | Abkürzungsverzeichnis | 123 |
| C 3 | Glossar | 126 |
| C 4 | Aktuelle Studien zum deutschen Innovationssystem | 132 |
| C 5 | Literaturverzeichnis | 133 |
| C 6 | Endnotenverzeichnis | 138 |
| C 7 | F&I-Dashboard | 161 |

C 1 Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Boxen

| | | | |
|---|----|--|----|
| Box A 2-1 _____ | 27 | Abb. B 1-6 _____ | 57 |
| Neue Missionsorientierung | | Beschäftigungsanteile in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial je Kreis 2013 und 2022 in Prozent | |
| Box A 2-2 _____ | 29 | Abb. B 1-7 _____ | 58 |
| Schlüssel- und Zukunftstechnologien | | Beschäftigungsanteile in umweltschädlichen Berufen je Kreis 2013 und 2022 in Prozent | |
| Box A 2-3 _____ | 35 | Box B 1-8 _____ | 58 |
| Ökonomische und technologische Souveränität | | Beschäftigtenmobilität zwischen Sektoren und Branchen | |
| Tab. A 3-1 _____ | 39 | Abb. B 1-9 _____ | 60 |
| Ausprägungen von Industriepolitik | | Beschäftigung in ausgewählten Sektoren und Branchen 2013 und 2022 in Prozent | |
| Box A 3-2 _____ | 42 | Abb. B 1-10 _____ | 61 |
| Theoretische Begründungen für industriepolitische Maßnahmen | | Betriebswechsler und -wechslerinnen innerhalb und zwischen Sektoren bzw. Branchen 2013–2022 in Prozent | |
| Abb. B 1-1 _____ | 52 | Abb. B 1-11 _____ | 63 |
| Transnationale Patentanmeldungen ausgewählter Länder 2000–2021 in Prozent | | Betriebe nach Betriebsgröße bzw. Betriebsalter und Digitalisierungspotenzial 2013 und 2022 in Prozent | |
| Box B 1-2 _____ | 53 | Abb. B 1-12 _____ | 64 |
| Indikatoren für die Arbeitsmarkt Betrachtung | | Betriebe nach Betriebsgröße bzw. Betriebsalter und Umweltrelevanz 2013 und 2022 in Prozent | |
| Abb. B 1-3 _____ | 54 | Abb. B 1-13 _____ | 66 |
| Beschäftigung nach Digitalisierungspotenzial und Umweltrelevanz der Berufe 2013–2022 in Prozent | | Beschäftigung nach Anforderungsniveau 2013 und 2022 in Prozent | |
| Abb. B 1-4 _____ | 55 | Abb. B 1-14 _____ | 70 |
| Anteil der angemeldeten Digitalisierungspatente an allen angemeldeten Patenten je Kreis in den Zeiträumen 2000–2010 und 2011–2021 in Prozent | | Projektförderung des Bundes im Bereich Digitalisierung im Zeitraum 2000–2023 | |
| Abb. B 1-5 _____ | 56 | Abb. B 1-15 _____ | 71 |
| Anteil der angemeldeten Dekarbonisierungspatente an allen angemeldeten Patenten je Kreis in den Zeiträumen 2000–2010 und 2011–2021 in Prozent | | Projektförderung des Bundes im Bereich Dekarbonisierung im Zeitraum 2000–2023 | |

| | | | |
|---|----|---|-----|
| Box B 2-1 _____ | 79 | Abb. B 3-1 _____ | 101 |
| Besonderheiten der Quantenmechanik | | Median des Wassernutzungsindex in den Zeiträumen 2006–2015 und 2026–2035 nach Bundesländern in Prozent | |
| Abb. B 2-2 _____ | 80 | Box B 3-2 _____ | 103 |
| Bekanntheit von Quantentechnologien in Unternehmen in Deutschland 2024 in Prozent | | Bewertung von Gewässerqualität in der EU | |
| Abb. B 2-3 _____ | 80 | Abb. B 3-3 _____ | 105 |
| Transnationale Patentanmeldungen nach Technologiefeld weltweit 2000–2021 | | Anzahl der Publikationen zu Wassertechnologien im Jahresdurchschnitt für ausgewählte Länder und Regionen 2007–2011 und 2017–2021 | |
| Box B 2-4 _____ | 82 | Abb. B 3-4 _____ | 107 |
| Verarbeitung von Informationen in klassischen Computern und Quantencomputern | | Anzahl der transnationalen Patentanmeldungen zu Wassertechnologien im Jahresdurchschnitt für ausgewählte Länder und Regionen 2007–2011 und 2017–2021 | |
| Abb. B 2-5 _____ | 83 | Abb. B 3-5 _____ | 108 |
| Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantencomputing | | Jahresdurchschnitt des komparativen Vorteils in Wassertechnologien insgesamt und in einzelnen Technologiebereichen für ausgewählte Länder und Regionen 2017–2021 | |
| Box B 2-6 _____ | 84 | Abb. B 3-6 _____ | 109 |
| Quantenmechanik in der Kommunikation: Quantentechnologien nutzen, um vor Quantentechnologien zu schützen | | Darstellung des anthropogenen Wasserkreislaufes | |
| Abb. B 2-7 _____ | 86 | Abb. B 3-7 _____ | 110 |
| Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantenkommunikation | | Wasserentnahmen durch die öffentliche Wasserversorgung, Bergbau/Verarbeitung von Erden und Steinen, Verarbeitendes Gewerbe, Energieversorgung und Landwirtschaft in Milliarden m ³ | |
| Abb. B 2-8 _____ | 88 | | |
| Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantensensorik | | | |
| Tab. B 2-9 _____ | 90 | | |
| Eckdaten ausgewählter Quantenstrategien | | | |
| Abb. B 2-10 _____ | 93 | | |
| Anzahl Beteiligung an wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantencomputing 2000–2022 und Anteil zitiert in Patenten bis einschließlich 2023 | | | |

C2 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|---|
| 5G | Fünfte Mobilfunkgeneration |
| B2B | Business to Business |
| BA | Bundesagentur für Arbeit |
| BDI | Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMDV | Bundesministerium für Digitales und Verkehr |
| BMUV | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz |
| BMVI | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| BMWK | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz |
| CAD | Canadian Dollar |
| CAS | Chinese Academy of Sciences |
| Cas | CRISPR-associated protein |
| CBAM | Carbon Border Adjustment Mechanism |
| CCS | Carbon Capture and Storage |
| CCU | Carbon Capture and Utilization |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CONNECT | Communications Networks, Content and Technology |
| CPU | Central Processing Unit |
| CRISPR | Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats |
| DARPA | Defense Advanced Research Projects Agency |
| DATI | Deutsche Agentur für Transfer und Innovation |
| DG | Directorate General |
| DVGW | Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. |
| DWA | Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. |
| EEG | Erneuerbare-Energien-Gesetz |
| EFRE | Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung |
| EGD | European Green Deal |
| EIB | Europäische Investitionsbank |
| EIC | European Innovation Council |
| ERC | European Research Council |
| EU | Europäische Union |
| EU-27 | 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union |
| EU ETS | European Union Emissions Trading System |
| EuroHPC | European High Performance Computing |
| EuroHPC JU | European High Performance Computing Joint Undertaking |
| EuroQCI | European Quantum Communication Infrastructure |

| | |
|------------|--|
| EXIST | Existenzgründungen aus der Wissenschaft |
| F&I | Forschung und Innovation |
| FITKO | Föderale IT-Kooperation |
| FuE | Forschung und Entwicklung |
| GFS | Gesamtdeutsches Fördersystem für strukturschwache Regionen |
| GOJI | Greenness-of-Jobs-Index |
| GovTech | Government Technology |
| GPS | Global Positioning System |
| GRW | Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur“ |
| IAB | Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit |
| IBM | International Business Machines Corporation |
| IP | Intellectual Property, |
| IPCEI | Important Projects of Common European Interest |
| IRA | Inflation Reduction Act |
| ISI | Institut für System- und Innovationsforschung |
| IT | Informationstechnologie |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| KMU | Kleine und mittlere Unternehmen |
| KoSIT | Koordinierungsstelle für IT-Standards |
| LNe | Langfriststrategie Negativemissionen |
| MIIT | Ministry of Industry and Information Technology |
| MINT | Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik |
| MoST | Ministry of Science and Technology |
| MRT | Magnetresonanztomograf |
| NISQ | Noise Intermediate-Scale Quantum |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| NQI | National Quantum Initiative |
| NQS | National Quantum Strategy |
| NQTP | National Quantum Technologies Programme |
| OZG | Onlinezugangsgesetz |
| PATSTAT | Patent Statistical Database |
| PCT | Patent Cooperation Treaty |
| PKW | Personenkraftwagen |
| QIS | Quantum Information Science |
| QKD | Quantum Key Distribution |
| R&D | Research and Development |
| RCA | Revealed Comparative Advantage |
| ReKliEs-De | Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland |
| SPRIND | Bundesagentur für Sprunginnovationen |
| TSMC | Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Ltd. |
| UBA | Umweltbundesamt |
| ÜBS | Überbetriebliche Berufsbildungsstätten |
| US | United States |
| USA | United States of America |
| USD | US-Dollar |
| VF | Veränderungsfaktor |
| VKU | Verband Kommunaler Unternehmen e. V. |
| WHG | Wasserhaushaltsgesetz |

| | |
|------------|---|
| WIPO | World Intellectual Property Organization |
| WRRL | Wasserrahmenrichtlinie |
| WZ | Wirtschaftszweige |
| ZEW | Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH Mannheim |

C 3 Glossar

Big Data

Der Begriff Big Data fasst technologische Entwicklungen im Bereich der Datenhaltung und -verarbeitung zusammen, die es ermöglichen, immer größere Datenmengen unterschiedlichster Formate zu integrieren und in immer kürzerer Zeit zu verarbeiten. Big Data bietet die Chance, die exponentiell steigenden Datenvolumina, die durch die zunehmende Ubiquität („Allgegenwart“) von IKT hervorgerufen werden, weiterhin zu beherrschen und vor allem wertschöpfend einzusetzen.

Bruttoinlandsprodukt

Als Bruttoinlandsprodukt (BIP) bezeichnet man den Wert aller erstellten Güter und Dienstleistungen einer Volkswirtschaft innerhalb eines Jahres. Das BIP ist ein Indikator für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft im internationalen Vergleich.

Cloud Computing

Cloud Computing (CC) bezeichnet das dynamisch an den Bedarf angepasste Anbieten, Nutzen und Abrechnen von IT-Dienstleistungen über das Internet, so eine Definition des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik. Angebot und Nutzung dieser Dienstleistungen erfolgen dabei ausschließlich über definierte technische Schnittstellen und Protokolle. Die Spannweite der im Rahmen von CC angebotenen Dienstleistungen umfasst das komplette Spektrum der Informationstechnik und beinhaltet u. a. die Infrastruktur (z. B. Rechenleistung, Speicherplatz), Plattformen und Software.

Cluster

Wirtschaftliche Cluster sind Agglomerationen und Kooperationsnetzwerke aus Wirtschafts- und Wissenschaftsakteuren in FuE und Produktion, die sich zumeist durch eine inhaltliche und räumliche Nähe der Akteure zueinander auszeichnen.

CO₂-Grenzausgleich

Ein CO₂-Grenzausgleich soll eine Verlagerung CO₂-intensiver Produktionen ins Ausland verhindern. CO₂-intensive Importe werden hierzu mit einer CO₂-Steuer belegt oder es müssen für sie Emissionszertifikate erworben werden. Die Höhe der Steuerzahlung bzw. die Anzahl der Zertifikate richtet sich nach den bei der Produktion entstandenen Emissionen. Die Wettbewerbsfähigkeit CO₂-armer inländischer Industrie kann auf diese Weise erhalten werden.

CRISPR

Das CRISPR-System (kurz für den englischen Begriff: Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) ist ein Verfahren der Genom-Editierung, mit dem die Gensequenz eines Organismus gezielt geschnitten werden kann, um sie an dieser Stelle zu verändern.

Dekarbonisierung

Dekarbonisierung beschreibt die Umstellung des Energiesystems von kohlenstoffhaltigen, fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energien.

Demografische Alterung

Demografische Alterung ist eine Veränderung der Altersstruktur der Bevölkerung zugunsten älterer Altersgruppen.

Digitale Infrastrukturen

Digitale Infrastrukturen sind Infrastrukturen, die auf Informations- oder Kommunikationstechnologien basieren. Digitale Infrastrukturen sind Grundlage für die digitale Transformation (vgl. dort).

Digitale Transformation

Die fortlaufende Weiterentwicklung und Anpassung von digitaler Technologie sowie die Verbreitung innerhalb der Gesellschaft, in der Industrie und in Unternehmen wird als digitale Transformation beschrieben. Durch die digitale Transformation können betriebliche Abläufe optimiert, neue

Geschäftsmodelle entwickelt und durch Apps, digitale Plattformen zur Kommunikation und virtuelle Arbeitsformen vereinfacht werden.

Dual Use

Dual Use bzw. Dual-Use-Güter (Güter mit doppeltem Verwendungszweck) sind Waren, Software und Technologie, die üblicherweise für zivile Zwecke verwendet werden, darüber hinaus jedoch auch im militärischen Bereich verwendet werden können.

Elektrofahrzeuge

Elektrofahrzeuge sind Fahrzeuge, die ausschließlich mit einem Elektromotor ausgestattet sind und ihre Energie aus einer Batterie im Fahrzeug, die über das Stromnetz aufgeladen wird, beziehen.

Energieeffizienz

Energieeffizienz ist das Maß für den Energieaufwand zur Erreichung eines festgelegten Nutzens. Die Energieeffizienz ist umso höher, je geringer die Energieverluste für das Erreichen des jeweiligen Nutzens sind.

Erfüllungsaufwand

Die der Bevölkerung, der Wirtschaft und der Verwaltung entstehenden messbaren Kosten und Zeitkosten der Befolgung einer Vorschrift bezeichnet man als Erfüllungsaufwand.

EU-27

Als EU-27 werden die 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union bezeichnet.

Europäischer Emissionshandel (EU-ETS)

Seit 2005 ist das europäische Emissionshandelsystem (EU-ETS) das zentrale Element der EU zum Klimaschutz. Ziel ist die Reduktion von Treibhausgas-Emissionen durch einen Handel mit CO₂-Zertifikaten. Ein CO₂-Zertifikat berechtigt zum Ausstoß von einer Tonne CO₂-Äquivalent. Die Zertifikate werden auf dem Markt frei gehandelt, sodass sich ein Preis ergibt, der Unternehmen einen Anreiz geben soll, Treibhausgas-Emissionen einzusparen. Bisher beteiligen sich die Energiewirtschaft, energieintensive Industrien, der Luftverkehr sowie seit 2024 der Seeverkehr am EU-ETS.

Externe Effekte

Ein externer Effekt liegt vor, wenn sich die Konsum- oder Produktionsentscheidung eines Wirtschaftssubjektes auf den Nutzen anderer Wirtschaftssubjekte auswirkt. Technologische Externalitäten

liegen vor, wenn anderen Wirtschaftssubjekten ein Vor- oder Nachteil entsteht, ohne dass dieser dem Verursacher über das Preissystem zugutekommt oder angelastet wird.

Forschung und Entwicklung (FuE)

Forschung und Entwicklung (FuE) sowie Forschung und Innovation (F&I, vgl. dort) werden nicht synonym verwendet. Das sogenannte Frascati-Handbuch der OECD (vgl. dort) definiert FuE als systematische, schöpferische Arbeit zur Erweiterung des Kenntnisstandes – auch mit dem Ziel, neue Anwendungen zu finden. Der Begriff FuE umfasst die drei Bereiche Grundlagenforschung, angewandte Forschung und experimentelle Entwicklung.

FuE-Intensität

Als FuE-Intensität bezeichnet man den Anteil der Ausgaben für Forschung und Entwicklung (FuE, vgl. dort) am Umsatz eines Unternehmens oder einer Branche bzw. am Bruttoinlandsprodukt eines Landes.

Forschung und Innovation (F&I)

Forschung und Innovation (F&I) sowie Forschung und Entwicklung (FuE, vgl. dort) werden nicht synonym verwendet. FuE stellt nur einen Teilaspekt der F&I-Aktivitäten dar. Innovationen beinhalten gemäß der Definition im Oslo-Handbuch der OECD die Einführung von neuen oder wesentlich verbesserten Produkten (Güter und Dienstleistungen) oder Prozessen.

Frascati-Handbuch

Das sogenannte Frascati-Handbuch der OECD enthält methodische Vorgaben für die Erhebung und Analyse von Daten zu Forschung und Entwicklung. Im Jahr 1963 trafen sich erstmals Expertinnen und Experten der OECD mit Mitgliedern der NESTI-Gruppe (National Experts on Science and Technology Indicators) in Frascati, Italien, um wesentliche Begriffe wie Forschung und Entwicklung zu definieren. Das Resultat dieser Gespräche wurde als erstes Frascati-Handbuch bekannt. Seither ist das Frascati-Handbuch mehrmals überarbeitet worden. Die jüngste Ausgabe stammt aus dem Jahr 2015.

Geistiges Eigentum

Geistiges Eigentum bezeichnet Rechte an immateriellen Gütern wie Ideen, Konzepten oder Erfindungen. Diese Güter sind rechtlich geschützt, wenn die Rechtsordnung z. B. durch Patente oder Urheberrechte entsprechende Rechte zuweist. Inhaber

rin bzw. Inhaber eines solchen Rechts ist z.B die Anmelderin oder der Anmelder eines Patents oder die Schöpferin bzw. der Schöpfer eines urheberrechtlichen Werks.

Governance

Governance bezeichnet das Steuerungs- und Regelungssystem im Sinne von Strukturen (Aufbau- und Ablauforganisation) einer politisch-gesellschaftlichen Einheit wie Staat, Verwaltung, Gemeinde, privaten oder öffentlichen Organisationen. Häufig wird der Begriff auch im Sinne von Steuerung oder Regelung einer jeglichen Organisation (etwa einer Gesellschaft oder eines Betriebes) verwendet.

Hightech-Strategie (HTS)

Die Hightech-Strategie (HTS) war in den vergangenen vier Legislaturperioden der Politikansatz der Bundesregierung zur Integration der Innovationsförderung über alle Bundesministerien hinweg. In jeder dieser Legislaturperioden wurde ein Strategiepapier vorgelegt. Die Hightech-Strategie 2025 war das Strategiepapier der letzten Legislaturperiode und wurde im September 2018 vom Bundeskabinett beschlossen.

Infant Industries

Infant industries sind junge Industrien bzw. neue Wirtschaftszweige innerhalb einer Volkswirtschaft. Diese sind in ihren frühen Entwicklungsstadien zumeist noch nicht in der Lage, mit bereits etablierten Wettbewerbern in anderen Volkswirtschaften zu konkurrieren. Infant industries benötigen daher die Unterstützung des Staates durch direkte Förderung oder Abschirmung gegenüber Konkurrenz von außen – üblicherweise durch Subventionen oder Zölle.

Informationsasymmetrie

Informationsasymmetrien liegen vor, wenn eine Marktseite besser informiert ist als die andere. Dies tritt beispielsweise bei der Finanzierung von F&I-Tätigkeiten durch Dritte auf. Externe Kapitalgeber können die Erfolgchancen von F&I-Projekten weniger verlässlich einschätzen als die F&I-aktiven Unternehmen.

Innovationssystem

Ein Innovationssystem ist ein Netzwerk von Institutionen im öffentlichen und privaten Sektor, deren Aktivitäten und Wechselwirkungen neue Technologien initiieren, modifizieren und unterbreiten. Dabei hängen die Geschwindigkeit des technischen

Wandels in den verschiedenen Ländern und die Effektivität der Unternehmen im weltwirtschaftlichen Wettbewerb nicht nur vom Ausmaß der FuE und anderer technischer Aktivitäten ab, sondern werden auch von der Art und Weise beeinflusst, mit der die verfügbaren Ressourcen sowohl durch die Unternehmen selbst als auch auf nationaler Ebene gemanagt und organisiert werden (Freeman 1987).

Innovatorenquote

Die Innovatorenquote bemisst den Anteil der Unternehmen an allen Unternehmen, der im zurückliegenden Dreijahreszeitraum zumindest eine Produktinnovation (d. h. neues oder merklich verbessertes Produkt) oder eine Prozessinnovation (d. h. neuer oder merklich verbesserter Prozess) eingeführt hat.

Internet der Dinge (Internet of Things)

Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in Alltagsgegenständen hat die Verbindung von realer und virtueller Welt hergestellt. Diese Vernetzung von Geräten mit Menschen wird als das Internet der Dinge oder auch Internet der Dinge und Dienste bezeichnet. Beispiele sind eingebettete Computersysteme, die in Kleidungsstücken die Vitalfunktionen des Trägers oder der Trägerin überwachen, aufgedruckte Chipcodes, die die Paketverfolgung über das Internet erlauben, und Kühlschränke, die autonom die Nachbestellung von Nahrungsmitteln bei sinkendem Vorratsbestand regeln.

Interoperabilität

Unter Interoperabilität versteht man die Fähigkeit eines Systems, mit anderen Systemen ohne Zugriffsbeschränkungen oder weitere Barrieren zu interagieren und sinnerhaltend Informationen auszutauschen.

Kausalanalyse

Unter Kausalanalyse werden statistische Verfahren zur Ermittlung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen verschiedenen Größen verstanden. In der Politikanalyse wird die Kausalanalyse verwendet, um festzustellen, ob und in welchem Ausmaß eine bestimmte Intervention wie etwa eine F&I-politische Maßnahme (die unabhängige Größe) einen direkten Effekt auf das gewünschte Ergebnis (die abhängige Größe) hat.

Kompetenz

Unter Kompetenz lässt sich die Fähigkeit und Fertigkeit eines Individuums zur Bewältigung eines spezifischen Problems oder Problembereichs fassen sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösung variabel einsetzen zu können. Kompetenz ist immer auf ein spezifisches Anwendungsfeld bezogen. Daher wird oft eine Bezugsbezeichnung vorangestellt (z. B. KI-Kompetenz, soziale Kompetenz).

Künstliche Intelligenz (KI)

Mit dem Begriff künstliche Intelligenz werden Verfahren, Algorithmen und technologische Lösungen beschrieben, die es erlauben, bisher von Menschen ausgeführte komplexe Vorgänge auf lernende Maschinen und Software zu übertragen.

Lock-in-Effekt

Ein Lock-in-Effekt (abgeleitet vom englischen Begriff to lock in: einschließen, einsperren) liegt vor, wenn die Kosten eines möglichen Systemwechsels, etwa von einer Plattform zu einer anderen, den dabei zu erwartenden Zusatznutzen übersteigen.

Mannheimer Innovationspanel

Das Mannheimer Innovationspanel (MIP) ist die seit 1993 jährlich durchgeführte Innovationserhebung des ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung. Das MIP umfasst aber über die an Eurostat zu meldenden Daten hinaus auch Daten zu Unternehmen mit fünf bis neun Beschäftigten.

Marktversagen

Marktversagen ist eine Situation, bei der das Ergebnis einer Marktkoordination von der volkswirtschaftlich optimalen Allokation der Güter bzw. Ressourcen abweicht. Marktversagen kann durch Externalitäten, öffentliche Güter oder Informationsasymmetrien verursacht werden.

Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen (ML) zielt darauf ab, mithilfe von Lernalgorithmen und Daten komplexe Modelle zu trainieren, die anschließend auf neue, potenziell unbekannte Daten derselben Art angewendet werden.

Missionsorientierte F&I-Politik

Eine F&I-Politik gilt als missionsorientiert, wenn F&I-Aktivitäten gefördert werden, um politisch

definierte Ziele zu erreichen. Ein klassisches Beispiel hierfür ist das im Jahr 1961 gestartete Apollo-Programm der USA, das darauf abzielte, noch in den 1960er Jahren einen Menschen auf den Mond und wieder zurückzubringen. Während vor allem von den 1940er bis zu den 1960er Jahren technologieorientierte Missionen verfolgt wurden, fokussiert sich die F&I-Politik seit den 1990er Jahren stärker auf gesellschaftliche Problemfelder.

(Nicht-substituierbare) Komplementarität

Komplementarität beschreibt aus ökonomischer Perspektive die Idee, dass zwei Dinge sich ergänzen und gemeinsam einen höheren Mehrwert schaffen als die Summe der Werte, wenn die beiden einzeln genutzt werden. Nicht-substituierbare Komplementarität bedeutet, dass die Dinge, die sich zu einem höheren Mehrwert ergänzen, nicht durch Alternativen ersetzt werden können.

Ökonometrie

Die Ökonometrie ist eine zentrale empirische Disziplin der Wirtschaftswissenschaften. Sie bedient sich mathematisch-statistischer Methoden, um ökonomische Modelle auf Grundlage statistischer Daten zu überprüfen und Aussagen über ökonomische Zusammenhänge auf statistisch gesichertem Niveau zu machen.

Oslo-Handbuch

Das Oslo-Handbuch der OECD enthält Vorgaben für die statistische Erfassung von Innovationsaktivitäten. Dabei geht dieses Handbuch über den FuE-Begriff des Frascati-Handbuchs (vgl. dort) hinaus und differenziert zwischen unterschiedlichen Formen von Innovationen. Das Oslo-Handbuch ist die Grundlage der Community Innovation Surveys. Die jüngste Überarbeitung des Oslo-Handbuchs stammt aus dem Jahr 2018.

Projektträger

Projektträger unterstützen als administrierende Stellen die Projektförderung der Ressorts. Dies geschieht etwa durch fachliche und administrative Beratung der Antragstellerinnen und Antragsteller, die Vorbereitung von Förderentscheidungen, die Verwaltung der Fördermittel und das Controlling.

Skaleneffekte

Skaleneffekte bezeichnen Größenvorteile, die darin zum Ausdruck kommen, dass die Selbstkosten je Stück – d. h. die im Unternehmen für ein Produkt anfallenden Kosten – mit steigender Produktions-

menge sinken. Skaleneffekte erklären, warum viele Unternehmen nach Größe streben, indem sie neue Märkte erschließen oder andere Firmen aufkaufen.

Schlüsseltechnologie

Zur Identifikation von Schlüsseltechnologien können drei Kriterien herangezogen werden: breite Anwendbarkeit in einer Vielzahl von Technologiebereichen oder Branchen; starke, nicht-substituierbare Komplementarität (vgl. dort) zu einer Vielzahl anderer Technologien; hohes Potenzial für Leistungssteigerung bei einer Schlüsseltechnologie selbst und bei ihren Anwendungsbereichen.

Soziale Innovationen

Soziale Innovationen sind neue individuelle und kollektive Verhaltensweisen sowie Organisationsformen, die zur Lösung gesellschaftlicher oder wirtschaftlicher Probleme beitragen und damit einen gesellschaftlichen Mehrwert schaffen. Sie werden von unterschiedlichen Akteuren wie Einzelpersonen, Haushalten, Gruppen und Unternehmen entwickelt. Sie können, müssen aber nicht, mit technologischen Innovationen im Zusammenhang stehen.

Spillover

Spillover-Effekte treten in Forschung und Innovation in Form von Wissenstransfers auf, z. B. wenn ein Unternehmen A in der Lage ist, ökonomische Erträge aufgrund der FuE-Aktivitäten eines anderen Unternehmens B zu erzielen.

Spitzentechnologie

Als Güter der Spitzentechnologie werden diejenigen FuE-intensiven Güter (vgl. dort) bezeichnet, bei deren Herstellung jahresdurchschnittlich mehr als 9 Prozent des Umsatzes für Forschung und Entwicklung aufgewendet werden.

Sprunginnovationen

Sprunginnovationen sind Neuerungen, die in Märkten, Organisationen und Gesellschaften weitreichenden Wandel nach sich ziehen und große Wertschöpfungspotenziale eröffnen.

Start-ups

Als Start-ups bezeichnet man junge Unternehmen mit innovativen Geschäftsideen und hohen Wachstumspotenzialen.

Technologische Souveränität

Eine Volkswirtschaft ist in einer Technologie souverän, wenn sie diese Technologie, die wesentlich zu ihrer Wohlfahrt und Wettbewerbsfähigkeit beiträgt oder kritisch im Sinne systemischer Relevanz ist, selbst vorhalten, weiterentwickeln und bei ihrer Standardisierung mitwirken kann oder über die Möglichkeit verfügt, diese Technologie ohne einseitige Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen zu beziehen und anzuwenden.

Transnationale Patentanmeldungen

Transnationale Patentanmeldungen sind Anmeldungen in Patentfamilien mit mindestens einer Anmeldung bei der World Intellectual Property Organization (WIPO) über das PCT-Verfahren oder einer Anmeldung am Europäischen Patentamt. Für die exportorientierte deutsche Wirtschaft sind solche Patente von besonderer Bedeutung, weil sie den Schutz der Erfindung auch jenseits des Heimatmarktes betreffen.

Verarbeitendes Gewerbe

Das verarbeitende Gewerbe ist der weitaus größte Teil des industriellen Sektors, der alle Industriebranchen mit Ausnahme der Energiewirtschaft und des Baugewerbes umfasst. Prägende Branchen sind etwa das Ernährungsgewerbe, der Maschinenbau, die Herstellung von Kraftwagen/Kraftwagenteilen, die Herstellung von Metallserzeugnissen oder die chemische Industrie.

Vormarktlischer und marktlicher Bereich

Der vormarktlische Bereich beschreibt im Vergleich zum marktlichen Bereich die frühen Phasen einer Innovation, in denen die Entwicklung noch nicht so weit fortgeschritten ist, dass sie bereits auf dem Markt eingeführt wurde. Der marktliche Bereich bezeichnet dementsprechend die Entwicklungsphasen einer Innovation, die bereits weiter fortgeschritten sind.

Wagniskapital

Unter Wagnis- oder Risikokapital, auch Venture Capital genannt, versteht man das Startkapital für Existenzgründende und junge Unternehmen. Dazu zählen auch Mittel, die zur Stärkung der Eigenkapitalbasis kleinerer und mittlerer Unternehmen eingesetzt werden, damit diese expandieren und innovative, teilweise mit hohem Risiko behaftete Projekte realisieren können. Für die Kapitalgebenden ist die Investition von Wagniskapital ebenfalls mit hohem Risiko behaftet, daher der Begriff Risi-

kokapital. Beteiligungskapital in Form von Wagniskapital wird oftmals von speziellen Risikokapitalgesellschaften (Kapitalbeteiligungsgesellschaften) zur Verfügung gestellt. Man unterscheidet die Phasen Seed, Start-up und Later Stage.

Wertschöpfung

Wertschöpfung ist die Summe aller in einer Periode entstandenen Faktoreinkommen (Löhne, Gehälter, Zinsen, Mieten, Pachten, Vertriebsgewinne) der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und entspricht dem Volkseinkommen (Sozialprodukt). Im betrieblichen Sinne beinhaltet Wertschöpfung den Produktionswert je Periode abzüglich der in dieser Periode von anderen Unternehmen empfangenen Vorleistungen.

Wertschöpfungskette

Die Wertschöpfungskette beschreibt den Herstellungsprozess eines Produktes anhand der Tätigkeiten, die es vom Ausgangsmaterial bis zur Verwendung durchläuft. Zu den Stufen in dem Prozess zählen beispielsweise interne Logistik, Produktion, externe Logistik, Marketing und Verkauf sowie Service. Die Stufen können dabei arbeitsteilig organisiert und von verschiedenen Unternehmen übernommen werden.

Zukunftstechnologie

Eine Zukunftstechnologie ist eine Technologie, die eine für den Markt hohe Relevanz aufweist und über ein für die Zukunft hohes Wachstumspotenzial verfügt.

C4 Aktuelle Studien zum deutschen Innovationssystem

Im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) werden regelmäßig Studien zu innovationspolitisch relevanten Themen erarbeitet. Sie sind im Rahmen der Reihe „Studien zum deutschen Innovationssystem“ über die Homepage der EFI (www.e-fi.de) zugänglich. Die Ergebnisse fließen in das Gutachten der Expertenkommission ein.

1-2025

Kerst, C.; Meier, D. H. (2025): Bildung und Qualifikation als Grundlage der technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

2-2025

De Monte, E.; Ehlich, J.; Gottschalk, S. (2025): Unternehmensdynamik in der Wissenswirtschaft in Deutschland 2023. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

3-2025

Schiersch, A.; Danne, C.; Paul, I. (2025): FuE-intensive Industrien und wissensintensive Dienstleistungen im internationalen Vergleich. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

4-2025

Schütz, M.; Ploder, M.; Polt, W.; Kattel, R.; Czarnitzki, D. (2025): Zeit für eine Industriepolitik in Deutschland? Eine Auseinandersetzung mit Rechtfertigungen, Risiken und Rahmenbedingungen. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

5-2025

Otto, A. (2025): Deutschlands Regionen in der digitalen und ökologischen Transformation. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

6-2025

Brökel, T. (2025): Die Förderung der Digitalisierung und Dekarbonisierung in Deutschland – Eine Analyse des Förderkatalogs. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

7-2025

Schmaltz, T.; Endo, C.; Eßwein, R.; Groth, J.; Gruber, S.; Kroll, H.; Molina Vogelsang, M.; Neuhäusler, P.; Weymann, L. (2025): Quantentechnologien und Quanten-Ökosysteme. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

8-2025

Luetkemeier, R.; Awad, A. (2025): The Status of Global Freshwater Resources. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

9-2025

Niederste-Hollenberg, J.; Hillenbrand, T.; Greiwe, J.; Gruber, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Rothengatter, O.; Sartorius, C.; Schleich, J.; Walz, R. (2025): Innovationen in der Wasserwirtschaft. Patent-, Publikations-, Außenhandelsanalyse zur technologischen Leistungsfähigkeit der deutschen Wasserwirtschaft sowie (Innovations-)Ökonomische Betrachtungen von Wasserverschmutzung und Wasserknappheit. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin: EFI.

C5 Literaturverzeichnis

- Abernathy, W.J.; Utterback, J.M. (1978): Patterns of industrial innovation. *Technology review*. 80(7). S. 40–47.
- Acemoglu, D.; Autor, D.; Hazell, J.; Restrepo, P. (2022): Artificial intelligence and jobs. Evidence from online vacancies. *Journal of Labor Economics*. 40(S1). S293-S340.
- Aghion, P.; Howitt, P.W. (1997): *Endogenous growth theory*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Ajami, N.K.; Thompson, B.H.; Victor D.G. (2014): *Path to water innovation*. Washington, D.C.: The Brookings Institution.
- Arrow, K.J. (1962): Economic welfare and the allocation of resources for invention. In: Nelson, R.R.: *The rate and direction of inventive activity: Economic and social factors*. Princeton: Princeton University Press.
- Arute, F.; Arya, K.; Babbush, R.; Bacon, D.; Bardin, J.C.; Barends, R.; Biswas, R.; Boixo, S.; Brandao, F.G.S.L.; Buell, D.A.; Burkett, B.; Chen, Y.; Chen, Z.; Chiaro, B.; Collins, R.; Courtney, W.; Dunsworth, A.; Farhi, E.; Foxen, B.; Fowler, A.; Gidney, C.; Gius-tina, M.; Graff, R.; Guerin, K.; Habegger, S.; Harrigan, M.P.; Hartmann, M.J.; Ho, A.; Hoffmann, M.; Huang, T.; Humble, T.S.; Isakov, S.V.; Jeffrey, E.; Jiang, Z.; Kafri, D.; Kechedzhi, K.; Kelly, J.; Klimov, P.V.; Knysh, S.; Korotkov, A.; Kostritsa, F.; Landhuis, D.; Lindmark, M.; Lucero, E.; Lyakh, D.; Mandrà, S.; McClean, J.R.; McEwen, M.; Megrant, A.; Mi, X.; Michielsen, K.; Mohseni, M.; Mutus, J.; Naaman, O.; Neeley, M.; Neill, C.; Niu, M.Y.; Ostby, E.; Petukhov, A.; Platt, J.C.; Quintana, C.; Rieffel, E.G.; Roushan, P.; Rubin, N.C.; Sank, D.; Satzinger, K.J.; Smelyanskiy, V.; Sung, K.J.; Trevithick, M.D.; Vainsencher, A.; Villalonga, B.; White, T.; Yao, Z.J.; Yeh, P.; Zalcman, A.; Neven, H.; Martinis, J.M. (2019): Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*. 574(7779). S. 505–510.
- Autor, D. (2019): Work of the past, work of the future. *AEA Papers and Proceedings* (109).
- Bachmann, R.; Janser, M.; Lehmer, F.; Vonnahme, C. (2024): Disentangling the greening of the labour market. The role of changing occupations and worker flows. Essen: Ruhr Economic Papers.
- bayern photonics e.v.; optence e.v. (2018): Erhebung des Lehrangebotes mit Bezug zu den Quantentechnologien an deutschen Hochschulen und hochschulnahen Forschungseinrichtungen: VDI Technologiezentrum GmbH.
- BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2020): *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2020*. Bonn: BDEW.
- Bedtke, N. (2015): Netzgebundene Wasserinfrastruktursysteme unter dem Einfluss globaler und regionaler Wandlungsprozesse. In: Gawel, E.: *Die Governance der Wasserinfrastruktur*. Band 1: Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Optionen. Berlin: Duncker & Humblot.
- Bertschek, I.; Bonin, H.; Cantner, U.; Häussler, C.; Hölzle, K.; Requate, T. (2021): *Digitalisierung in Deutschland vorantreiben: mit einem Ministerium neuer Prägung*. Policy Brief. Nr. 2-2021. Berlin: EFI.
- Bertschek, I.; Bünstorf, G.; Cantner, U.; Häussler, C.; Schmidt, C.M.; Welter, F.; Dauchert, H.; Requate, T. (2024): Synergieeffekte zwischen ziviler und militärischer Forschung klug nutzen. *Wirtschaftsdienst*. 104(10). S. 677–682.
- BITKOM (2024): *Bitkom Länderindex 2024*. Methodenhandbuch.
- Blind, K. (2022): *Standards and innovation. What does the research say?* Vernier: International Organization for Standardization.
- BMU; UBA – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit; Umweltbundesamt (2017): *Wasserwirtschaft in Deutschland. Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen*. Dessau-Roßlau: BMU; UBA.
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): *Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss*. Berlin: BMUV.
- BMUV; UBA – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz; Umweltbundesamt (2022): *Die Wasserrahmenrichtlinie*.
- Gewässer in Deutschland 2021 – Fortschritte und Herausforderungen. Bonn-Dessau-Roßlau: BMUV; UBA.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): *Erster Bericht der Bundesregierung zum Gesamtdeutschen Fördersystem für strukturschwache Regionen. Bestandsaufnahme und Fortschrittsbericht der regionalen Strukturförderung in Deutschland*. Berlin: BMWi.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): *Transformation zu einer klimaneutralen Industrie: Grüne Leitmärkte und Klimaschutzverträge. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)*. Berlin: BMWK.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): *Industriepolitik in der Zeitenwende. Industriestandort sichern, Wohlstand erneuern, Wirtschaftssicherheit stärken*. Berlin: BMWK.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024a): *Draghi-Bericht zur Zukunft der Wettbewerbsfähigkeit der EU. Schlaglichter der Wirtschaftspolitik 10/24*: BMWK.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024b): *Gleichwertigkeitsbericht der Bundesregierung 2024. Für starke und lebenswerte Regionen in Deutschland*. Berlin: BMWK.
- Boeing, F.; Marx, F. (2023): *Klimafolgestudie für das DVGW-Innovationsprogramm „Zukunftsstrategie Wasser“*. Bonn: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ.
- Bogobowicz, M.; Dutta, K.; Gschwendtner, M.; Heid, A.; Issler, M.; Mohr, N.; Soller, H.; Zimmel, R.; Zhang, A. (2024): *Quantum technology monitor 2024*: McKinsey & Company.
- Brackemann, H.; Epperlein, K.; Grohmann, A.; Höring, H.; Kühleis, C.; Lell, O.; Rechenberg, J.; Weiß, N. (2000): *Liberalisierung der deutschen Wasserversorgung – Auswirkungen auf den Gesundheits- und Umweltschutz. Skizzierung eines Ord-*

nungsrahmens für eine wettbewerbliche Wasserwirtschaft. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Brander, J.A.; Spencer, B.J. (1985): Export subsidies and international market share rivalry. *Journal of International Economics*. 18(1–2). S. 83–100.

Brixy, U.; Janser, M.; Mense, A. (2023): Auszubildende entscheiden sich zunehmend für Berufe mit umweltfreundlichen Tätigkeiten. IAB-Kurzbericht.

Brökel, T. (2025): Die Förderung der Digitalisierung und Dekarbonisierung in Deutschland – Eine Analyse des Förderkatalogs. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 6-2025. Berlin: EFI

Büchel, J.; Scheufen, M.; Engels, B. (2025): Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland. Digitalisierungsindex 2024. Langfassung der Ergebnisse des Digitalisierungsindex im Projekt „Entwicklung und Messung der Digitalisierung der Wirtschaft am Standort Deutschland“.

BUND – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (2019): Die Wasserentnahmeentgelte der Länder. Berlin: BUND.

Bundesrechnungshof (2023): Bericht nach § 88 Absatz 2 BHO an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages. Beratungen zum Entwurf des Wirtschaftsplans 2024 für den Klima- und Transformationsfonds. Bonn: Bundesrechnungshof.

Bundesrechnungshof (2024): Bericht nach § 88 Absatz 2 BHO an den Rechnungsprüfungsausschuss des Haushaltsausschusses des Deutschen Bundestages. 29. Subventionsbericht der Bundesregierung. Steuervergünstigungen. Bonn: Bundesrechnungshof.

Burger, A.; Bretschneider, W. (2021): Umweltschädliche Subventionen in Deutschland. Aktualisierte Ausgabe 2021. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Burk, M.; Grindel, C.; Hetze, P. (2022): Transferkompass. Essen: Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V.

Cai, J.; Leung, P.; Hishamunda, N. (2009): Assessment of comparative advantage in aquaculture. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

CEN-CENELEC Focus Group on Quantum Technologies (2023): Standardization roadmap on quantum technologies: Cen-Cenelec.

Centre on Regulation in Europe (2024): Ambitions for Europe 2024–2029. Harnessing regulation to boost the Twin Transition. CERRE White Paper

Criscuolo, C.; Gonne, N.; Kitazawa, J.; Lalanne, G. (2022): An industrial policy framework for OECD countries: old debates, new perspectives. OECD Science, Technology and Innovation Policy Papers. No. 127.

CSU; Freie Wähler – Christlich-Soziale Union in Bayern; Landesvereinigung Freie Wähler Bayern (2023): Freiheit und Stabilität. Für ein modernes weltoffenes und heimatverbundenes Bayern: CSU; Freie Wähler.

Dengler, K.; Matthes, B. (2018): Substituierbarkeitspotenziale von Berufen. Wenige Berufsbilder halten mit der Digitalisierung Schritt: IAB-Kurzbericht.

Destatis – Statistisches Bundesamt (2022): Erhebung der Güter und Leistungen für den Umweltschutz. Qualitätsbericht: Destatis.

Deutscher Bundestag (2010): Unterrichtung durch die Bundesregierung: Achtzehntes Hauptgutachten der Monopolkommission 2008/2009. Drucksache 17/2600.

Deutscher Bundestag (2021): Schriftliche Fragen mit den in der Woche vom 20. September 2021 eingegangenen Antworten der Bundesregierung. Drucksache 19/32556.

Deutscher Bundestag (2024): Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage der Abgeordneten Ralph Lenkert, Ina Latendorf und Dr. Gesine Löttsch, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. Drucksache 20/11035.

DGB (2024): Arbeitsmarkt-Drehscheiben: Unter welchen Bedingungen die Gestaltung der Transformation am Arbeitsmarkt gelingen kann. Informationen zum Sachstand und zur möglichen Weiterentwicklung. Nr. 03/ Oktober 2024 DGB Abteilung Arbeitsmarktpolitik: DGB.

Die Bundesregierung (2018): Forschung und Innovation für die Menschen – Die Hightech-Strategie 2025. Berlin: Die Bundesregierung.

Die Bundesregierung (2023): Zukunftsstrategie Forschung und Innovation. Kurzfassung. Berlin: Die Bundesregierung.

Dietrich, H.; Fitzenberger, B.; Janssen, S.; Kruppe, T.; Lang, J.; Leber, U.; Osiander, C.; Seibert, H.; Stephan, G. (2023): Reform der Weiterbildungsförderung Beschäftigter nach § 82 des Dritten Buches Sozialgesetzbuch (SGB III) – Weiterbildungsgesetz: IAB-Stellungnahme.

DIHK – Deutsche Industrie- und Handelskammer (2023): Innovationsbremsen lösen. DIHK-Innovationsreport 2023. Berlin: DIHK.

DIHK – Deutsche Industrie- und Handelskammer (2024): Deutsche Wirtschaft verliert den Anschluss. DIHK-Konjunkturumfrage Herbst 2024. Berlin: DIHK.

Draghi, M. (2024a): The future of European competitiveness. Part A. A competitiveness strategy for Europe.

Draghi, M. (2024b): The future of European competitiveness. Part B. In-depth analysis and recommendations.

DWA; DVGW – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2021): Water Innovation Circle. Hennef, Bonn: DWA; DVGW.

DWA; DVGW – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2023): Roadmap 2030 – Handlungsagenda für die Zukunft der Wasserwirtschaft: DWA; DVGW.

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2009): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit 2009. Berlin: EFI.

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2015): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands. Berlin: EFI.

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2017): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2017. Berlin: EFI.

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2019): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2019. Berlin: EFI.

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2021): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2021. Berlin: EFI.

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

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2023): Gutachten zu Forschung Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2023. Berlin: EFI.

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2024): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2024. Berlin: EFI.

Euler, J. (2020): Wasser als Gemeinsames. Potenziale und Probleme von Commoning bei Konflikten der Wasserbewirtschaftung. Bielefeld: transcript Verlag.

- Europäische Kommission (2024): European innovation scoreboard 2024 – country profile Germany. Brüssel: Europäische Kommission.
- Europäisches Parlament (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. 2000/60/EG.
- Europäisches Parlament (2013): Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik.
- Europäisches Parlament (2024): Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung). 2022/0345 (COD).
- Fackler, T.; Falck, O.; Goldbeck, M.; Hans, F.; Hering, A. (2024): The greener, the higher. Labor demand of automotive firms during the green transformation: CESifo Working Paper.
- Fährmann, P.K.; Meyer, J.J.; Eisert, J. (2022): Quantencomputer heute und in naher Zukunft: eine realistische Perspektive. In: Chancen und Risiken von Quantentechnologien. Hrsg.: Wilms, A.; Neukart, F. Springer Gabler. Wiesbaden. S. 47–58.
- Farhi, E.; Goldstone, J.; Gutmann, S. (2014): A quantum approximate optimization algorithm. arXiv preprint arXiv:1411.4028.
- Feynman, R.P. (1982): Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*. 21(6-7). S. 467–488.
- Filipp, S. (2022): Quantencomputer – Präzise Kontrolle über die Welt der Quanten. In: Chancen und Risiken von Quantentechnologien: Hrsg.: Wilms, Alissa; Neukart, Florian. Springer Gabler. Wiesbaden. 21-30.
- Frietsch, R.; Rammer, C.; Schubert, T.; Chavia, C.G.; Gruber, S.; Maruseva, V.; Walz, R. (2024): Innovationsindikator 2024. Berlin: BDI; Roland Berger; Fraunhofer ISI; ZEW.
- Fuest, C. (2023): Welche Industriepolitik Europa wirklich braucht. ifo Standpunkt Nr. 244. München: ifo Institut.
- Gawel, E.; Köck, W.; Fischer, H.; Möckel, S.; Platt, C.; Trela, K. (2017): Arzneimittelabgabe – Impflpflichtnahme des Arzneimittelsektors für Maßnahmen zur Reduktion von Mikroschadstoffen in Gewässern. Dessau-Roßlau: UBA.
- Gawel, E.; Strunz, S.; Holländer, R.; Lautenschläger, S.; Stumpf, L.; Jaschke, G.; Spillecke, H. (2021): Reform des Abwasserabgabengesetzes – mögliche Aufkommens- und Zahllasteffekte. Dessau-Roßlau: UBA.
- Google Quantum AI and Collaborators (2024): Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>.
- Gottschalk, S. (2023): Schließungen 2022 – Deutliche Zunahme im Verarbeitenden Gewerbe und bei innovativen Branchen. Mannheim: ZEW.
- Gottschalk, S. (2024): Unternehmensschließungen 2023 – Unternehmensschließungen 2023 – Starker Anstieg der Schließungszahlen im verarbeitenden Gewerbe. Mannheim: ZEW.
- Grienberger, K.; Matthes, B.; Paulus, W. (2024): Folgen des technologischen Wandels für den Arbeitsmarkt. Vor allem Hochqualifizierte bekommen die Digitalisierung verstärkt zu spüren: IAB-Kurzbericht.
- Grover, L.K. (1996): A fast quantum mechanical algorithm for database search. In: *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*.
- Haas, A.; Niebuhr, A.; Vetterer, N. (2024): Regionale Arbeitsmärkte unter Transformationsdruck – unterschiedliche Herausforderungen und Anpassungspotenziale. *Wirtschaftsdienst*. 104(8). S. 527–532.
- Härpfer, J.; Neuhauser, P. (2021): Einführung der „Klassifikation der Berufe 2010 – überarbeitete Fassung 2020“ in die Arbeitsmarktstatistiken. *Methodenbericht der Statistik der Bundesagentur für Arbeit*.
- Hayek, F.A. von (1945): The use of knowledge in society. *The American Economic Review*. 35(4). S. 519–530.
- Haywood, L.; Janser, M.; Koch, N. (2024): The welfare costs of job loss and decarbonization. Evidence from Germany’s coal phaseout. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*. 11(3). S. 577–611.
- Heinrich-Böll-Stiftung; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2025): *Wasseratlas 2025. Daten und Fakten über die Grundlage allen Lebens*. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung; BUND.
- Hohendanner, C.; Janser, M.; Lehmer, F. (2024): Betriebe in der ökologischen Transformation: IAB-Forschungsbericht.
- Holz, M.; Icks, A.; Nielsen, S. (2023): Analyse zur Bürokratiebelastung in Deutschland – Wie kann ein spürbarer Bürokratieabbau erreicht werden? Institut für Mittelstandsforschung Bonn. Bonn: ifm.
- IEA (2021): *Patents and the energy transition. Global trends in clean energy technology innovation*. Paris: IEA, EPO.
- ifo – ifo Institut für Wirtschaftsforschung (2024): ifo Geschäftsklimaindex gesunken. München: ifo.
- INSM – Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft (2024): Alarmierender Stellenabbau in Deutschland. Berlin: INSM.
- Institut der deutschen Wirtschaft (2021): *Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland. Kompetenzbarometer: Fachkräftesituation in Digitalisierungsberufen – Beschäftigungsaufbau und Fachkräftemangel. Eine Studie im Projekt (Nr. 3/19) „Entwicklung und Messung der Digitalisierung der Wirtschaft am Standort Deutschland“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)*.
- Janser, M. (2019): *The Greening of Jobs. Empirical Studies on the Relationship Between Environmental Sustainability and the Labor Market*.
- Kagermann, H.; Süssenguth, F.; Körner, J.; Liepold, A. (2020): *Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS*. München: Acatech.
- Klaus, A.; Kruppe, T.; Lang, J.; Roesler, K. (2020): *Geförderte Weiterbildung Beschäftigter. Trotz erweiterter Möglichkeiten noch ausbaufähig: IAB-Kurzbericht*.
- Kopka, A. (2024): *Zahlen & Fakten 02/2024. Künstliche Intelligenz in ländlichen Räumen*.
- Kraus, K.; Leuthold, S.; Reichart, A. (2015): *Wegweiser Beste Verfügbare Techniken Made in Germany. Machen Sie Ihre Umwelttechnik zum europäischen Maßstabl*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Kroll, H.; Berghäuser, H.; Blind, K.; Neuhäuser, P.; Scheifele, F. (2022): *Schlüsseltechnologien. Studien zum deutschen Innovationssystem*. Nr. 7-2022. Berlin: EFI.
- Krüger, E.; Borchardt, D.; Barthel, R. (2012): *Wasserforschung in Deutschland. – Schwerpunkte · Akteure · Kompetenzen*. Leipzig: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ.
- Kultusministerkonferenz (2020): *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020*. Berlin: Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland.
- Kussel, G.; Pavleka, S.; Schmidt, C.M. (2024): *Innovationssystem Deutschland. Effizienz und Agilität der öffentlichen Verwaltung erhöhen*. acatech STUDIE. München: Acatech.
- Loos, S.; Bickert, F.; Dotzel, M.; Tutschku, C.; Kaiser, S. (2024): *Potenziale und Bedarfe des Quantencomputing-Ökosystems. Ergebnisse einer internationalen Interviewstudie*. Hrsg.: Riedel, O.; Hölzle,

- K.; Bauer, W.; Bienzeisler, B. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Luetkemeier, R.; Ahmad, A. (2025): The Status of Global Freshwater Resources. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 8-2025. Berlin: EFI.
- Maldonado, J.E.; Vandeplas, A.; Vanyolos, I.; Viganì, M.; Turrini, A. (2024): Assessing green job dynamics in the EU. A comparison of alternative methodologies: Directorate General Economic and Financial Affairs (DG ECFIN).
- Martín-López, E.; Laing, A.; Lawson, T.; Alvarez, R.; Zhou, X.-Q.; O'Brien, J.L. (2012): Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using qubit recycling. *Nature Photonics*. 6(11). S. 773–776.
- Mazzucato, M.; Zapout, M. (2024): Rethinking the global water challenge through a common good lens. UCL Institute for Innovation and Public Purpose, Working Paper Series (IIPP WP 2024-06)(6).
- McClellan, J.R.; Romero, J.; Babbush, R.; Aspuru-Guzik, A. (2016): The theory of variational hybrid quantum-classical algorithms. *New Journal of Physics*. 18(2). S. 23023.
- McClellan, J.R.; Sung, K.J.; Kivlichan, I.D.; Cao, Y.; Dai, C.; Fried, E.S.; Gidney, C.; Gimby, B.; Gokhale, P.; Häner, T.; Hardikar, T.; Havlíček, V.; Higgott, O.; Huang, C.; Izaac, J.; Jiang, Z.; Liu, X.; McArdle, S.; Neeley, M.; O'Brien, T.; O'Gorman, B.; Ozfidan, I.; Radin, M.D.; Romero, J.; Rubin, N.; Sawaya, N.P.D.; Setia, K.; Sim, S.; Steiger, D.S.; Steudtner, M.; Sun, Q.; Sun, W.; Wang, D.; Zhang, F.; Babbush, R. (2020): OpenFermion. The Electronic Structure Package for Quantum Computers. *Quantum Science and Technology*(Volume 5, Issue 3).
- Möckel, S.; Gawel, E.; Kästner, M.; Knillmann, S.; Liess, M.; Bretschneider, W. (2015): Einführung einer Abgabe auf Pflanzenschutzmittel in Deutschland. Berlin: Duncker & Humblot.
- Müller, R.; Wilhelm, T. (2021): Unterrichtskonzeptionen zur Quantenphysik. Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. S. 335–368.
- Nelson, R.R. (1959): The simple economics of basic scientific research. *Journal of Political Economy*. 67(3). S. 297–306.
- Niederste-Hollenberg, J.; Hillenbrand, T.; Greiwe, J.; Gruber, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Rothengatter, O.; Sartorius, C.; Schleich, J.; Walz, R. (2025): Innovationen in der Wasserwirtschaft. Patent-, Publikations-, Außenhandelsanalyse zur technologischen Leistungsfähigkeit der deutschen Wasserwirtschaft sowie (Innovations-) Ökonomische Betrachtungen von Wasserverschmutzung und Wasserknappheit. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 9-2025. Berlin: EFI.
- NKR – Nationaler Normenkontrollrat (2017): Mehr Leistung für Bürger und Unternehmen. Verwaltung digitalisieren. Register modernisieren. Verfügbar am. 29. S. 2018.
- NKR – Nationaler Normenkontrollrat (2023): Stellungnahme von Malte Spitz, Mitglied des Nationalen Normenkontrollrates, zur Öffentliche Anhörung des Ausschusses für Inneres und Heimat des Deutschen Bundestages zum Gesetz zur Änderung des Onlinezugangsgesetzes sowie weiterer Vorschriften. Berlin: NKR.
- NKR – Nationaler Normenkontrollrat (2024): Gute Gesetze. Digitale Verwaltung. Weniger Bürokratie. Momentum nutzen, Wirkung steigern. Jahresbericht 2024.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2012): OECD-Umweltausblick bis 2050. Die Konsequenzen des Nichthandelns. Paris: OECD.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2015): Messung von wissenschaftlichen, technologischen und Innovationsfähigkeiten. Frascati-Handbuch 2015. Leitlinien für die Erhebung und Meldung von Daten über Forschung und experimentelle Entwicklung. Paris: OECD.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2022): Skills for the digital transition: Assessing recent trends using big data. Paris: OECD.
- OECD und Eurostat – Organisation for Economic Co-operation and Development; Eurostat (2018): Oslo-Handbuch 2018. Leitlinien für die Erhebung, Darstellung und Nutzung von Innovationsdaten. 4. Ausgabe. Paris: OECD und Eurostat.
- O'Kane, L.; Narasimhan, R.; Nania, J.; Taska, B. (2020): Digitalization in the German labor market. Analyzing demand for digital skills in job vacancies. Bertelsmann Stiftung.
- Otto, A. (2025): Deutschlands Regionen in der digitalen und ökologischen Transformation. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 5-2025. Berlin: EFI.
- Paulus, W.; Matthes, B. (2013): Klassifikation der Berufe. Struktur, Codierung und Umsteigeschlüssel. Nürnberg: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB).
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2023): Das neue Internationale Einheitensystem (SI). PTB-Infoblatt: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
- Pianta, M. (2014): An industrial policy for Europe. *Seoul Journal of Economics*. 27(3). S. 277–305.
- Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R.T.; Möslin, K.M.; Neuburger, R.; Neyer, A.-K. (2020): Die grenzenlose Unternehmung. Information, Organisation & Führung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- PRC Ministry of Science and Technology (2017): The „13th Five-Year“ special plan for S&T military-civil fusion development. China: PRC Ministry of Science and Technology.
- Preskill, J. (2018): Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*. 2. S. 79.
- Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024): Deutsche Wirtschaft im Umbruch – Konjunktur und Wachstum schwach. Berlin: DIW; ifo, IfW, IWH, RWI.
- Rammer, C.; Behrens, V.; Doherr, T.; Krieger, B.; Peters, B.; Schubert, T.; Trunschke, M.; Burg, J. von der (2020): Innovationen in der deutschen Wirtschaft. Indikatorenbericht zur Innovationserhebung 2019. Innovationsaktivitäten der Unternehmen in Deutschland im Jahr 2018, mit einem Ausblick für 2019 und 2020. Mannheim: ZEW.
- Rammer, C.; Schubert, T. (2024): Dokumentation zur Innovationserhebung 2023. Mannheim: ZEW.
- Reese, M.; Gawel, E.; Geyley, S. (2015): Die Nachhaltigkeitsgebote der Siedlungswasserwirtschaft – Kernziele, Grundvoraussetzungen und institutionelle Ansatzpunkte nachhaltiger Wasserver- und Abwasserentsorgung. In: Gawel, E. (Hrsg.): Die Governance der Wasserinfrastruktur. Band 1: Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Optionen. Berlin: Duncker & Humblot.
- Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (2017): ReKliEs-De_Ergebnisbericht. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Rodrik, D. (2008): Normalizing industrial policy. Working Paper No. 8. Washington, DC: Commission on Growth and Development.
- Rodrik, D. (2012): Why we learn nothing from regressing economic growth on policies. *Seoul Journal of Economics*. 25(2). S. 137–151.
- Roth, F.; Lindner, R.; Hufnagl, M.; Wittmann, F.; Yorulmaz, M. (2021): Lehren für künftige missionsorientierte Innovationspolitiken. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitforschung zur deutschen Hightech-Strategie – Band 1. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Sauer, J.; Strecker, D. (2003): Steigerung der Versorgungseffizienz auf Unternehmens- und Sektorebene — Unternehmensstrategien im Wassermarkt. *Journal for Public and Nonprofit Services*. 26(3).

- Scheele, U.; Holländer, R. (2019): Wasserwirtschaft im Wandel. In: Mühlenkamp, H.; Schulz-Nieswandt, F.; Krajewski, M.; Theuvsen, L.: Öffentliche Wirtschaft. Handbuch für Wissenschaft und Praxis. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.
- Schiersch, A.; Gehrke, B. (2014): Die Wissenswirtschaft im internationalen Vergleich. Strukturen, Produktivität, Außenhandel. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 6-2014. Berlin: EFI.
- Schmaltz, T.; Endo, C.; Eßwein, R.; Groth, J.; Gruber, S.; Kroll, H.; Molina Vogelsang, M.; Neuhäusler, P.; Weymann, L. (2025): Quantentechnologien und Quanten-Ökosysteme. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 7-2025. Berlin: EFI.
- Schramm, E.; Winker, M. (2023): Transformation der Wasserinfrastruktur im Siedlungsbestand als Herausforderung. Pfade, Instrumente und Entwicklungsbedarf. Frankfurt am Main: Institut für sozial-ökologische Forschung GmbH.
- Schulz, E.; Scharun, C. (2023): Bestimmungsfaktoren für landwirtschaftliche Bewässerungsbedarfe und regionale Governance-Ansätze zur Konfliktreduktion in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Grundwasser. 28(2). S. 189–205.
- Schütz, M.; Ploder, M.; Polt, W.; Kattel, R.; Czarnitzki, D. (2025): Industriepolitik. Studie zum deutschen Innovationssystem. Nr. 4-2025. Berlin: EFI.
- Shor, P.W. (1997): Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. SIAM Journal on Computing. 26(5). S. 1484–1509.
- Sogalla, R. (2023): Neuer europäischer Mechanismus für CO₂-Grenzausgleich. DIW-Wochenbericht 22/2023. S. 261-268.
- SPD; BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP). Berlin: SPD; BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN; FDP.
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2020): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020. Berlin: SRU.
- Stolper, W.F. (1991): The theoretical bases of economic policy. The Schumpeterian Perspective. Journal of Evolutionary Economics. 1(3). S. 189–205.
- Stüber, H. (2022): Berufsspezifische Lebensentgelte. Ein Studium garantiert nicht immer das höchste Lebensentgelt: IAB-Kurzbericht.
- SVR Wirtschaft – Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2019): Den Strukturwandel meistern. Jahresgutachten 19/20. Wiesbaden: SVR Wirtschaft.
- Tagesspiegel Background Digitalisierung & KI (2024): Innovationspolitik. „Das Bild von Deutschland hat erhebliche Dellen bekommen“. 23.02.2024.
- Teece, D.J. (1986): Profiting from technological innovation. Implications for integration, collaboration, licensing and public policy. Research Policy. 15(6). S. 285–305.
- The National Quantum Coordination Office (2023): Legislation supplementing the national quantum initiative act. USA: The National Quantum Coordination Office.
- Thöne, M. (2019): Evaluierung von Steuerergünstigungen. Ergebnisüberblick, Evaluationsschema, Methoden. FiFo-Berichte Nr. 28-0.
- Veronesi, F.; Hanafiah, M.M.; Pfister, S.; Huijbregts, M.A.J.; Pelletier, G.J.; Koehler, A. (2010): Characterization factors for thermal pollution in freshwater aquatic environments. Environmental Science & Technology. 44(24). S. 9364–9369.
- Wambach, A. (2023): Renaissance der Industriepolitik. Wirtschaftsdienst. 103(11).
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2024): Wasser in einer aufgeheizten Welt. Berlin: WBGU.
- Weber, M.; Rohrer, H. (2012): Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change. Combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive ‘failures’ framework. Research Policy. 41. S. 1037–1047.
- Weber, T.; Süßenguth, F. (2024): Innovationsfähigkeit in der Zeitenwende. acatech IMPULS. München: Acatech.
- Wehner, S.; Elkouss, D.; Hanson, R. (2018): Quantum internet. A vision for the road ahead. Science. 362(6412).
- Wengenmayr, R. (2022): Quantenrechner auf dem Sprung. In: Max Planck Forschung (2-2022). S. 72–78.
- Wiemer, S.; Schweitzer, R.; Paulus, W. (2011): Die Klassifikation der Berufe 2010 – Entwicklung und Ergebnis. Gastbeitrag. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, Wirtschaft und Statistik.
- Wilhelm, F.K.; Steinwandt, R.; Zeuch, D.; Lageyre, P.; Kirchhoff, Susanna (2024): Status of quantum computer development. Entwicklungsstand Quantencomputer. Bonn: Federal Office for Information Security (BSI).
- Wilson, J.; Wise, E.; Smith, M. (2022): Evidencing the benefits of cluster policies. Towards a generalised framework of effects. Policy Sciences. 55(2). S. 369–391.
- WIPO – World Intellectual Property Organization (2024): Global innovation index 2024. Unlocking the promise of social entrepreneurship. Genf: WIPO.
- Wunsch, A.; Liesch, T.; Broda, S. (2022): Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change. Nature Communications. 13(1). S. 322.
- Xinhua News Agency (2021): Outline of the People’s Republic of China 14th five-Year plan for national economic and social development and long-range objectives for 2035. China: Xinhua News Agency.

C 6 Endnotenverzeichnis

A 0

- 1 Vgl. Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024).
- 2 Vgl. Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024).
- 3 Vgl. Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024).
- 4 Vgl. DIHK (2024).
- 5 Vgl. ifo (2024).
- 6 Vgl. Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024).
- 7 Vgl. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/01/PD25_006_51.html (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 8 Kompaktklasse meint Fahrzeugmodelle, die sich oberhalb der Kleinwagen und unterhalb der Mittelklasse befinden.
- 9 Im Bericht von Gottschalk (2023) als „Hightech-Verarbeitendes Gewerbe insgesamt“ ausgewiesen.
- 10 Vgl. Gottschalk (2024), Gottschalk (2023).
- 11 Vgl. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/ford-stellenabbau-104.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 12 Vgl. INSM (2024).
- 13 Vgl. <https://www.handelsblatt.com/politik/konjunktur/konjunktur-bundesrepublik-vor-laengsterezession-der-geschichte/100087951.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024).
- 14 Vgl. zu dieser Thematik Kapitel B 1.
- 15 Vgl. OECD Main Science and Technology Indicators (<https://www.oecd.org/en/data/datasets/main-science-and-technology-indicators.html>) (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Die FuE-Ausgaben werden in kaufkraftbereinigten US-Dollar zu laufenden Preisen angegeben.
- 16 Vgl. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rd_e_gerdtot__custom_15042987/default/table?lang=en (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 17 Eigene Berechnungen. Für die verwendeten Daten siehe F&I-Dashboard der Expertenkommission (<https://www.e-fi.de/dashboard>), https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rd_e_gerdtot__custom_15042987/default/table?lang=en (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Für die Prozentpunkte der Veränderungswerte wurde der Mittelwert der Jahre 2022 und 2021 minus den Mittelwert der Jahre 2020 und 2019 der jeweiligen Region berechnet.

- 18 Eigene Berechnungen. Für die verwendeten Daten siehe F&I-Dashboard der Expertenkommission (<https://www.e-fi.de/dashboard>).
- 19 Vgl. EFI (2024: Kapitel B 4).
- 20 Vgl. EFI (2022: Kapitel B 1), F&I-Monitoring der Expertenkommission zu Schlüsseltechnologien (<https://www.e-fi.de/dashboard>).
- 21 Vgl. Rammer et al. (2020).
- 22 Vgl. F&I-Dashboard der Expertenkommission (<https://www.e-fi.de/dashboard>).
- 23 Bei den Kompositindikatoren ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse abhängig von der Auswahl der Einzelindikatoren sowie deren Gewichtung sind. Die Expertenkommission verweist trotz dieser Schwächen auf diese Ergebnisse, da die verschiedenen Studien in eine ähnliche Richtung weisen und in Politik und Öffentlichkeit große Aufmerksamkeit erfahren.
- 24 Vgl. Frietsch et al. (2024).
- 25 Dieses gute Ergebnis deckt sich mit den Analyseergebnissen zu den Patentaktivitäten Deutschlands beim Thema Dekarbonisierung im internationalen Vergleich aus Kapitel B 1 in diesem Gutachten.
- 26 Vgl. WIPO (2024).
- 27 Vgl. Europäische Kommission (2024).

A 1

- 28 Vgl. SPD et al. (2021).
- 29 Vgl. EFI (2024).
- 30 Vgl. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/scholz-wilhelmshaven-2154304> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 31 Vgl. SPD et al. (2021).
- 32 Vgl. Kussel et al. (2024), NKR (2023), <https://www.normenkontrollrat.bund.de/Webs/NKR/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/2024-02-23-bundestag-verabschiedet-ozg.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 33 Vgl. https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/datasets/desi/charts/desi-indicators?period=desi_2024&indicator=desi_fttp&breakdown=total_pophh&unit=pc_hh_all&country=AT,BE,BG,HR,CY,CZ,DK,EE,EU,FI,FR,DE,EL,HU,IE,IT,LT,LU,MT,NL,PL,PT,RO,SK,SI,ES,SE (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

- 34 Vgl. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/bundes-netzagentur-chef-klaus-mueller-es-droht-stress-im-stromnetz-110113860.html>, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/energie-weitere-wasserstoff-projekte-verzoegern-sich/100081770.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 35 Vgl. DIHK (2023), Holz et al. (2023), Rammer und Schubert (2024).
- 36 Der Index des Normenkontrollrates zeigt die Entwicklung des jährlichen Erfüllungsaufwands und der Bürokratiekosten der Wirtschaft seit 2011 an (Basiswert 0). Die durch rechtliche Vorschriften des Bundes verursachten Bürokratiekosten für die Wirtschaft gingen seit 2011 um 3,1 Milliarden Euro zurück. Der Erfüllungsaufwand stieg auf 7,3 Milliarden Euro an. Vgl. https://www.normenkontrollrat.bund.de/Webs/NKR/SharedDocs/Downloads/DE/Erfuellungsaufwand/tabelle_1_januar_2025.html?nn=145312 (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 37 Vgl. <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2024/kw27-de-medizinforschungsgesetz-1011536>, <https://www.vfa.de/de/arsneimittelforschung/medizinforschungsgesetz-chance-fuer-mehr-studien-mit-strahlenschutz-diagnostik-und-radiopharmaka-in-deutschland> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 38 Vgl. Tagesspiegel Background Digitalisierung & KI (2024).
- 39 Vgl. EFI (2024).
- A 2**
- 40 Vgl. EFI (2021: Kapitel B 1).
- 41 Vgl. auch Roth et al. (2021: 34 ff.).
- 42 Vgl. Die Bundesregierung (2018).
- 43 Vgl. Die Bundesregierung (2023).
- 44 Vgl. zur wissenschaftlichen Begleitung der High-tech-Strategie 2025 <https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/politik-gesellschaft/projekte/hf2025.html#123455831> (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Der Abschlussbericht des Forums #Zukunftsstrategie wird voraussichtlich Mitte März 2025 vorliegen. Es ist zudem ein Bilanzbericht der Bundesregierung vorgesehen, der im Frühjahr 2025 veröffentlicht werden soll.
- 45 Vgl. hierzu und im Folgenden EFI (2021: 50 f.).
- 46 Vgl. hierzu und im Folgenden EFI (2021: Kapitel B 1).
- 47 Diese Aufgaben könnten etwa in einem Regierungsausschuss für Innovation und Transformation, wie ihn die Expertenkommission in ihrem Jahresgutachten 2023 vorgeschlagen hat, geleistet werden. Vgl. EFI (2023: 22 f.). Alternativ könnte ein Staatssekretärsausschuss eingerichtet werden.
- 48 Vgl. EFI (2021: Kapitel B 1).
- 49 1998 wurden dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aus dem Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Bildung und Forschung die Zuständigkeiten für die indirekte Forschungsförderung, für die Förderung technologieorientierter Unternehmensgründungen und für die angewandte Energieforschung übertragen. Vgl. <https://www.gesetze-im-internet.de/bkorgel1998bek/BJNR328800998.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Es folgten 2005 die Zuständigkeiten für den Verkehr und die Raumfahrt, für Patente und die Erfinderförderung sowie für die Forschung und Entwicklung und die Innovation in der Wirtschaft, die KMU und die Unternehmensgründungen. Vgl. https://www.gesetze-im-internet.de/bkorgel_2005/BJNR319700005.html (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 50 Vgl. https://www.gesetze-im-internet.de/bkorgel_2021/BJNR517600021.html (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 51 Die Zuständigkeit für die Telekommunikation beinhaltet die diesbezügliche Fach- und Rechtsaufsicht über die Bundesnetzagentur, nicht aber die Zuständigkeiten für den Bereich der Post. Zuständigkeiten für die nationale, europäische und internationale Digitalpolitik beinhalten nicht die Zuständigkeiten für Start-ups. Der Digitalgipfel liegt in gemeinsamer Zuständigkeit. Vgl. https://www.gesetze-im-internet.de/bkorgel_2021/BJNR517600021.html (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 52 Vgl. https://www.gesetze-im-internet.de/bkorgel_2021/BJNR517600021.html (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 53 Vgl. hierzu und im Folgenden Bertschek et al. (2021).
- 54 Vgl. hierzu und im Folgenden EFI (2022: 55).
- 55 Im Rahmen der Gemeinschaftsdiagnose analysieren und prognostizieren fünf Wirtschaftsforschungsinstitute die wirtschaftliche Lage Deutschlands. Vgl. <https://gemeinschaftsdiagnose.de/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 56 Vgl. EFI (2022: Kapitel B 1).
- 57 Vgl. im Folgenden EFI (2022: Kapitel B 1).
- 58 Vgl. hierzu und im Folgenden EFI (2024: Kapitel A 2).
- 59 Der Bundesrechnungshof hat 2023 konstatiert, dass die Bundesregierung seit Errichtung des Klima- und Transformationsfonds mehr als ein

- Drittel der veranschlagten Mittel nicht verausgabt hat. Vgl. Bundesrechnungshof (2023).
- 60 Vgl. EFI (2022: 28). Mit Stand 31. August 2021 wurden knapp 3,5 Milliarden Euro in die Etats der Bundesministerien aufgenommen, davon jedoch erst weniger als 10 Prozent verausgabt. Vgl. Deutscher Bundestag (2021).
- 61 Hier kommt es auf den Einzelfall an. Es kann auch sein, dass beispielsweise ein Investitionszuschuss für CO₂-vermeidende Technologien erst dann die intendierte Wirkung entfaltet, wenn sich der CO₂-Preis deutlich erhöht hat.
- 62 Vgl. EFI (2021: 45).
- 63 Vgl. https://eurohpc-ju.europa.eu/about/discover-eurohpc-ju_en (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 64 Vgl. <https://www.htgf.de/de/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 65 Vgl. <https://startup-factories.de/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 66 Das Umweltbundesamt hat zuletzt im Jahr 2021 einen ausführlichen Bericht über umweltschädliche Subventionen erstellt. Vgl. Burger und Bretschneider (2021). Das FiFo Köln hat im Jahr 2019 in Kooperation mit dem ZEW, dem ifo Institut und dem Fraunhofer FIT eine Evaluierung von Steuervergünstigungen durchgeführt. Vgl. Thöne (2019).
- 67 Die Expertenkommission spricht sich, wie auch der Bundesrechnungshof, dafür aus, den Subventionsbegriff breiter zu fassen, als dies in den Subventionsberichten des Bundes geschieht. Vgl. Bundesrechnungshof (2024: 9 ff.).
- 68 Produkte der Grünen Gentechnik werden verfahrensbezogen reguliert und nicht auf Grundlage der Eigenschaften der Pflanze. Vgl. EFI (2024: Kapitel B1).
- 69 Die technischen Schwellenwerte, ab denen eine Sensitivitätsprüfung von Erdbeobachtungsdaten erfolgen muss, sind nicht mehr zeitgemäß. Vgl. EFI (2023: Kapitel B3).
- 70 Vgl. Draghi (2024b: 243).
- 71 Vgl. Weber und Süssenguth (2024: Kapitel 4).
- 72 Im Einzelnen sind in allen Verwaltungseinheiten ein permanentes Prozessmanagement zu etablieren, Prozessanalysen und Kosten-Nutzen-Rechnungen verstärkt zu teilen; digitale Verwaltungsleistungen nutzerzentriert zu gestalten und Nutzerperspektiven von Beginn der Gestaltung an einzubeziehen sowie verstärkt proaktive Verwaltungsleistungen zu etablieren; eine Cloudifizierungs-Strategie bei der Verwaltungsdigitalisierung zu verfolgen, die Weiterentwicklung der Deutschen Verwaltungscloud-Strategie entschieden voranzutreiben und die Teilnahme an Ausschreibungen für Fachverfahren an Cloud Readiness zu knüpfen. Vgl. Kussel et al. (2024).
- 73 Im Jahr 2024 lag Deutschland beim Government Index in Europa mit 66 Punkten unter dem Durchschnitt der EU-27 von 76 Punkten. Vgl. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-2024-egovernment-benchmark> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 74 Darüber hinaus sollte die Verwaltungsdigitalisierung auf kommunaler Ebene durch kommunale Spitzenverbände priorisiert, vorhandene digitale Verwaltungslösungen auf kommunaler Ebene verstärkt genutzt und die interkommunale Zusammenarbeit bei der Umsetzung digitaler Verwaltungsleistungen gestärkt werden. Zudem sollten kommunale IT-Dienstleister auf resiliente, nachhaltige und tragfähige Strukturen hin geprüft, eine Digitalisierungsstrategie in allen Verwaltungen etabliert und jeweils ein Chief Digital Officer (CDO) ernannt werden. Vgl. Kussel et al. (2024).
- 75 Zur Beschleunigung des Onlinezugangs und der Registermodernisierung ist es im Einzelnen erforderlich, ein nationales Once-Only-Technical-System zu entwickeln und ein Datenschutzcockpit voranzubringen, die Verwaltungsdigitalisierung stärker im Sinne des Ende-zu-Ende-Prinzips zu denken, verbindliche Ziele für die Erreichung des vierten OZG-Reifegrads zu definieren und Open-Source-Produkte bei Entwicklung im staatlichen Auftrag einzufordern; die Umsetzungsebene frühzeitig über einheitliche Kommunikationsplattform zu OZG-Themen und Registermodernisierung zu informieren sowie Kommunen bei OZG-Umsetzung strukturell zu unterstützen; Ziele und Fristen der Verwaltungsdigitalisierung mit einem durchsetzbaren Rechtsanspruch zu unterlegen, Schriftformerfordernisse weitestgehend aufzuheben und digitale Vertrauensdienste stärker zu etablieren; BundID als einheitliches Nutzerkonto für die öffentliche Verwaltung zu etablieren, zu bewerben und dessen Nutzung auch außerhalb der Verwaltung zu ermöglichen sowie den Digitaldienst Mein Unternehmenskonto für Verwaltungskontakte von Unternehmen als Digital-Only-Lösung zu implementieren. Vgl. Kussel et al. (2024).
- 76 Zur Etablierung innovationsfördernder Strukturen in der öffentlichen Verwaltung wäre es erforderlich, dem Thema der Verwaltungsmodernisierung eine größere politische Aufmerksamkeit zu widmen und zugleich in der Verwaltung ein Selbstverständnis als Dienstleister einzufordern, das Verwaltungsleistungen konsequent aus Nutzerperspektive betrachtet; Beschäftigten größere Freiheiten zu gewähren

- und Vertrauen entgegenzubringen, um Veränderungsprozesse anzustoßen und neue Arbeitsweisen auszuprobieren sowie Innovationsroutinen in den Verwaltungsalltag einzuführen; eine wechselseitige Feedbackkultur durch regelmäßig geführte Mitarbeitergespräche und Zielvereinbarungen zu etablieren, die Definition von Verantwortlichkeiten jenseits von Hierarchiegrenzen und eine gelebte Fehlerkultur; Freiräume für innovative Ideen in der Verwaltung zu schaffen, ebenen- und fächerübergreifende Zusammenarbeit strukturell zu verankern und Erfolge bei der ebenenübergreifenden Arbeit bei der Leistungsbeurteilung zu berücksichtigen. Vgl. Kussel et al. (2024).
- 77** Zur Beschaffung innovativer technologischer Lösungen ist es im Einzelnen angezeigt, die Entwicklung des GovTech-Ökosystems zu stärken, Transparenz bezüglich bestehender Angebote, Einsatzmöglichkeiten und Kosten durch öffentliche Marktplätze zu schaffen und Angebote auf öffentlichen Marktplätzen an die Einhaltung von Datenschutzstandards und die Bereitstellung offener Schnittstellen zu binden; klare Ziele für die strategische Beschaffung vorzugeben und diese in einer Beschaffungsstrategie zu verankern, Shared-Service-Center zur gemeinsamen Beschaffung kleiner Verwaltungseinheiten einzurichten oder die Beschaffung an externe Dienstleister auszulagern und verstärkt innovative Vergabemethoden und -instrumente zu verwenden; in der Beschaffung Beschäftigte zur Nutzung innovativer Beschaffungsmethoden weiterzubilden, neue Leistungsverzeichnisse mit spezifischen Leistungskriterien bzgl. innovativer Angebote und Anbieter zu definieren und bereits erfolgreiche Leistungsbeschreibungen zur Beschaffung von GovTech zu teilen. Vgl. Kussel et al. (2024).
- 78** Um die notwendigen personellen Kompetenzen zu sichern, gilt es im Einzelnen, eine strategische Personalplanung aufzusetzen, um gezielt Kompetenzbedarfe zu ermitteln und geeignete Maßnahmen zum Ausbau von Kompetenzen festzulegen und Kompetenzbedarfe als Basis für die breite Gestaltung von Stellenbeschreibungen heranzuziehen; die Vermittlung von Kompetenzen der Transformation und Digitalisierung in Ausbildung und Studium einzubinden und ausreichendes Lehrpersonal mit relevanten IT-Kenntnissen für die Hochschulen zu sichern; Weiterbildungsmaßnahmen auf die Vermittlung relevanter Kompetenzen bei Beschäftigten hin auszurichten; Mitarbeitergespräche zur Ermittlung von Qualifizierungsbedarfen zu nutzen und niederschwellige Austausch- und Wissensfor-
- mate zu bewerben; um Fachkräfte zu gewinnen; Merkmale wie Sinnstiftung und Gemeinwohl in Stellenbeschreibungen hervorzuheben, Stellen verstärkt extern auszuschreiben und tarifvertragliche Spielräume zur Anerkennung extern erworbener Berufserfahrungen auszuschöpfen. Vgl. Kussel et al. (2024).
- 79** Um Führungskräfte für den Wandel zu gewinnen, zu befähigen und zu entwickeln, ist es im Einzelnen erforderlich, notwendige Fach- und Führungskompetenzen in Stellenbeschreibungen zu definieren, Führungspositionen nicht einseitig mit Juristinnen und Juristen zu besetzen und Leitungspositionen verstärkt für verwaltungsexterne Bewerberinnen und Bewerber zu öffnen; die Beförderung zur Führungskraft an relevante Kompetenzen, nicht an Beschäftigungsdauer zu knüpfen, Leitungspersonal durch gezielte Führungskräfteentwicklung für den Wandel zu befähigen und Möglichkeiten des Wissensaustauschs durch Jobrotation oder Hospitation von Führungskräften und Beschäftigten anzubieten. Vgl. Kussel et al. (2024).
- 80** Derzeit befindet sich die digitale Visum- und Passbeantragung in der Pilotphase. Vgl. <https://www.auswaertiges-amt.de/de/service/auslandsportal-2538094> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 81** So ist gemäß § 10 Abs. 3 Satz 5 AufenthG der Spurewechsel nach Rücknahme eines Asylantrags nur für Personen möglich, die vor dem 29. März 2023 eingereist sind.
- 82** In diesen Fällen verlieren die Beschäftigten zumindest zu einem großen Teil ihre Pensionsansprüche. Um eine angemessene Altersversorgung beim freiwilligen Ausscheiden aus dem Beamtenverhältnis zu gewährleisten, haben der Bund und die meisten Bundesländer ein sogenanntes Altersgeld eingeführt. In einigen Bundesländern gibt es jedoch kein Altersgeld, sondern nur eine für die Betroffenen mit oft erheblichen Einbußen verbundene Nachversicherung in der Rentenversicherung.
- 83** Bei einer Beurlaubung kann eine Lücke in den beamtenrechtlichen Versorgungsansprüchen entstehen. Um die vorübergehende Tätigkeit von Beamtinnen und Beamten in der Privatwirtschaft zu vereinfachen, sollten die Möglichkeiten der Beurlaubung ausgebaut werden. Dabei sollte mittels standardisierter, anreizkompatibler Regelungen gewährleistet werden, dass der vorübergehende Arbeitgeber einen angemessenen Beitrag zur Kranken- und Altersversorgung der beurlaubten Person leistet, sodass ihr kein finanzieller Nachteil aus der Beurlaubung erwächst. Gemäß schriftlicher Auskunft des Deutschen Hochschulverbands vom 23.12.2024

wird die Zeit der Beurlaubung ohne Dienstbezüge grundsätzlich nicht als ruhegehaltfähige Dienstzeit anerkannt. Es gibt jedoch Ausnahmen. Regelungen der Länder sehen regelmäßig vor, dass die Zeit einer Beurlaubung ohne Dienstbezüge als ruhegehaltfähig berücksichtigt wird, wenn zugestanden wird, dass die Beurlaubung öffentlichen Belangen oder dienstlichen Interessen dient und dass für die Zeit der Beurlaubung ein Versorgungszuschlag gezahlt wird. Der Versorgungszuschlag beträgt in der Regel 30 Prozent der ohne die Beurlaubung zustehenden ruhegehaltfähigen Dienstbezüge. Er kann von der beurlaubten Beamtin oder von dem beurlaubten Beamten gezahlt, aber auch von einem Dritten – zum Beispiel dem privatrechtlichen Arbeitgeber – übernommen werden.

84 Vgl. Burk et al. (2022).

85 Unternehmen haben eigene Modelle entwickelt, um Professorinnen und Professoren durch eine Teilzeitbeschäftigung als Chief Scientists an ihr Unternehmen zu binden und den Wissenstransfer zwischen ihrer eigenen FuE und der universitären Forschung zu intensivieren. Ein Beispiel hierfür ist das Bosch Lighthouse Collaboration Program.

86 Vgl. EFI (2021: Kapitel B 3).

87 Das Pilotprojekt IP-Transfer 3.0, gestartet von der SPRIND mit Partnern, sieht vor, den Transfer von geistigem Eigentum in forschungsbasierte Start-ups durch ein Modell der virtuellen Beteiligung zu fördern. Dieses Modell beschränkt Anteile auf 10 Prozent und verzichtet auf Stimmrechte, um bürokratische Hürden abzubauen und die finanzielle Belastung der Start-ups zu reduzieren. Zusätzlich wurden Werkzeuge wie Musterverträge und Entscheidungshilfen entwickelt, um IP-Transfers zu erleichtern und die Verhandlungsdauer zu verkürzen. Vgl. https://www.sprind.org/magazin/ip_transfer (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

88 Vgl. EFI (2022: 41 f.)

89 Vgl. EFI (2024).

A 3

90 Vgl. Draghi (2024a), BMWK (2024a).

91 Die Digitalisierung hat bereits in den 1970er Jahren eingesetzt. Was in den 1990er und 2000er Jahren hinzukam, war die Vernetzung von Personen und Objekten. Sie ist entscheidend für die Entstehung neuer Handlungsräume und Geschäftsmodelle. Vgl. EFI (2016).

92 „Eine Volkswirtschaft ist in einer Technologie souverän, wenn sie diese Technologie, die wesentlich

zu ihrer Wohlfahrt und Wettbewerbsfähigkeit beiträgt oder kritisch im Sinne systemischer Relevanz ist, selbst vorhalten, weiterentwickeln und bei ihrer Standardisierung mitwirken kann oder über die Möglichkeit verfügt, diese Technologie ohne einseitige Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen zu beziehen und anzuwenden.“ EFI (2022). Ökonomische Souveränität bezeichnet die Möglichkeit einer Volkswirtschaft, Güter und Dienstleistungen ohne einseitige Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen beziehen und nutzen zu können.

93 Im Oktober 2023 trat das Europäische CO₂-Grenzausgleichssystem (CBAM) in Kraft. Der CO₂-Grenzausgleichsmechanismus ist ein Klimaschutzinstrument der EU. Ab 2026 werden bestimmte Importe in die EU mittels Grenzausgleichssystem mit einem Preis belegt, der sich an den CO₂-Emissionen dieser Importe orientiert. Bei der Einfuhr der betroffenen Waren muss ein CO₂-Preis in Form von CBAM-Zertifikaten gezahlt werden. Vgl. Sogalla (2023), <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Klimaschutz/co2-grenzausgleichsmechanismus.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

94 Vgl. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

95 Vgl. hierzu und im Folgenden Schütz et al. (2025).

96 Vgl. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/european-chips-act#:~:text=Was%20ist%20das%20europ%C3%A4ische%20Chip,die%20technologische%20Souver%C3%A4nit%C3%A4t%20der%20EU>, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/09/fact-sheet-chips-and-science-act-will-lower-costs-create-jobs-strengthen-supply-chains-and-counter-china/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Ein Beispiel für eine Maßnahme zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands ist die Fördermaßnahme GoBio next, mit der biotechnologische Forschungsprojekte mit hohem Kommerzialisierungspotenzial bis zu einem Reifegrad gefördert werden, der eine erfolgreiche Ausgründung bzw. eine nachhaltige Entwicklung des ausgegründeten Unternehmens ermöglicht. Vgl. <https://www.gobio.de/gobio/de/go-bio/go-bio-next/go-bio-next.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

97 Vgl. Schütz et al. (2025).

98 Vgl. Criscuolo et al. (2022).

99 Patente gewähren ihrem Eigentümer bzw. ihrer Eigentümerin ein zeitlich und räumlich begrenztes Monopol und stellen somit einen schwerwiegenden Markteingriff dar.

100 Vgl. OECD und Eurostat (2018), OECD (2015).

- 101 Vgl. Schütz et al. (2025).
- 102 Vgl. Schütz et al. (2025: 14), OECD (2015).
- 103 Die vertikale Industriepolitik erlebte ihren Höhepunkt nach dem Zweiten Weltkrieg. Als Beispiele seien genannt: die Verstaatlichung der brasilianischen Ölindustrie und die anschließende Gründung des Ölkonzerns Petrobras sowie der von der deutschen und der französischen Regierung initiierte Aufbau des Airbus-Konzerns. Vgl. Schütz et al. (2025).
- 104 Vgl. Pianta (2014).
- 105 Vgl. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/e-autos-aus-china-eu-erhebt-ausgleichszollsetzt-gesprache-fort-2024-10-30_de (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 106 Zur Bedeutung von Schlüsseltechnologien vgl. EFI (2022: Kapitel B 1).
- 107 Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressmitteilungen/2022/03/20220315-habeck-intel-investition-in-magdeburg-wichtiger-impuls-fur-wirtschaft-in-schwieriger-zeit-und-zentraler-sprung-fur-die-digitale-souveranitat-europas.html>, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/investitionsentscheidung-intel-2198332> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 108 Rent-Seeking beschreibt das Bestreben eines Unternehmens oder einer Gruppe von Unternehmen, sich mit Hilfe politischer Einflussnahme Vorteile bei der Erzielung von Einkommen zu verschaffen. Solche Vorteile können beispielsweise entstehen, wenn als Folge der politischen Einflussnahme Subventionen gewährt oder Marktzugangsbeschränkungen für ausländische Unternehmen eingeführt werden. Etablierte Unternehmen sind tendenziell eher in der Lage, erfolgreich Rent-Seeking zu betreiben, als Start-ups. Die begünstigten Marktakteure erzielen Einkommen, ohne sich den typischen Wettbewerbs- und Marktmechanismen zu stellen. In der Folge sinken für sie die Anreize, Innovationsaktivitäten durchzuführen. Der strukturelle Wandel wird dadurch verzögert.
- 109 Vgl. Schütz et al. (2025).
- 110 Die horizontale Industriepolitik bildete sich in den 1970er Jahren als Reaktion auf die seit dem Zweiten Weltkrieg dominierende vertikale Industriepolitik heraus. Sie erlebte ihren Höhepunkt in den 1980er und Anfang der 1990er Jahre. Hintergrund für den Wechsel zu einer horizontalen Industriepolitik war das seit den 1970er Jahren verlangsamte Wirtschaftswachstum sowie eine steigende Arbeitslosigkeit infolge des Strukturwandels. Mittels horizontaler Industriepolitik sollte die wirtschaftliche Modernisierung unterstützt werden. Vgl. Schütz et al. (2025).
- 111 Ordnungspolitik bezeichnet alle Institutionen, Gesetze und staatlichen Maßnahmen, mit denen die Rahmenbedingungen für wirtschaftliches Handeln organisiert werden. Ziel der klassischen Ordnungspolitik ist es, den Wettbewerb zu sichern und die Freiräume des Einzelnen für sein wirtschaftliches Handeln zu gewährleisten.
- 112 Vgl. Schütz et al. (2025).
- 113 Vgl. Rodrik (2008).
- 114 Vgl. Schütz et al. (2025), SVR Wirtschaft (2019).
- 115 Vgl. Schütz et al. (2025).
- 116 Dresden war bereits in der DDR das Zentrum der Mikroelektronik-Branche. Nach der Wiedervereinigung siedelten sich zahlreiche Unternehmen in der Region an. Das Netzwerk Silicon Saxony baut auf diesen Strukturen auf.
- 117 IPCEI sind länderübergreifende Vorhaben, die mittels staatlicher Förderung einen wichtigen Beitrag zu Wachstum, Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie und Wirtschaft leisten sollen. Seit 2018 sind zehn IPCEI u. a. zu Mikroelektronik, Wasserstoff und Medizintechnik gegründet worden. Die IPCEI werden von den beteiligten Unternehmen kofinanziert und verfolgen ambitionierte Ziele in Bezug auf F&I. Mit den IPCEI sollen positive Spillover-Effekte erzeugt sowie schwerwiegende Marktversagen behoben und gesellschaftliche Herausforderungen angegangen werden. Aus diesem Grund sind die IPCEI vom europäischen Beihilfeverbot ausgenommen. Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/IPCEI/faq-ipcei.html>; https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis_en (letzter Abruf am 16. Januar 2025) sowie BMWK (2023).
- 118 Vgl. Schütz et al. (2025).
- 119 Vgl. Schütz et al. (2025), https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/memo_13_497 (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 120 Vgl. Schütz et al. (2025).
- 121 Vgl. EFI (2021).
- 122 Vgl. <https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/>, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 123 Die Stärke des IRA liegt in seiner pragmatischen Ausrichtung, die einer großen Anzahl von Unternehmen in den USA eine unbürokratische Unterstützung in Aussicht stellt. Der Nachteil dieser pragmatischen Ausrichtung besteht darin, dass auch technologisch einfache Produkte wie Wärme-

pumpen oder Solarpaneele gefördert werden, bei denen vor allem Unternehmen aus Schwellenländern, nicht aber aus den USA, über Wettbewerbsvorteile verfügen.

- 124 Zentrale Unterschiede zwischen EGD und IRA sind, dass der IRA primär auf Subventionen in Form von Steuervergünstigungen setzt, während der EGD vor allem zinsgünstige Darlehen als Anreize für die Produktion nachhaltiger Technologien zur Verfügung stellt. Außerdem sieht der IRA stärker als der EGD eine einseitige Abschottung des heimischen Marktes durch sogenannte Buy-Local- und Domestic-Content-Vorgaben vor. Vgl. Schütz et al. (2025).
- 125 Vgl. Wilson et al. (2022), Schütz et al. (2025).
- 126 Vgl. hierzu und im Folgenden EFI (2021), Schütz et al. (2025).
- 127 Vgl. hierzu und im Folgenden EFI (2021), Schütz et al. (2025).
- 128 Skaleneffekte bezeichnen Größenvorteile, die darin zum Ausdruck kommen, dass die Selbstkosten je Stück – d. h. die im Unternehmen für ein Produkt anfallenden Kosten – mit steigender Produktionsmenge sinken. Von Verbundeffekten spricht man, wenn zwischen Entscheidungsbereichen (z. B. Aktivitäten auf verschiedenen Märkten) gegenseitige Abhängigkeiten vorliegen, die sich auf den Gesamterfolg auswirken. Netzwerkeffekte treten auf, wenn der individuelle Nutzen einer Aktivität oder eines Produkts von der Anzahl der Akteure abhängt, die die gleiche Aktivität betreiben oder das gleiche Produkt konsumieren.
- 129 Vgl. Brander und Spencer (1985).
- 130 Vgl. hierzu und im Folgenden Weber und Rohrer (2012), EFI (2021), Schütz et al. (2025).
- 131 Vgl. hierzu und im Folgenden Weber und Rohrer (2012), EFI (2021), Schütz et al. (2025).
- 132 Vgl. Hayek (1945), SVR Wirtschaft (2019).
- 133 Vgl. <https://makronom.de/ohne-strategische-industriepolitik-geht-es-nicht-45322> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 134 Siehe Subventionen für erneuerbare Energien (EEG), für Kohle und Bergbau, für Agrardiesel oder für Berufspendlerinnen und -pendler.
- 135 Vgl. Schütz et al. (2025).
- 136 Vgl. Schütz et al. (2025), SVR Wirtschaft (2019).
- 137 Vgl. Rodrik (2012), Schütz et al. (2025).
- 138 Vgl. SVR Wirtschaft (2019), Aghion und Howitt (1997).
- 139 Vgl. Fuest (2023), Wambach (2023).
- 140 Die Expertenkommission hat bereits in ihrem Jahresgutachten 2024 darauf verwiesen, dass eine kluge politische Begleitung des Strukturwandels darauf abzielt, Übergangsweise die Einkommen zu

erhalten, nicht aber die bestehenden Arbeitsplätze. Vgl. Stolper (1991).

- 141 Vgl. hierzu und im Folgenden EFI (2022: Kapitel B 1).

B 1

- 142 Nachfolgend wird zum besseren Verständnis der Begriff Dekarbonisierung stellvertretend für den Begriff Defossilisierung verwendet. Dekarbonisierung bezieht sich auf die Reduzierung von CO₂-Emissionen im Allgemeinen. Defossilisierung bezeichnet speziell den Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energiequellen. Defossilisierung ist präziser, da sie die Notwendigkeit betont, fossile Rohstoffe zu ersetzen, ohne Kohlenstoff generell zu verbannen, der für das Leben auf der Erde essenziell ist.
- 143 Bis zum Jahr 2030 sollen die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um mindestens 65 Prozent gemindert werden und bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 Prozent, Netto-Treibhausgasneutralität wird bis zum Jahr 2045 angestrebt und negative Treibhausgasemissionen nach dem Jahr 2050 (§ 3 Bundes-Klimaschutzgesetz).
- 144 Vgl. Otto (2025).
- 145 Vgl. Brökel (2025).
- 146 Die Patentanmeldungen wurden anhand der Erfinderadressen in der REGPAT-Datenbank den deutschen Kreisen zugeordnet. Die Definition der Technologiebereiche erfolgte anhand der CPC-Klassifikation, die um eine Stichwortsuche in Patenttiteln und -abstracts ergänzt wurde. Die verwendete Stichwortliste bildet bedeutende Untertechnologiebereiche in den Technologiebereichen Digitalisierung (vgl. Kroll et al. (2022)) bzw. Dekarbonisierung (vgl. IEA (2021)) ab. Die Stichwortliste im Bereich Digitalisierung umfasst: digital AND (communication OR information OR transmission OR processing OR comput*), 'computer tech*', 'communication tech*', 'information tech*', 'microelectr*', 'nanoelectr*', 'optoelectr*', 'quantum comput*', 'edge comput*', 'internet of things', 'near field communication', 'satellite communication', 'radio locat*', 'traffic control tech*', 'data manag*', 'data analytic*', 'data mining', 'text mining', 'artificial intelligence', 'deep learning', 'neural net*', 'machine learning', 'crypto*' AND 'tech*', 'network security'. Die Stichwortliste im Bereich Digitalisierung umfasst: 'decarbonization', 'low-carbon', 'climate change' AND ('mitigation' OR 'adaptation'), 'greenhouse gas emission' AND ('reduction' OR 'mitigation' OR 'capture' OR

- 'storage' OR 'sequestration' OR 'disposal'), 'green energy', 'clean energy', 'renewable energy', 'energy efficiency', 'carbon' AND ('capture' OR 'storage' OR 'sequestration' OR 'disposal'), 'zero-emission', 'solar energy', 'wind energy', 'geothermal energy', 'circular economy', 'pollution' AND ('control' OR 'reduction' OR 'mitigation'), 'smart grid'.
- 147 Für die transnationalen Patentanmeldungen vgl. <https://www.e-fi.de/dashboard/dev/patente/transnationale-patentanmeldungen> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 148 In der Gruppe der betrachteten Länder.
- 149 Datengrundlage ist die Beschäftigtenhistorik (BeH) des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB). Diese enthält alle Meldungen von sozialversicherungspflichtigen und geringfügigen Beschäftigungsverhältnissen in Deutschland. Sie wird aus den Arbeitgebermeldungen (DEÜV-Meldungen) zur Sozialversicherung gewonnen. Daten zu Selbstständigen sowie zu Beamtinnen und Beamten sind nicht enthalten. Die BeH enthält u. a. stichtagsbezogene Informationen zur Beschäftigung einer Person (u. a. Arbeitsort, Branche und Beruf). Vgl. Otto (2025).
- 150 Vgl. Grienberger et al. (2024).
- 151 Vgl. <https://job-futuromat.iab.de/#top> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 152 Vgl. Dengler und Matthes (2018).
- 153 Informationen in Online-Stellenanzeigen können Einblicke in die Entwicklung der Bedeutung digitaler Kompetenzen auf dem Arbeitsmarkt geben. Vgl. OECD (2022) für eine Studie über ausgewählte OECD-Länder sowie O’Kane et al. (2020) für Deutschland.
- 154 Für eine Analyse ausgewählter Berufe im IT-Bereich und ähnlichen Bereichen vgl. Institut der deutschen Wirtschaft (2021).
- 155 Sowohl Technologien als auch Tätigkeitsprofile von Berufen können sich im Zeitverlauf verändern. Für Informationen zu früheren Substituierbarkeitspotenzial-Indikatoren vgl. Grienberger et al. (2024).
- 156 Zu Entwicklung und Erstbeschreibung des Indikators vgl. Janser (2019). Für die in diesem Kapitel verwendete Version des Indikators vgl. Bachmann et al. (2024).
- 157 Vgl. https://web.arbeitsagentur.de/berufenet/beruf/129406#taetigkeit_kompetenzen_kompetenzen (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 158 Vgl. https://web.arbeitsagentur.de/berufenet/beruf/9162#taetigkeit_kompetenzen_kompetenzen (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 159 So kann beispielsweise eine Person als Dachdeckerin oder Dachdecker zunächst einen Großteil der Arbeitszeit auf die energetische Dämmung von Dachflächen verwenden, jedoch nach einem Betriebswechsel andere Schwerpunkte im Arbeitsalltag aufweisen, obwohl sie weiterhin als Dachdeckerin oder Dachdecker arbeitet.
- 160 So können beispielsweise Beschäftigte in als umweltneutral eingestuften Berufen in ihrem Berufsalltag in Planungs- und Koordinationsaufgaben involviert sein, die für die Dekarbonisierung relevant sind, auf die es in der Tätigkeitsbeschreibung im BERUFENET allerdings keinen entsprechenden Hinweis gibt. Es existieren verschiedene alternative Ansätze zur Abschätzung „grüner“ Beschäftigung. Vgl. Maldonado et al. (2024). Für Deutschland vgl. Destatis (2022). Für Informationen zur ökologischen Transformation des Arbeitsmarktes vgl. https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Umwelt/Oekologische-Transformation-des-Arbeitsmarktes-Nav.html?Fachstatistik%3Denergie%26Thema%3Duueb%26DR_Jahr1%3D2023%26mapHadSelection%3Dfalse%26toggleswitch%3D0, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-beschaefigte-im-umweltschutz> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 161 Bachmann et al. (2024) betrachten Veränderungen der Klassifizierung eines Berufs hinsichtlich der Umweltrelevanz durch Änderungen von Tätigkeitsprofilen innerhalb eines Berufs.
- 162 Auf Ebene der Städte und Landkreise.
- 163 Dieser Indikator wird über die Wohnorte der Erfinderinnen und Erfinder erfasst. Er bildet das regionale Erfindungsgeschehen ab, jedoch müssen die jeweiligen Erfindungen nicht unbedingt in die Anwendung gelangen (in der Region oder anderenorts).
- 164 Strukturschwache ländliche Gebiete sehen sich oft mit besonderen Herausforderungen konfrontiert. In diesen Regionen trifft ein hoher Transformationsdruck häufig auf begrenzte Anpassungsmöglichkeiten. Es besteht das Risiko, dass diese Gebiete in ihrer wirtschaftlichen Entwicklung weiter hinter anderen Regionen zurückbleiben. Darüber hinaus zeigt sich aber auch, dass die wirtschaftliche Entwicklung in ländlichen Räumen seit 2019 insgesamt besser verläuft als in städtischen Regionen. Der Anteil arbeitsloser Erwerbspersonen ist in ländlichen Gebieten mindestens seit 2005 konstant niedriger als in urbanen Zentren. Dies wird teilweise durch ein höheres individuelles Arbeitslosigkeitsrisiko in Städten erklärt, wo der Anteil an Personen mit nicht-deutscher Nationalität und Geringqualifizierten höher ist. Vgl. Haas et al. (2024), Kopka (2024).

- 165 Bei den überregionalen Mobilitätsmustern von Beschäftigten, die zuvor in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial oder in umweltschädlichen Berufen tätig waren, zeigt sich folgendes Bild: Fast die Hälfte (45,7 Prozent) der Betriebswechsler und -wechslerinnen, die in städtischen Regionen in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial tätig waren, verbleibt nach dem Wechsel wiederum in städtischen Regionen und in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial. Weitere 27,3 Prozent der Wechsler und Wechslerinnen verbleiben ebenfalls in einer städtischen Region, wechseln jedoch in einen Beruf mit mittlerem Digitalisierungspotenzial. Wechsel aus städtischen in ländliche Regionen sind vergleichsweise selten und mehrheitlich mit dem Verbleib in einem Beruf mit hohem Digitalisierungspotenzial verbunden. Für Beschäftigte, die aus ländlichen Regionen und Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial heraus den Betrieb wechseln, ist ein Verbleib in einer ländlichen Region und einem Beruf mit wiederum hohem Digitalisierungspotenzial das am häufigsten beobachtbare Muster (32,7 Prozent). Jedoch ist für diese Gruppe ein Wechsel in eine Beschäftigung mit hohem Digitalisierungspotenzial in einer städtischen Region ebenfalls weit verbreitet (27,7 Prozent). Vgl. Otto (2025).
- 166 Bemerkenswert ist, dass das Ruhrgebiet als ehemaliges Zentrum der Schwerindustrie mittlerweile einen vergleichsweise geringen Anteil an Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen aufweist.
- 167 Bezogen auf die Umweltrelevanz von Berufen lassen sich ähnliche Muster erkennen wie beim Digitalisierungspotenzial (vgl. Endnote 165). Überregionale Beschäftigungswechsel finden primär innerhalb des gleichen Regionstyps und zwischen Beschäftigten mit derselben Umweltrelevanz statt. Betriebswechsler und -wechslerinnen in umweltschädlichen Berufen in städtischen Regionen bleiben zu 41,5 Prozent in ebensolchen Berufen, während 20,6 Prozent in umweltneutrale Berufe innerhalb von Städten wechseln. Weitere 17,5 Prozent wechseln in umweltschädliche Berufe in ländlichen Regionen. Betriebswechsler und -wechslerinnen in umweltschädlichen Berufen in ländlichen Regionen verbleiben zu 33,9 Prozent in umweltschädlichen Berufen in ländlichen Regionen, während 29,2 Prozent zwar in einem umweltschädlichen Beruf bleiben, aber in die Stadt ziehen. Nur 9,2 Prozent wechseln in einen umweltneutralen Beruf in einer ländlichen Region. Vgl. Otto (2025).
- 168 Vgl. <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Grundlagen/Klassifikationen/Klassifikation-der-Wirtschaftszweige/Klassifikation-der-Wirtschaftszweige-Nav.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 169 Fackler et al. (2024) zeigen, dass seit Mitte 2019 die Stellenausschreibungen von auf Elektrofahrzeuge ausgerichteten Unternehmen kontinuierlich die von auf Verbrennungsmotoren ausgerichteten Unternehmen übertrafen und bis Ende 2023 etwa doppelt so hoch waren. Dieser Abstand ist jedoch seit 2023 um 60 Prozent geschrumpft, was auf eine Verlangsamung des Übergangs zur Elektromobilität hindeutet.
- 170 Vgl. Otto (2025).
- 171 Für jede Beschäftigung melden Arbeitgeber den ausgeübten Beruf im DEÜV-Prozess anhand eines Zahlencodes, der in der Klassifikation der Berufe (KldB 2010) definiert ist. In den Daten wird eine Änderung des Berufs immer dann verzeichnet, wenn der neue Arbeitgeber einen anderen Beruf meldet als denjenigen, in dem der oder die Beschäftigte zuvor gemeldet war.
- 172 Wie in Box B1-2 erläutert, werden in diesem Kapitel keine Veränderungen der Klassifikation eines Berufs im Zeitablauf betrachtet. Zudem werden Änderungen der Berufszuordnung einer Person innerhalb desselben Betriebes ausgeblendet.
- 173 Vgl. Otto (2025).
- 174 Vgl. Otto (2025).
- 175 Vgl. Otto (2025).
- 176 Hoch: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial. Die wenigen Fälle, in denen zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial tätig sind, werden hier ausgeschlossen. Gering: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial. Die wenigen Fälle, in denen zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial tätig sind, werden hier ausgeschlossen. Mittel: Betriebe mit weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial sowie weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial. Sonstige: Betriebe mit sowohl mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial als auch mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit geringem Digitalisierungspotenzial.
- 177 Umweltschädlich: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in umweltschädlichen Berufen. Die wenigen Fälle, in denen

- zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen tätig sind, werden hier ausgeschlossen. Umweltfreundlich: Betriebe mit einem Beschäftigtenanteil von mindestens 25 Prozent in umweltfreundlichen Berufen. Die wenigen Fälle, in denen zugleich mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen tätig sind, werden hier ausgeschlossen. Umweltneutral: Betriebe mit weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen sowie weniger als 25 Prozent der Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen. Sonstige: Betriebe mit sowohl mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltschädlichen Berufen als auch mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in umweltfreundlichen Berufen.
- 178** Zusätzlich ist der Anteil der sonstigen Betriebe um 0,3 Prozentpunkte auf rund 3 Prozent gestiegen.
- 179** Bei den Betrieben mit einem bis vier Beschäftigten ist der Anteil der Betriebe mit mindestens 25 Prozent der Beschäftigten in Berufen mit hohem Digitalisierungspotenzial um 7,1 Prozent gesunken, bei den Betrieben von fünf bis neun Beschäftigten um 8,1 Prozent, bei den Betrieben von zehn bis 49 Beschäftigten um 7,0 Prozent, bei den Betrieben von 50 bis 249 Beschäftigten um 7,1 Prozent sowie bei den Betrieben mit 250 oder mehr Beschäftigten um 6,9 Prozent.
- 180** Im Jahr 2022 betrugen die Anteile 23,5 Prozent bei den Betrieben mit einem bis vier Beschäftigten, 24,3 Prozent bei den Betrieben mit fünf bis neun Beschäftigten, 23,7 Prozent bei den Betrieben mit zehn bis 49 Beschäftigten, 22,4 Prozent bei den Betrieben mit 50 bis 249 Beschäftigten sowie 24,4 Prozent bei den Betrieben mit 250 oder mehr Beschäftigten.
- 181** Der Anteil umweltneutraler Betriebe (vgl. Endnote 177) ist um 0,2 Prozentpunkte gesunken. Mit 53,7 Prozent im Jahr 2022 machen diese jedoch die größte Gruppe aus. Außerdem ist der Anteil von sonstigen Betrieben um 0,6 Prozentpunkte auf 3,3 Prozent gestiegen.
- 182** Im Gegensatz hierzu beobachten Hohendanner et al. (2024) eine Zunahme des Anteils von umweltfreundlichen Betrieben – von rund 19 Prozent im Jahr 2013 auf rund 23 Prozent im Jahr 2022. Dies geht einher mit einem Rückgang des Anteils von umweltschädlichen Betrieben – von rund 24 Prozent im Jahr 2013 auf rund 22 Prozent im Jahr 2022 – sowie einem Rückgang des Anteils von sonstigen Betrieben – von rund 55 Prozent im Jahr 2013 auf 52 Prozent im Jahr 2022. Für die Definition von umweltfreundlichen, umweltschädlichen und sonstigen Betrieben vgl. Endnote 177. Die Unterschiede zu den hier berichteten Ergebnissen können einerseits aus den unterschiedlichen verwendeten Datengrundlagen resultieren. In diesem Kapitel wird mit dem Betriebshistorikpanel (BHP) ein administrativer Datensatz genutzt, wohingegen Hohendanner et al. (2024) das IAB-Betriebspanel als repräsentative Arbeitgeberbefragung verwenden. Andererseits können sie auf Unterschiede im verwendeten GOJI zurückzuführen sein. In diesem Kapitel wird für alle betrachteten Jahre der GOJI aus dem Jahr 2022 verwendet (vgl. Box B 1-2). Vgl. Otto (2025).
- 183** Neue Betriebe sind definiert als Betriebe, die bis zu einem Jahr alt sind.
- 184** Primäres Kriterium zur Einstufung der Komplexitätsniveaus sind die für die Ausübung des Berufs erforderlichen formalen Qualifikationen. Vgl. Stüber (2022); Wiemer et al. (2011), Paulus und Mattthes (2013), Härpfer und Neuhauser (2021). Beispiele für Fachkräfte sind EDV-Sachbearbeiter und -Sachbearbeiterinnen oder Projektassistenten und -assistentinnen. Beispiele für Berufe auf Spezialistenniveau sind IT-Sicherheitstechniker und -Sicherheitstechnikerinnen oder Metallbautechniker und -bautechnikerinnen. Beispiele für das Experten-niveau sind Ingenieure und Ingenieurinnen in der Pharmatechnik oder Versicherungsmathematiker und -mathematikerinnen.
- 185** Für weiterführende Studien in diesem Kontext vgl. z. B. Autor (2019), Acemoglu et al. (2022).
- 186** Ein Zuwachs der Auszubildendenzahlen in umweltfreundlichen Berufen legt nahe, dass das „Greening“ von Ausbildungsberufen deren Attraktivität erhöht und der Anteil umweltfreundlicher Berufe bei den Fachkraftberufen zukünftig steigen wird. Vgl. Brixy et al. (2023).
- 187** Vgl. Brökel (2025).
- 188** Vgl. Büchel et al. (2025).
- 189** Auch in den Vorgängerprogrammen unter der NGA-Rahmenregelung (Next Generation Access) wurden unterversorgte ländliche Regionen besonders berücksichtigt. Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/beihilfenkontrollpolitik-rahmenregelung-brd-unterstuetzung-aufbau-nga-breitbandversorgung.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 190** Vgl. EFI (2022), <https://gaia-x-hub.de/en/gaia-x-explained/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 191** Vgl. <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Dossiers/internationale-kooperationen.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 192** Die Verknüpfung von GAIA-X mit der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur (NFDI) war Ziel des

Projekts „FAIR Data Spaces“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Vgl. <https://www.nfdi.de/start-fair-data-spaces/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Mit dem Förderwettbewerb „Innovative und praxisnahe Anwendungen und Datenräume im digitalen Ökosystem Gaia-X“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz wurden Leuchtturmprojekte gefördert, die den Wissens- und Technologietransfer unterstützen und Vorbildfunktion für weitere Anwender haben sollen. Vgl. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Daten/Foerderwettbewerb_GaiaX/start.html (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Eines der geförderten Projekte entwickelte das KI-Sprachmodell „Teuken 7-B“, das von Grund auf mit den 24 Amtssprachen der EU trainiert wurde und dessen Open-Source-Modell Akteure aus Forschung und Wirtschaft nun für ihre eigenen Anwendungen nutzen können. Vgl. <https://www.iais.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/presseinformationen-2024/presseinformation-241126.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

193 Vgl. <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Artikel/Themenbuehne/neuausrichtung-mittelstand-digital.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

194 Das vom Nationalen Normenkontrollrat beauftragte Gutachten aus dem Jahr 2017 führt basierend auf einer Analyse der Erfüllungsaufwandsmessungen des Statistischen Bundesamts an, dass Unternehmen bis zu 54 Prozent ihrer Kosten für Top-30-Verwaltungsleistungen sparen könnten, wenn diese vollständig digitalisiert wären. Vgl. NKR (2017).

195 Das Gesetz zur Errichtung und Führung eines Registers über Unternehmensbasisdaten und zur Einführung einer bundeseinheitlichen Wirtschaftsnummer für Unternehmen (UBRegG) aus dem Jahr 2021 ist auf die Erfassung und Bereitstellung von Unternehmensbasisdaten ausgerichtet und ergänzt das Registermodernisierungsgesetz (RegMoG), ebenfalls aus dem Jahr 2021, das auf die Vernetzung und Harmonisierung von Verwaltungsdaten abzielt.

196 Das E-Government-Gesetz (EGovG) aus dem Jahr 2013 bildet die Grundlage für den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien für eine effizientere Abwicklung von Verwaltungsprozessen. Darauf aufbauend verpflichten das Onlinezugangsgesetz (OZG) aus dem Jahr 2017 sowie das OZG-Änderungsgesetz von 2024 Behörden dazu, ihre Verwaltungsdienstleistungen digital anzubieten. Dabei entwickeln sich Regionen hinsichtlich der Online-Verfügbarkeit unterschiedlich schnell. Vgl. <https://dashboard.digitale-verwaltung.de>

(letzter Abruf am 16. Januar 2025). Zudem unterscheiden sich die Bundesländer auch in anderen Indikatoren rund um erzielte Fortschritte im Bereich digitale Verwaltung. Vgl. BITKOM (2024).

197 Neben der Einhaltung der DSGVO und weiterer Datenschutzgesetze spielt dabei auch die allgemeine Netzwerk- und Informationssicherheit eine zentrale Rolle. Die EU-NIS-2-Richtlinie zielt auf eine Erhöhung der Cybersicherheit, ihre Umsetzung verzögert sich aber derzeit. Vgl. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

198 Siehe auch EU-Verordnung zum Single Digital Gateway. Vgl. <https://www.cio.bund.de/Webs/CIO/DE/digitale-loesungen/digitale-verwaltung/single-digital-gateway/single-digital-gateway-node.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

199 Vgl. NKR (2024).

200 Der europäische Emissionshandel für die Bereiche Gebäude und Verkehr (EU ETS 2) wird voraussichtlich 2027 in Kraft treten. Hierzu muss die EU-Richtlinie in nationales Recht überführt werden, was durch eine Novellierung des Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes erreicht werden soll.

201 Vgl. § 3 des Bundes-Klimaschutzgesetzes.

202 In den Forschungsprogrammen CDRterra und CDRmare des BMBF werden seit dem Jahr 2021 jeweils mehrere Verbundprojekte gefördert. Vgl. https://www.fona.de/de/aktuelles/nachrichten/2024/07/240702_CDR_Afterwork-Insight.php (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Weitere Förderprogramme des BMBF wurden im Februar bzw. im Mai 2024 bekanntgegeben. Vgl. <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2024/02/2024-02-26-Bekanntmachung-CO2.html?templateQueryString=ccu>, <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2024/05/2024-05-15-Bekanntmachung-Klim-Pro-Industrie-II.html?templateQueryString=ccu> (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Auch das BMWK startete im August 2024 einen Förderaufruf im Rahmen der Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (BIK). Vgl. https://www.ptj.de/foerdermoeglichkeiten/klimaschutz/bundesfoerderung_industrie_und_klimaschutz_foerderung_von_ccu_und_ccs (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

203 Die Bundesregierung hat in den Jahren 2018 und 2022 das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) evaluiert und im Mai 2024 einen Gesetzesentwurf zu dessen Änderung vorgelegt. Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).

- 204** Die Eckpunkte für die Carbon-Management-Strategie wurden Ende Mai 2024 von der Bundesregierung beschlossen. Im Fokus steht die Benennung notwendiger Anwendungsgebiete sowie rechtliche, ökologische und ökonomische Rahmenbedingungen mit einem Schwerpunkt auf der Schaffung der notwendigen Infrastruktur. Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html>, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/carbon-management-strategie-2289146> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 205** Seit Ende Mai 2024 läuft das Beteiligungsverfahren zur Langfriststrategie Negativemissionen, innerhalb dessen neben der Bewertung von verschiedenen Methoden und Technologien zur CO₂-Entnahme auch rechtliche und ökonomische Fragestellungen vertieft werden. Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/negativemissionen.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 206** Das Gesamtdeutsche Fördersystem für strukturschwache Regionen (GFS) wurde 2020 eingeführt und bündelt neben 22 Förderprogrammen des Bundes aus sieben Ressorts (BMWK, BMDV, BMUV, BMBF, BMWWSB, BMEL, BMFSFJ) auch sechs Förderbereiche (Unternehmensinvestitionen und -finanzierung, Forschung und Innovation, Fachkräfte, Breitbandausbau und Digitalisierung, Infrastruktur und Daseinsvorsorge sowie Nachhaltigkeit und Transformation).
- 207** Vgl. BMWi (2021).
- 208** Vgl. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/kriterienkatalog.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 209** Vgl. BMWK (2024b).
- 210** Vgl. <https://www.bibb.de/de/36913.php> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 211** Es ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen der Fördergebietskarte der GRW 2014–2021. Vgl. BMWi (2021). Zur Fördergebietskarte der GRW 2022–2027 vgl. BMWK (2024b).
- 212** Der Förderkatalog umfasst abgeschlossene und laufende Projekte, die aus Bundesmitteln gefördert werden. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) veröffentlicht nahezu alle Projektfördermaßnahmen sowie FuE-Aufträge im Förderkatalog. Eine ähnlich hohe Abdeckung wird bei den anderen Ministerien nicht erreicht, sodass die in diesem Kapitel genannten Zahlen als konservative Einschätzung zu werten sind. Vgl. <https://foerderportal.bund.de/foekat/jsp/StartAction.do> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 213** In diesem Kapitel wird jedes geförderte Projekt nur einmalig in dem Jahr gezählt, in dem es startet.
- 214** Im Förderkatalog werden Projekte anhand eines hierarchischen Klassifikationssystems, der Leistungsplansystematik, nach bestimmten Themenbereichen, wissenschaftlichen Disziplinen oder Anwendungsfeldern gruppiert. Diese Einteilung ermöglicht es jedoch nicht, Projekte im Bereich Digitalisierung und Dekarbonisierung direkt zu filtern.
- 215** Vgl. Brökel (2025).
- 216** Weitere Themenfelder sind kohlenstoffarme Industrieprozesse, Infrastruktur und Systeme zur Unterstützung sauberer Energie sowie regulatorische, Markt- und Politikinstrumente wie beispielsweise Emissionshandelssysteme.
- 217** Die Spezialisierung wird anhand des Anteils von Digitalisierungsprojekten an allen Förderprojekten einer Region gemessen.
- 218** Die Berechnung der Korrelation zwischen dem Anteil der angemeldeten Patente mit Digitalisierungs- oder Dekarbonisierungsbezug an allen angemeldeten Patenten und dem Anteil von Digitalisierungs- oder Dekarbonisierungsprojekten an allen Förderprojekten basiert auf gemittelten Werten für verschiedene Zeiträume. So gibt es beispielsweise für den Zeitraum 2012 bis 2017 für jeden der beiden Indikatoren (Patente und Förderprojekte) einen Wert pro Landkreis, der den Durchschnitt der einzelnen Jahre in dem Zeitraum abbildet. Die berechneten Korrelationskoeffizienten für Patente bzw. Förderprogramme mit Digitalisierungsbezug betragen 0,25 für den Zeitraum 2012 bis 2017, 0,23 für den Zeitraum 2018 bis 2024, wobei die Patentdaten lediglich bis 2021 reichen, sowie 0,27 für den gesamten Zeitraum. Für Patente bzw. Förderprogramme mit Dekarbonisierungsbezug betragen die berechneten Korrelationskoeffizienten 0,06 für den Zeitraum 2012 bis 2017, 0,05 für den Zeitraum 2018 bis 2024, wobei die Patentdaten wiederum lediglich bis 2021 reichen, sowie 0,05 für den gesamten Zeitraum.
- 219** Vgl. Brökel (2025).
- 220** Kooperative Projekte werden über verschiedene Förderkennzeichen in der „Verbund“-Spalte des Förderkatalogs identifiziert.
- 221** Seit 2006 liegt der Anteil von Digitalisierungsprojekten (enge Klassifikation) an allen kooperativen Projekten im Förderkatalog bei über 60 Prozent (Ausnahme: 55,0 Prozent im Jahr 2021). Die höchsten Werte waren in den Jahren 2011 bis 2016 sowie 2022 mit Anteilen von 70,9 bis 79,2 Prozent zu verzeichnen.

- 222 Der Anteil von Dekarbonisierungsprojekten (enge Klassifikation) an allen kooperativen Projekten im Förderkatalog lag zwischen 2000 und 2008 durchschnittlich bei 36,3 Prozent, sank in den nachfolgenden Jahren jedoch deutlich auf durchschnittlich 13,2 Prozent für 2011 bis 2016 und 12,7 Prozent für 2017 bis 2023.
- 223 Berechnung der Degree- sowie Betweenness-Zentralität in einem binär definierten Netzwerk ohne Berücksichtigung der jeweiligen Kooperationsintensität. Vgl. Brökel (2025).
- 224 Vgl. EFI (2019: Kapitel B 2).
- 225 Vgl. EFI (2021: Kapitel B 2).
- 226 Vgl. EFI (2022: Kapitel B 1).
- 227 Vgl. <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2024/heft/10/beitrag/ein-forschungsdatengesetz-jetzt.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 228 Vgl. EFI (2024: Kapitel A 1), EFI (2024: Kapitel B 4).
- 229 Vgl. Centre on Regulation in Europe (2024).
- 230 Vgl. EFI (2023: Kapitel B 1), EFI (2024: Kapitel B 2).
- 231 Vgl. EFI (2019: Kapitel B 2).
- 232 Vgl. BMWK (2022).
- 233 Vgl. EFI (2019: Kapitel B 1).
- 234 Vgl. EFI (2023: Kapitel B 1).
- 235 Die Initiative #Jobdrehscheibe zielt auf nahtlose Übergänge bei der Vermittlung von Arbeit in Arbeit ab. Vgl. DGB (2024) und <https://allianz-der-chancen.de/>, (letzter Abruf am 16. Januar 2024). Eine weitere Option wäre die Einführung einer Entgelt-sicherung (oder Lohn-Kompensationsmodelle), wie beispielsweise in Haywood et al. (2024) vorgeschlagen, um temporär Lohnunterschiede abzuschwächen, die bei einem Wechsel in umweltfreundliche Berufe entstehen.
- 236 Am 1. Januar 2019 in Kraft getreten.
- 237 Gesetz zur Förderung der beruflichen Weiterbildung im Strukturwandel und zur Weiterentwicklung der Ausbildungsförderung vom 20. Mai 2020. Dieses Gesetz baut auf dem Qualifizierungs-chancengesetz auf.
- 238 Die Übernahme der Lehrgangskosten variiert nach Größe der Unternehmen und liegt zwischen 15 und 100 Prozent. Vgl. Dietrich et al. (2023), Klaus et al. (2020).
- 239 Vgl. EFI (2021: Kapitel B 2).
- 240 Vgl. EFI (2021: Kapitel B 2), EFI (2024: Kapitel B 4).
- B 2**
- 241 Zu den bedeutenden deutschen Physikern dieser Zeit zählten beispielsweise Max Planck, Albert Einstein, Werner Heisenberg, Max Born und Arnold Sommerfeld, die u. a. an der Universität Göttingen, der Ludwig-Maximilians-Universität München und der Humboldt-Universität zu Berlin tätig waren.
- 242 Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 243 Der Nanokosmos gilt nach heutigem, allgemein anerkanntem Wissen als kleinste physikalische Ebene. Im Rahmen sogenannter String-Theorien wird allerdings auch schon an Erklärungen auf kleinerer Ebene geforscht.
- 244 Ein weiterer zentraler Aspekt der Quantentheorie ist die sogenannte Unschärferelation: Gemäß der Quantentheorie besitzen Quanten und Quantenobjekte sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften. Dieser „Welle-Teilchen-Dualismus“ bedeutet, dass sie nicht so eindeutig definiert sind wie die Objekte unserer makroskopischen Welt. Diese Unschärfe führt dazu, dass bestimmte Eigenschaften, wie Ort und Impuls, nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden können.
- 245 Das Ziel einer Berechnung im Quantencomputing ist also nicht ein exaktes Ergebnis wie im klassischen Computing, sondern ein Ergebnis, von dessen Richtigkeit mit hinreichender Sicherheit ausgegangen werden kann.
- 246 Vgl. Bogobowicz et al. (2024). Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums vieler Quantentechnologien sind solche Einschätzungen allerdings mit großer Unsicherheit behaftet.
- 247 Schlüsseltechnologien haben eine zentrale Bedeutung für die aktuellen und zukünftigen Wertschöpfungsaktivitäten. Vgl. EFI (2022: Kapitel B 1). Vgl. Schmaltz et al. (2025) zur aktuellen Bewertung des Innovationspotenzials von Quantentechnologien.
- 248 Die hier dargestellten Patentanalysen für den Bereich Quantentechnologien basieren auf der „EPO Worldwide Patent Statistical Database“ (PATSTAT) des europäischen Patentamts (EPA), die Informationen über veröffentlichte Patente von mehr als 80 Patentbehörden weltweit enthält. Bei Patenten im PCT-Verfahren vergehen bis zu 2,5 Jahre von der Anmeldung bis zur Veröffentlichung. Die in diesem Gutachten dargestellten Daten basieren auf dem PATSTAT-Update von Dezember 2024, in dem alle Patentanmeldungen bis Ende des Anmeldejahres 2021 voll erfasst sind. Die Suchstrategie basiert auf mit Expertinnen und Experten abgestimmten Suchbegriffen in definierten Patentklassen. Ein Patent wird einem Technologiefeld zugeordnet, wenn mindestens einer der Suchbegriffe im Titel oder im Abstract vorkommt. Vgl. Schmaltz et al. (2025) für weitere Details zur Suchstrategie.
- 249 Such- und Optimierungsalgorithmen können durch Quantencomputer fundamentale Skalierungsbarriere

- ren durchbrechen. Vgl. Grover (1996). Auch Materialien und Moleküle können durch Quantencomputer exponentiell effizienter simuliert werden. Vgl. Feynman (1982), Filipp (2022), Fahrman et al. (2022).
- 250** Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 251** Vgl. Kagermann et al. (2020), Schmaltz et al. (2025).
- 252** Im Jahr 2012 schlug der Physiker John Preskill den Begriff „quantum supremacy“ vor, um diesen Zeitvorteil zu beschreiben. Vgl. Preskill (2018). Inzwischen wird dafür auch der Begriff „quantum advantage“ weit genutzt. Beispielsweise konnte ein solcher Zeitvorteil nachgewiesen werden, als der Sycamore Quantenprozessor von Google einen Algorithmus in 200 Sekunden berechnete, wofür ein klassischer Supercomputer etwa 10.000 Jahre benötigen würde. Vgl. Arute et al. (2019).
- 253** Es wird zwischen elementaren Quantensystemen, auch „atomistische Plattformen“ genannt, und festkörperbasierten Plattformen unterschieden. Bei atomistischen Plattformen repräsentieren einzelne Teilchen, wie Ionen, Neutralatome oder Photonen, natürlicherweise ein Qubit. Festkörperbasierte Plattformen hingegen nutzen supraleitende Schaltkreise, NV-Fehlstellen, Quantenpunkte oder topologische Qubits zur Darstellung und Manipulation von Qubits. Vgl. Wilhelm et al. (2024).
- 254** Vgl. Loos et al. (2024). Üblicherweise durchlaufen Technologien Phasen, in denen verschiedene Ansätze koexistieren, bevor sich ein favorisierter Standard herauskristallisiert. Vgl. Abernathy und Utterback (1978), Teece (1986).
- 255** Vgl. Preskill (2018). Neueste Fortschritte in der Quantenfehlerkorrektur zeigen jedoch, dass sich die Fehlerrate erheblich senken lässt, indem mehrere physische Qubits zu einem „logischen“ Qubit kombiniert werden und so die Auswirkungen von Störungen exponentiell reduziert werden können. Vgl. Google Quantum AI and Collaborators (2024).
- 256** IBM betreibt hierfür Quantum-Datenzentren mit mehreren Quantencomputern in Poughkeepsie (USA) und Ehningen (Deutschland). In China wird dieses Ziel vor allem durch das staatlich geförderte Anhui Quantum Computing Engineering Research Center verfolgt, während in Deutschland FuE primär in Forschungszentren wie dem Helmholtz Quantum Center in Jülich vorangetrieben wird. Vgl. <https://newsroom.ibm.com/2024-09-26-ibm-expands-quantum-data-center-in-poughkeepsie,-new-york-to-advance-algorithm-discovery-globally>, <https://de.newsroom.ibm.com/2024-10-01-Erstes-IBM-Quantum-Data-Center-in-Europa-eroffnet-wird-die-leistungstarksten-Quantensysteme-von-IBM-enthalten>, https://www.chtf.com/english/News/ChildNews/202401/t20240116_26185.html, <https://www.fz-juelich.de/de/forschung/unsere-forschung/forschungsinfrastruktur/hqc?expand=translations,fzjsettings,nearest-institut> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 257** Beispielsweise das Projekt „Mobiler Quantencomputer – Quantenprozessoren für den mobilen Einsatz in Verteidigungs- und Sicherheitsanwendungen“ der Cyberagentur. Vgl. <https://www.cyberagentur.de/presse/vertraege-mit-technologieunternehmen-zur-entwicklung-mobiler-quantencomputer/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 258** Seit 2023 fördert die European High Performance Computing Joint Undertaking (EUHPC-JU) Initiative die Einbindung von Quantencomputern, u. a. im Leibniz-Rechenzentrum in Garching. Weitere Vereinbarungen wurden für die Integration von Quantencomputern in Rechenzentren in Tschechien, Spanien, Frankreich, Italien und Polen getroffen. Mittlerweile wurde die Initiative um ein aus mehreren Nationen bestehendes Konsortium erweitert, das einen Quantumcomputer (EuroHPC) aufbaut und betreibt. Vgl. https://eurohpc.europa.eu/new-eurohpc-quantum-computer-behoused-netherlands-2024-10-22_en (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 259** Vgl. Wilhelm et al. (2024).
- 260** Vgl. Farhi et al. (2014), McClean et al. (2016), McClean et al. (2020).
- 261** Vgl. Loos et al. (2024), Wengenmayr (2022).
- 262** Die in dieser Studie verwendeten Publikationsdaten wurden durch eine SQL-basierte Suche in der Literaturdatenbank Elsevier SCOPUS erhoben, wobei Forschungsartikel, Reviews, Letters und Notes berücksichtigt wurden. Die Zuordnung von Regionen oder Ländern erfolgte anhand der Organisationszugehörigkeiten der beteiligten Autorinnen und Autoren. Waren an einer Publikation mehrere Autorinnen und/oder Autoren beteiligt oder hatten diese Mehrfachnennungen der Organisationszugehörigkeit, wurde die Publikation in allen auf dieser Basis ermittelten Ländern als inhaltlicher Beitrag gezählt. Beispielsweise wurde eine Publikation, deren Autorinnen und Autoren eine Organisationszugehörigkeit in Deutschland, den USA und Frankreich hatten, in allen drei Ländern als Beitrag verzeichnet. Ebenso wurde eine Publikation, deren Autorin beispielsweise eine Mehrfachnennung an Universitäten in der Schweiz und Österreich hat, in beiden Ländern berücksichtigt. Die Suchstrategie basiert auf mit Expertinnen und Experten abgestimmten Suchbegriffen in definierten wissenschaftlichen Disziplinen. Eine Publikation wurde einem Tech-

nologiebereich zugeordnet, wenn mindestens ein Suchbegriff im Titel, in den Keywords oder im Abstract vorkam. Vgl. Schmaltz et al. (2025).

- 263 Allerdings muss bei den Publikationsaktivitäten an chinesischen Institutionen darauf hingewiesen werden, dass Publikationen mit chinesischer Beteiligung unterdurchschnittlich sichtbar sind. Einschätzungen zur Visibilität der Publikationen lassen sich über die durchschnittliche Zahl der Zitation einer Publikation annähern. Ein geeignetes Maß dafür ist der Crown-Indikator, der berücksichtigt, wie oft eine Publikation im Vergleich zum Durchschnitt der Publikationen des Forschungsfelds zitiert wird. Liegt der Wert über 1, ist die Publikation überdurchschnittlich häufig zitiert; liegt er darunter, wurde sie seltener zitiert. Im Durchschnitt erreichten Publikationen aus den Jahren 2019 bis 2021, an denen Autorinnen und Autoren mit chinesischer Organisationszugehörigkeit beteiligt waren, etwa halb so viele Zitationen (0,6) wie solche mit Beteiligung von Autorinnen und Autoren mit Organisationszugehörigkeiten in den USA (1,3) oder Deutschland (1,0). Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 264 Die Zuordnung von Regionen oder Ländern erfolgte anhand des angegebenen Wohn- oder Arbeitsorts der Erfinderinnen oder Erfinder. Waren an einem Patent mehrere Erfinderinnen und/oder Erfinder aus unterschiedlichen Ländern beteiligt, wurde der Beitrag des Patents entsprechend anteilig auf die identifizierten Länder verteilt. Beispielsweise wurde ein Patent von zwei Erfinderinnen mit Wohn- oder Arbeitsort in Deutschland und einer Erfinderin mit Wohn- oder Arbeitsort in den USA zu zwei Dritteln Deutschland und zu einem Drittel den USA zugeordnet.
- 265 Für die in dieser Studie verwendeten Unternehmensdaten wurden die Unternehmensdatenbanken ORBIS und Crunchbase verwendet. ORBIS umfasst etwa 150 Millionen Unternehmen weltweit – hauptsächlich aus dem privaten Sektor. Crunchbase ist spezialisiert auf weltweite Unternehmens- und Wirtschaftsinformationen mit Schwerpunkt auf Technologieunternehmen und -investoren. Zur Identifizierung der Unternehmen im Bereich Quantentechnologien wurde eine Stichwortsuche in den Beschreibungen der Unternehmen in beiden Datenbanken verwendet. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 266 Als Start-up werden Unternehmen eingestuft, die im Jahr 2020 oder später gegründet wurden. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 267 Klassische Verschlüsselungsmethoden basieren unter anderem auf mathematischen Problemen wie der Primfaktorzerlegung. Der Rechenaufwand zur

Faktorisierung wächst exponentiell mit der Größe der Zahl. Ab einer bestimmten Zahlengröße wird die Berechnung für klassische Computer praktisch unmöglich, was diese Verschlüsselungsmethoden aktuell als sicher gelten lässt. Ein leistungsfähiger Quantencomputer könnte dieses Problem jedoch durch den sogenannten Shor-Algorithmus äußerst effizient lösen. Der Mathematiker Peter Shor entwickelte diesen Algorithmus bereits in den 1990er Jahren. Vgl. Shor (1997). Experimentell konnte der Algorithmus bereits erfolgreich auf einem Quantencomputer mit kleinen Primzahlen getestet werden. Vgl. Martín-López et al. (2012).

- 268 Im Gegensatz zur Quantenkryptografie umfasst die Post-Quanten-Kryptografie (PQC) alternative Verschlüsselungsverfahren, die nicht auf den Prinzipien der Quantenmechanik basieren. Stattdessen verfolgt PQC das Ziel, klassische kryptografische Verfahren „quantensicher“ zu machen. Dies bedeutet, Algorithmen zu entwickeln, die gegen Angriffe resistent sind, die mit der potenziellen Rechenleistung zukünftiger Quantencomputer durchgeführt werden könnten. Die zentrale Idee besteht darin, mathematische Probleme zur Verschlüsselung heranzuziehen, die selbst für Quantencomputer schwer zu lösen sind. Auf diese Weise sollen bereits heute Lösungen für zukünftige kryptografische Herausforderungen bereitgestellt werden. Im Gegensatz zu Verfahren, die auf physikalischen Prinzipien beruhen, kann PQC jedoch keine unbedingte Sicherheit garantieren, da sie von der Schwierigkeit spezifischer mathematischer Probleme abhängt. Ein Vorteil gegenüber anderen Verfahren ist, dass PQC-Verfahren leicht in bestehende Sicherheitsstrukturen implementiert werden können. Erste Verfahren dazu werden bereits von einigen Behörden und Ländern empfohlen und standardmäßig eingesetzt. Vgl. Wilhelm et al. (2024).
- 269 Quantenrepeater ermöglichen die Übertragung von Quanteninformationen über größere Entfernungen. In klassischen optischen Kommunikationssystemen werden Repeater verwendet, um in gewissen Abständen Signale zu verstärken. Für Quantenkommunikation ist das jedoch nicht realisierbar, da es physikalisch unmöglich ist, Quantenzustände exakt zu kopieren (sogenanntes No-Cloning-Theorem). Quantenrepeater nutzen daher die Quantenverschränkung (siehe Box 2-1). Hierbei werden zwei oder mehr Teilchen so miteinander verbunden, dass ihr Zustand immer in Beziehung zueinandersteht, unabhängig von ihrer Entfernung. Das bedeutet, wenn der Zustand eines Teilchens gemessen wird, beispielsweise dessen Position oder

- Spin (Polarisierung), wird dadurch sofort der Zustand des anderen Teilchens festgelegt. In Quantenrepeatern werden verschränkte Teilchenpaare erstellt und über mehrere Stationen verteilt (Verschränkungsverteilung). Diese Stationen speichern die Quantenzustände und führen spezielle Messungen, sogenannte Bell-State-Messungen, durch, um die Verschränkung weiterzuleiten. Auf diese Weise entsteht ein Netzwerk, in dem Quanteninformationen über große Distanzen übertragen werden können, ohne dass die ursprüngliche Information gestört oder verändert wird. Das erste Konzept eines Quantenrepeaters wurde 1998 präsentiert und 2008 experimentell nachgewiesen. Inzwischen wurden Demonstrationen von Verschränkungsverteilungen über weitere Entfernungen realisiert, insgesamt ist die technologische Reife jedoch noch in einem frühen Stadium und bislang sind keine kommerziell nutzbaren Quantenrepeater verfügbar. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 270** Die Informationsübertragung bezieht sich hierbei auf die Erzeugung und Übertragung geheimer Schlüssel (siehe Box B 2-1).
- 271** Aufgrund der Absorption von Photonen in faserbasierten Netzen ist eine direkte Reichweite bis zu 100 km möglich. Weitere Entfernungen sind ohne Verstärkung nicht möglich. Darüber hinaus gibt es experimentelle und prototypische Arbeiten zu sogenannter Freistrah-Übertragung über Satelliten. Vgl. Schmaltz et al. (2025). Hierbei konnte bereits eine erfolgreiche Informationsübertragung über mehrere tausend Kilometer demonstriert werden. Vgl. <https://medienportal.univie.ac.at/uniview/wissenschaft-gesellschaft/detailansicht/artikel/erstes-abhoersicheres-quanten-videotelefonat-zwischen-wien-und-pekings-geglueckt/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 272** Das Max-Planck-Institut für Quantenoptik belegt Rang 18 und ist die deutsche Einrichtung mit der besten Platzierung. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 273** Die Aussagekraft der Patentanalysen könnte allerdings eingeschränkt sein, da insbesondere in sicherheitsrelevanten Bereichen bestimmte Entwicklungen bewusst nicht zur Patentanmeldung gebracht werden.
- 274** Neben den Quantensensoren selbst zählen auch die Metrologie und bildgebende Verfahren zum Technologiefeld Quantensensorik.
- 275** Im Jahr 2019 wurde das Internationale Einheitensystem (SI) neu definiert, indem fundamentalen Naturkonstanten – wie dem Planckschen Wirkungsquantum oder der Elementarladung – feste Zahlenwerte ohne Messunsicherheit zugewiesen wurden. Auf dieser Basis lassen sich physikalische Einheiten wie Meter, Sekunde und Ampere weltweit einheitlich und äußerst präzise mithilfe quantenphysikalischer Phänomene ableiten. Weil bestimmte Quantenzustände oder quantenmechanische Effekte überall identisch auftreten, dienen sie als unveränderliche „natürliche“ Referenzen, an denen sich hochpräzise, sogenannte „quantenreferenzierte“ Messgeräte orientieren. Solche Geräte überwachen ihre Genauigkeit weitgehend selbst und erfordern nur noch selten externe Kalibrierungen. Dies steigert die Messpräzision erheblich und fördert die „Demokratisierung der Metrologie“, da hochgenaue Messverfahren dadurch leichter zugänglich werden. Erste konkrete Anwendungen werden von den nationalen Metrologie-Instituten führender Wirtschaftsnationen wie z. B. dem National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA, dem National Physical Laboratory (NPL) im Vereinigten Königreich oder der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Deutschland aktiv vorangetrieben. Vgl. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2023).
- 276** Die Universität Ulm schafft es mit Platz sieben als einzige deutsche Einrichtung auf die Top-10-Liste der Forschungseinrichtungen mit der weltweit höchsten Anzahl an Publikationen im Bereich Quantensensorik. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt folgt auf Platz 16. Weitere wesentliche Akteure in der deutschen Forschungslandschaft sind die Ludwig-Maximilians-Universität München, die Universität Erlangen-Nürnberg, die Universität Stuttgart, das Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, das Forschungszentrum Jülich, die RWTH Aachen sowie die Leibniz Universität Hannover.
- 277** Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass Deutschland über eine starke Unternehmensbasis im Bereich Photonik und Sensorik verfügt. Diese Unternehmen wurden in der zugrunde liegenden Erhebung nicht als auf Quantensensorik spezialisierte Akteure identifiziert, da sie häufig eine breite technologische Ausrichtung aufweisen und verschiedene Anwendungsbereiche abdecken.
- 278** Die Anzahl der identifizierten Start-ups im Bereich Quantensensorik, also entsprechende Unternehmen, die im Jahr 2020 oder später gegründet wurden, liegt weltweit bei nur vier. Zwei dieser Start-ups stammen aus Deutschland.
- 279** Vgl. hierzu und im Folgenden Schmaltz et al. (2025).
- 280** Bei Redaktionsschluss liefen Verhandlungen zu einem Nachfolgeprojekt mit einem Budget von 2,7 Milliarden US-Dollar für die folgenden vier Jahre

- inkl. Fokusverschiebung von Grundlagenforschung zu Anwendungsentwicklung. Vgl. <https://www.commerce.senate.gov/2024/12/cantwell-young-durbin-daines-introduce-national-quantum-initiative-reauthorization-act#:~:text=%E2%80%9CThe%20National%20Quantum%20Initiative%20Reauthorization,that%20benefit%20generations%20to%20come.%E2%80%9D> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 281** Das Labor wurde mit einer Anfangsinvestition von ca. 900 Millionen Euro eingerichtet, und es ist geplant, weitere 13 Milliarden Euro über fünf Jahre in dieses Institut zu investieren. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 282** Zentrale Programme umfassen das EuroQCI zur Errichtung einer sicheren Quantenkommunikationsinfrastruktur in Europa, die EuroHPC JU zur Integration von Quantensimulatoren in bestehende Supercomputer, spezielle Förderlinien innerhalb von Horizon Europe – dem zentralen Forschungs- und Innovationsprogramm der EU –, den EU Chips Act zur Unterstützung der Produktion von Quantencomputern und -sensoren, den EIC Accelerator für innovative Quanten-Start-ups und KMU, das QuIC-Konsortium für die Förderung eines europäischen Quantenökosystems sowie QuantERA, ein Netzwerk zur Förderung herausragender Forschungsansätze im Bereich Quantentechnologie. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 283** Eines der führenden Industriecluster Chinas im Bereich Quantentechnologien befindet sich beispielsweise in der Provinz Anhui bzw. deren Hauptstadt Hefei.
- 284** Vgl. EFI (2024: Kapitel A 1), Bertschek et al. (2024).
- 285** Der CHIPS and Science Act, der ebenfalls die Förderung von Quantentechnologien umfasst, betont außerdem die Vermeidung unnötiger Parallelstrukturen. Vgl. The National Quantum Coordination Office (2023).
- 286** Vgl. PRC Ministry of Science and Technology (2017), Xinhua News Agency (2021).
- 287** Vgl. <https://qt.eu/>, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 288** Vgl. https://sciencebusiness.net/news/quantum-computing/commissioner-designate-virkkunen-moots-eu-quantum-act?utm_source=ActiveCampaign&utm_medium=email&utm_content=Commissioner%20designate%20Virkkunen%20moots%20EU%20quantum%20act&utm_campaign=Science%7CBusiness%20Bulletin%20No%20%201234 (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 289** Vgl. CEN-CENELEC Focus Group on Quantum Technologies (2023).
- 290** Streng genommen lässt sich im Bereich des Quantencomputing derzeit noch nicht von „Software“ im klassischen Sinne sprechen, da Anwendungen überwiegend auf sogenanntem „Bit-Level Computing“ basieren, das eine direkte Programmierung einzelner Qubits erfordert. Die Open-Source-Entwicklungsumgebung Qiskit von IBM stellt jedoch einen bedeutenden Schritt in Richtung einer umfassenderen Softwareentwicklung dar. Qiskit bietet Werkzeuge zur Erstellung, Manipulation und Ausführung von Quantenprogrammen und wird bereits in Rechenzentren eingesetzt, um experimentelle und prototypische Anwendungen zu unterstützen.
- 291** Internationale Teams reichten im Jahr 2016 im Rahmen eines Wettbewerbs des NIST Verschlüsselungsverfahrens ein, die der Rechenleistung von Quantencomputern standhalten sollen. Vier dieser Verfahren wurden 2022 für die Standardisierung ausgewählt, und zu drei davon – Sphincs+, Crystals-Dilithium und Crystals-Kyber – hat das NIST nun Standards veröffentlicht, die ihre kryptografischen Grundlagen und mögliche Implementierung in der Praxis beschreiben. Wissenschaftler des Exzellenzclusters „Cybersicherheit im Zeitalter großskaliger Angreifer“ der Ruhr-Universität Bochum waren an der Entwicklung dieser Verfahren maßgeblich beteiligt. Vgl. <https://www.mpg.de/22498867/post-quanten-kryptografie-standards> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 292** Vgl. <https://www.cenelec.eu/areas-of-work/cenelec-topics/quantum-technologies/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Darüber hinaus tauschen sich die nationalen Metrologieinstitute untereinander aus. NMI-Q ist hier eine Initiative mit dem Ziel, die kombinierte Expertise der Institute zu nutzen, um die Entwicklung und Einführung von Quantentechnologien durch koordinierte Entwicklung und Austausch zu Standardisierungsfragen zu beschleunigen.
- 293** Die Bundesregierung hat drei Handlungsfelder definiert: Erstens die Nutzbarmachung von Quantentechnologien und Technologietransfer, zweitens die Förderung von Grundlagen- und angewandter Forschung zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen wie Energie und Gesundheit und drittens die Schaffung eines starken Quantenökosystems durch Vernetzung, Fachkräfteförderung und ein positives Gründungsklima. Meilensteine bis 2026 wurden definiert.
- 294** Davon wurden im Jahr 2020 bereits zwei Milliarden Euro für Quantentechnologien, insbesondere das

- Quantencomputing, im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspaket bereitgestellt.
- 295 Vgl. Schmaltz et al. (2025). Nur in China ist eine höhere Gesamtfördersumme angesetzt. Aufgrund des Mangels an veröffentlichten Informationen und der Schwierigkeit Informationen zu Finanzierungsquellen zu ermitteln, sind verlässliche Aussagen schwierig. Erschwerend kommt hinzu, dass Quantentechnologien in verschiedenen Strategiepapieren eine Rolle spielen (z. B. in Deutschland in der Cyberstrategie, in der EU in Horizon Europe und in den USA im Chips and Science Act). Um eine Vergleichbarkeit der Länder zu ermöglichen, wurde hier auf Strategien und Budgets fokussiert, die gezielt und ausschließlich für Quantentechnologien vorgesehen sind.
- 296 Vgl. Nelson (1959), Arrow (1962) zu neuen Technologien generell.
- 297 Im Quantum Technology and Application Consortium (QUTAC) haben sich mehrere deutsche Konzerne zusammengeschlossen, um Anwendungen des Quantencomputing voranzubringen. Vgl. <https://www.qutac.de/ueber-qutac/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 298 Ein Quantenweb würde z. B. die Vernetzung von mehreren Quantensensoren oder Quantencomputern ermöglichen. Mehrere wichtige Anwendungen wurden bereits identifiziert, darunter sichere Kommunikation, Uhrensynchronisation, Verbesserung von Teleskopen, sichere Identifizierung, Quantensensornetzwerke sowie sicherer Zugang zu entfernten Quantencomputern in der Cloud. Vgl. Wehner et al. (2018).
- 299 Innerhalb von Clustern können jedoch Markt- und Systemversagen auftreten, etwa durch fehlende Anreize für Grundlagenforschung oder unzureichenden Wissensfluss. Ein weiteres Risiko ist das Auftreten technologischer Pfadabhängigkeiten, bei denen Cluster an der Erforschung von Technologien festhalten, die langfristig nicht zukunftsfähig sind. Eine gezielte Clusterpolitik kann diesen Herausforderungen durch strategische politische Steuerung und Förderung entgegenwirken. Vgl. EFI (2015: Kapitel B 1), EFI (2017: Kapitel B 2).
- 300 Vgl. EFI (2022: Kapitel B 1).
- 301 Viele Hardware-Plattformen erfordern spezielle Materialien wie Helium 3 zur Kühlung supraleitender Systeme oder maßgeschneiderte Komponenten wie Diamanten für NV-Zentren und photonische Qubits. Solche Ressourcen können geopolitische Abhängigkeiten schaffen, Handelsbeschränkungen unterliegen oder von wenigen Herstellern stammen. In Europa fehlt eine zuverlässige Lieferkette für QKD-Komponenten. Um technologische Souveränität zu fördern, sollten EU-basierte Zulieferer etabliert werden. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 302 Während ein universeller Quantencomputer, der eine Vielzahl unterschiedlicher Probleme löst, noch einen langen Entwicklungshorizont aufweist, könnte ein Quantencomputer für spezifische praktische Anwendungen bereits früher realisiert werden. Vgl. Loos et al. (2024). Beispielsweise gehen einige Experten davon aus, dass ein Quantencomputer bis 2030 leistungsstark genug sein könnte, um die derzeitigen Verschlüsselungsstandards zu kompromittieren. Vgl. Schmaltz et al. (2025).
- 303 Die Verfügbarkeit der Infrastruktur könnte auch dadurch eingeschränkt werden, dass zwar grundsätzlich Zugang zur Technologie gewährt wird, jedoch nicht zur neuesten Technologiegeneration.
- 304 Vgl. Loos et al. (2024), Schmaltz et al. (2025).
- 305 Vgl. Bogobowicz et al. (2024)
- 306 Vgl. bayern photonics e.v. und optence e.v. (2018), Müller und Wilhelm (2021), Kultusministerkonferenz (2020).
- 307 Vgl. <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 308 Vgl. <https://www.quantentechnologien.de/nachwuchs.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 309 Vgl. <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-futur-education-netzwerk-interdisziplinärer-aus-und-weiterbildungskonzepte-in-den-quantentechnologien/quantuk.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 310 Vgl. EFI (2023: Kapitel B 1), EFI (2024: Kapitel B 2).
- 311 Vgl. EFI (2009: Kapitel B 3), EFI (2017: Kapitel A 2).
- 312 Die in dieser Analyse verwendeten Publikationsdaten wurden durch eine SQL-basierte Suche in der Literaturdatenbank Elsevier SCOPUS erhoben. Dabei wurden Forschungsartikel, Reviews, Letters und Notes einbezogen. Die Identifikation von Publikationen im Bereich Quantencomputing sowie die Zuordnung von Regionen oder Ländern basierten auf den Organisationszugehörigkeiten der beteiligten Autorinnen und Autoren und erfolgten in Anlehnung an die Identifikationsstrategie von Schmaltz et al. (2025).
- 313 Um Patente zu identifizieren, die Publikationen im Bereich Quantencomputing zitieren, wurden die Publikationsdaten mit dem RelianceOnScience-Datensatz (<https://relianceonscience.org/patent-to-paper-citations>, letzter Download am 03. November 2024) verknüpft. Insgesamt konnten so 8.864 Patente den identifizierten Publikationen im Bereich Quantencomputing zugeordnet werden.

Die Zuordnung von Regionen oder Ländern erfolgte anhand des angegebenen Wohn- oder Arbeitsorts der Erfinderinnen oder Erfinder. Waren an einem Patent mehrere Erfinderinnen und/oder Erfinder aus unterschiedlichen Ländern beteiligt, wurde das Patent in allen auf dieser Basis ermittelten Ländern als Beitrag gezählt. Beispielsweise wurde ein Patent von zwei Erfinderinnen mit Wohn- oder Arbeitsort in Deutschland und einer Erfinderin mit Wohn- oder Arbeitsort in den USA, Deutschland und den USA zugeordnet. Zu beachten ist, dass im RelianceOnScience-Datensatz möglicherweise Patente aus den USA und dem Vereinigten Königreich stärker berücksichtigt werden, da der Datensatz auf englischsprachige Patente limitiert ist.

- 314 Vgl. Schmaltz et al. (2025: 4).
- 315 Vgl. EFI (2023: Kapitel A 0).
- 316 Vgl. Weber und Süssenguth (2024).
- 317 Vgl. CEN-CENELEC Focus Group on Quantum Technologies (2023).
- 318 Vgl. EFI (2024: Kapitel B 2).

B 3

- 319 Vgl. Euler (2020).
- 320 Ergibt sich aus § 50 Abs. 1 WHG.
- 321 Vgl. § 8 Abs. 1 WHG. Eine Ausnahme bildet die Gewässerbenutzung zur Abwehr einer gegenwärtigen Gefahr für die öffentliche Sicherheit, sofern der drohende Schaden schwerer wiegt als die mit der Benutzung verbundenen nachteiligen Veränderungen von Gewässereigenschaften (§ 8 Abs. 2 WHG).
- 322 Vgl. BMU und UBA (2017).
- 323 Vgl. Euler (2020), Mazzucato und Zapout (2024).
- 324 Reallabore sind regulatorische Experimentierräume und stellen ein probates Mittel zur Entwicklung innovationsfreundlicher Rahmenbedingungen dar. Beim Aufsetzen eines Reallabors sollte die wirkungsorientierte Evaluation von Beginn an mitkonzipiert werden. Vgl. EFI (2023).
- 325 Das UBA definiert Wasserdargebot als „... die für eine bestimmte Zeit aus dem natürlichen Wasserkreislauf zur Verfügung stehende nutzbare Menge an Süßwasser.“ Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/w?tag=Wasserdargebot#alphabar> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 326 Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-nutzung-der-wasserressourcen#wie-ist-die-entwicklung-zu-bewerten> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 327 Vgl. OECD (2012), [zung-der-wasserressourcen#die-wichtigsten-fakten \(letzter Abruf am 16. Januar 2025\). Zugrunde liegt ein sogenannter 5-year moving average. Die Prognosen zur tatsächlichen Wasserentnahme enthalten Projektionen sozio-ökonomischer Variablen wie Bevölkerungszahlen, Bruttoinlandsprodukt und vor allem Primärenergieverbrauch, der als Proxy für die Ressourcennutzungseffizienz dient. Vgl. Luetkemeier und Ahmad \(2025\).](https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-nut-

</div>
<div data-bbox=)

- 328 Vgl. Luetkemeier und Ahmad (2025). Anders als in Deutschland steigt gemäß der Prognose der Wasserstress in vielen Ländern, auch in Europa, zukünftig an. Eine Übersicht der regionalen Daten sowie zusätzlichen globalen Daten findet man im ISOE-Dashboard: <https://www.water-land-nexus.com>
- 329 Vgl. Luetkemeier und Ahmad (2025).
- 330 Vgl. BMUV (2023), Boeing und Marx (2023), Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (2017), Wunsch et al. (2022). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wetterextreme-koenntenkuenftig-der-normalfall-sein>, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland/klimafolgen-handlungsfeld-wasserhochwasser#wasserverfuegbarkeit-und-hitze> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 331 Vgl. BMUV und UBA (2022).
- 332 Vgl. BMUV und UBA (2022). Bei Flammschutzmitteln handelt es sich um eine Vielzahl verschiedener organischer und anorganischer Chemikalien. Beispiele sind bromierte Verbindungen, Chlorparaffine (organisch) oder Aluminiumtrihydroxid, Magnesiumdihydroxid oder Antimontrioxid (anorganisch). Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/schadstoffe-in-produkten/flammschutzmittel-in-produkten> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 333 Vgl. BMUV und UBA (2022).
- 334 Vgl. BMUV und UBA (2022).
- 335 Zum Beispiel Reduzierung von Nährstoffeinträgen durch Erosion und Auswaschung, Anlage von Gewässerrandstreifen, Auenentwicklung, Habitatverbesserungen, Reduzierung von Stoffeinträgen durch kommunale Kläranlagen. Vgl. BMUV und UBA (2022), SRU (2020).
- 336 Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/oekologischer-zustand-der-fliessgewaesser#methode> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 337 Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/chemischer-zustand-der-fliessgewaesser> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 338 Vgl. BMUV und UBA (2022).

- 339 Vgl. <https://www.bmu.de/themen/wasser-und-binnengewasser/gewaesserschutzpolitik/deutschland/umsetzung-der-wrrl-in-deutschland> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), BMUV und UBA (2022), Europäisches Parlament (2013).
- 340 Vgl. BMUV und UBA (2022).
- 341 Vgl. Krüger et al. (2012).
- 342 Die 20 Patente der Unternehmen der Wasserversorgung wurden alle von einem Unternehmen angemeldet, für die 33 Patente der Unternehmen der Abwasserversorgung waren acht Unternehmen verantwortlich.
- 343 Die Zahl der Patentanmeldungen der deutschen Wasserversorgungsunternehmen und der Abwasserentsorgungsunternehmen wurden anhand der WZ-Klassifikationen 36 und 37 mithilfe der Orbis-Datenbank ermittelt. Die 1.827 Patentanmeldungen für Technologien der Wasserwirtschaft haben einen transnationalen Charakter und wurden der Studie von Niederste-Hollenberg et al. (2025) entnommen.
- 344 Die Datenbasis ist eine vom Stifterverband durchgeführte Befragung von Unternehmen. Der Vergleich erfolgt zwischen den Unternehmen der Wirtschaftszweige 36 und 37 und allen Unternehmen. Die Daten werden seit 2011 alle zwei Jahre erhoben. In der gezeigten Analyse wurden die Befragungswellen 2017, 2019 und 2021 verwendet.
- 345 Vgl. DWA und DVGW (2021).
- 346 Vgl. Blind (2022).
- 347 Es gilt jedoch zu beachten, dass Publikationen, Patente und Handelsdaten nicht trennscharf den einzelnen Technologiebereichen zugeordnet werden können, sodass es zu Mehrfachzuordnungen kommen kann. Überblick der Wassertechnologien: 1) Nachhaltige Wasserinfrastruktur: Zu diesem Technologiebereich zählen die Regenwassergewinnung und -nutzung, die einen ressourcenschonenden Umgang mit Wasser ermöglichen, die Wassernutzungseffizienz zum proaktiven Wassermanagement, die semi-dezentrale Wasserbehandlung für alternative Sanitär- und Wasserkonzepte wie die Regen- bzw. Grauwassernutzung sowie die blau-grüne Infrastruktur zur systematischen Verknüpfung natürlicher Wasser- und Grünflächen, um insbesondere urbane Räume ökologisch, sozial und ökonomisch zu gestalten. 2) Wasserversorgung: Dieser Technologiebereich umfasst die Wasseraufbereitung wie mechanische, physikalische, chemische, biologische Verfahren oder Membrantechnologien, die u. a. zur Verbesserung der Wasserqualität beitragen. Zudem zählen Wasserverteilung wie Rohre, Schächte und Pumpen sowie Leckagedektoren oder Reinigungs-/Befahrungssysteme zu diesem Technologiefeld. 3) Abwasserentsorgung: Neben der Abwasserbehandlung (beispielsweise mechanische, biologische und chemische Reinigungsverfahren) fallen auch Schlammbehandlung und Abwasserableitung (u. a. Rohre, Schächte und Pumpen, Leckagedektoren) in diesen Technologiebereich. 4) Bewässerung und Hochwasserschutz: Zu den Bewässerungstechnologien zählen z. B. intelligente Bewässerungssysteme. Hochwasserschutz bedeutet das Management aller Bestandteile des Wassersystems (beispielsweise Talsperren, Polder, Kanalnetze, Wasserläufe) zur Bewältigung auftretender Extremwetterereignisse. 5) Gewässergüte: Zu diesem Technologiebereich zählen Wasseranalytik, beispielsweise Sensoren, Photometer oder Chromatografen, die eine kostengünstige und zuverlässige Probenentnahme sowie eine automatisierte Analyse und Datenübermittlung ermöglichen. Auch Micropollutants (Membranverfahren, Adsorption, Oxidation) sowie der Schutz der Wasserressourcen gehören in diesen Bereich. 6) Digitalisierung in der Wasserwirtschaft: Hierbei handelt es sich um ein übergreifendes Thema mit Relevanz für alle Bereiche der Wasserwirtschaft. Es umfasst alle digitalen Technologien, die u. a. die Automatisierung von Abläufen, die Erfassung und Optimierung von Systemzuständen oder die Steuerung/Regelung von Wasserströmen und Infrastrukturkomponenten ermöglichen. 7) Innovative Einzelverfahren: In diesem Technologiebereich finden sich innovative Technologien wie Membranen oder Verfahren der Meerwasserentsalzung und des Phosphorrecyclings. Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025).
- 348 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 29).
- 349 Lag ein Land bei den absoluten Publikationszahlen beispielsweise hinter einem anderen Land zurück, wies jedoch einen höheren Veränderungsfaktor auf, zeigt dies, dass das zurückliegende Land den wissenschaftlichen Abstand im Laufe der Zeit verringern oder sogar in einen Vorsprung verwandeln konnte. Ist der Veränderungsfaktor des führenden Landes hingegen größer als der des zurückliegenden Landes, hat sich der wissenschaftliche Abstand zwischen den beiden Ländern über die Zeit weiter vergrößert.
- 350 Wenn beispielsweise ein Land bei den absoluten Patentzahlen hinter einem anderen Land zurücklag, aber einen höheren Veränderungsfaktor aufwies, konnte das zurückliegende Land den Abstand im Laufe der Zeit verringern oder möglicherweise sogar das zunächst führende Land überholen. Ist jedoch der Veränderungsfaktor des führenden Landes größer als der des zurückliegenden Landes, dann

- hat sich der wissenschaftliche Abstand zwischen den beiden Ländern vergrößert. Vgl. EFI (2022: 45).
- 351 Hier kommt zur Berechnung des RCA die Standardformel nach Balassa zur Anwendung, der mitunter auch als relativer Exportvorteil (RXA) bezeichnet wird. Der RCA beschreibt den Exportanteil einer Produktgruppe in einem Land im Verhältnis zum Anteil dieser Produktgruppe an den Exporten weltweit. Der so erhaltene Wert wird dann derart skaliert, dass der RCA zwischen -100 und 100 liegt und immer dann positiv ist, wenn ein komparativer Vorteil vorliegt. Von einem komparativen Vorteil eines Landes in der Produktion von Gütern der jeweiligen Produktgruppe wird dann gesprochen, wenn die Exporte des Landes überdurchschnittlich aus Gütern dieser Gruppe bestehen. Ein RCA kleiner Null deutet auf einen komparativen Handelsnachteil hin. Vgl. Cai et al. (2009).
- 352 Vgl. Schiersch und Gehrke (2014).
- 353 Vgl. <https://www.bmu.de/themen/wasser-und-binnengewasser/gewaesserschutzrecht/deutschland/das-wasserhaushaltsgesetz> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), § 8 Abs. 1 WHG.
- 354 Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 355 Vgl. Verones et al. (2010).
- 356 Im Jahr 2023 verbrauchte jede Person in Deutschland rund 121 Liter Trinkwasser pro Tag, von denen 63 Prozent auf sanitäre Zwecke und nur 8 Prozent auf Kleingewerbe wie Bäckereien oder Arztpraxen entfielen. Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 66). 1990 lag der Pro-Kopf-Verbrauch noch bei 147 Litern pro Tag. Er fiel im Jahr 2010 das erste Mal auf 121 Liter pro Kopf und Tag. Danach stieg er wieder an und erreichte 2020 einen Wert von 129 Litern. Seitdem fällt der tägliche Wasserverbrauch pro Kopf wieder. Die zuletzt höheren Werte können laut UBA durch heiße Sommer erklärt werden. Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wassernutzung-privater-haushalte#undefined> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 357 Der Anstieg ist zu etwa gleichen Teilen auf die Ausweitung der bewässerten Fläche und der Intensivierung der Landwirtschaft zurückzuführen. Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 56 f.).
- 358 Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 359 Dazu zählen u. a. chemische (Nitrate, Phosphate, Pestizide, Herbizide) und organische Verunreinigungen sowie Emissionen von Mikroplastik, Schwermetallen, giftigen Salzen oder organischen Lösungsmitteln.
- 360 Vgl. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischerbericht-wasser-oeffentlich-2190211229005.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 361 So waren im Jahr 2018 etwa zwei Drittel der 1.579 Unternehmen, die für 80 Prozent des Wasseraufkommens in Deutschland verantwortlich sind, öffentlich-rechtlich organisiert. Vgl. BDEW (2020: 33).
- 362 Vgl. https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000931 (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 363 Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/recht-oekonomie-digitalisierung/wasseroeconomik#undefined> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), BDEW (2020), Euler (2020).
- 364 Vgl. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischerbericht-wasser-oeffentlich-2190211229005.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 365 Vgl. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischerbericht-abwasser-oeffentlich-2190212229005.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 366 Vgl. Scheele und Holländer (2019).
- 367 Vgl. Sauer und Strecker (2003).
- 368 Vgl. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischerbericht-wasser-oeffentlich-2190211229005.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 369 Vgl. Picot et al. (2020: 20).
- 370 Vgl. Bedtke (2015: 53).
- 371 Vgl. BDEW (2020).
- 372 Gebietsmonopol bedeutet, dass in einem bestimmten Gebiet nur ein Anbieter für die Versorgung zuständig ist. Vgl. Brackemann et al. (2000).
- 373 Vgl. Deutscher Bundestag (2010).
- 374 Die ersten drei Reinigungsstufen sind eine mechanische Stufe, eine biologische Stufe ohne gezielte Entfernung der Nährstoffe wie Stickstoffe und Phosphate und eine weitere biologische Stufe mit gezielter Entfernung der Nährstoffe. Vgl. <https://www.bmu.de/themen/wasser-und-binnengewasser/abwasser/klaeranlage-kurzinfo> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 375 Vgl. Deutscher Bundestag (2024). Zusätzlich sind ca. 25 bereits in Planung. Vgl. <https://de.dwa.de/>

- de/kommunalabwasserrichtlinie-karl.html (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 376 Vgl. <https://www.dvgw.de/themen/wasser/wasserimpuls/substanz-und-werterhalt-der-wasserinfrastruktur/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), DWA und DVGW (2023), Schramm und Winker (2023).
- 377 Vgl. Ajami et al. (2014).
- 378 Vgl. Reese et al. (2015: 226).
- 379 Vgl. BMUV (2023).
- 380 Vgl. BMUV (2023: 19 ff.), Niederste-Hollenberg et al. (2025), <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/wasser-2021/328625/das-recht-am-wasser/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025). Die Konflikte um Wasser, die vor Gericht ausgetragen wurden, haben zwischen 2012 und 2021 in elf Bundesländern im Vergleich zu dem Zeitraum 2002 bis 2011 zugenommen. Vgl. <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2022/06/14/klimawandel-konflikt-um-wasser-in-deutschland/?lang=de> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 381 Vgl. Heinrich-Böll-Stiftung und Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2025). Beispiele für Nutzungskonkurrenz: Automobilhersteller im Gebiet des Wasserverbands Strausberg-Erkner. Vgl. <https://www.rbb24.de/studiofrankfurt/wirtschaft/2023/09/brandenburg-tesla-gruenheide-tesla-wasser-wasserverband-abwahl.html> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), Brunnenbohrungen durch Getränkehersteller in Lüneburg. Vgl. <https://www.fluter.de/grundwasser-privatisierung-cola-lueneburg>, <https://unserwasser-bi-lueneburg.de/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), Bewässerung von Gärten und Pools. Vgl. <https://www.noz.de/lebenswelten/haus-garten/artikel/duerre-private-swimmingpools-wegen-wasserknappheit-vor-dem-aus-44908865>, <https://www.zeit.de/politik/deutschland/2022-07/hitze-duerre-wassermangel-brandenburg-panketal-pools> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 382 Bei Wasserentnahmerechten kann zwischen Erlaubnissen und Bewilligungen unterschieden werden. Wasserrechtliche Erlaubnisse können aus wichtigen Gründen ohne finanziellen Ausgleich gekündigt werden. Wasserrechtliche Bewilligungen sind schwerer zu widerrufen und schützen Unternehmen oder landwirtschaftliche Betriebe vor zivilrechtlichen Ansprüchen Dritter. Vgl. <https://www.weka.de/umweltschutz/gewaesserbenutzung/> (letzter Abruf am 16. Januar 2025), Schulz und Scharun (2023).
- 383 Vgl. Schulz und Scharun (2023).
- 384 Vgl. <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2022/11/22/klimawandel-wasser-knapp-in-industrie-hat-jahrzehntelange-entnahmerechte/>, <https://www.br.de/nachrichten/bayern/wasserentnahmen-in-bayern-so-ahnungslos-sind-die-behoerden>, TeRVVWD (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 385 Vgl. <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2022/11/22/klimawandel-wasser-knapp-industrie-hat-jahrzehntelange-entnahmerechte/>, <https://www.br.de/nachrichten/bayern/wasserentnahmen-in-bayern-so-ahnungslos-sind-die-behoerden>, TeRVVWD (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 386 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025).
- 387 Vgl. WBGU (2024: 62).
- 388 Es kann differenziert werden zwischen permanenten Wasserrechten und saisonalen Zuteilungen. Während permanente Rechte den grundsätzlichen Anspruch auf die Nutzung einer bestimmten Menge einräumen (die sich meist an langjährigen Mittelwerten des zur Verfügung stehenden Wassers orientieren), basieren Zuteilungen auf der tatsächlich verfügbaren Menge Wasser. Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 75 ff.).
- 389 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025).
- 390 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 77). Die Rechtslage im Vereinigten Königreich erlaubt es, Wasserentnahmerechte innerhalb eines Gebietes zu handeln. Zwischen den Parteien können die Wasserentnahmerechte vollständig oder in Teilen, temporär oder permanent gehandelt werden. Die Umweltagentur im Vereinigten Königreich genehmigt Handelsanfragen und berücksichtigt dabei, wie viel Wasser nach der Entnahme in die Umwelt zurückgeführt wird und wie viel Wasser der Händler in letzter Zeit verbraucht hat. Zur Unterstützung des Handels wurde speziell für England eine interaktive Karte geschaffen, die diejenigen vergebenen Wasserentnahmerechte anzeigt, die nach Einschätzung der Umweltagentur potenziell handelbar sind. Vgl. <https://www.gov.uk/guidance/trade-water-abstraction-rights>, <https://environment.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=db8e98d0845e461393855f9a3ddba2eb> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 391 Umgangssprachlich werden die Entgelte auch als Wassercent oder Wasserpennig bezeichnet.
- 392 Vgl. <https://www.euwid-wasser.de/news/wirtschaft/wie-die-wasserentnahmeentgelte-in-deutschland-harmonisieren-270524/>, <https://www.evergabe-online.de/tenderdetails.html?1&id=660026> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025), BUND (2019). Im bayrischen Koalitionsvertrag 2023 bis 2028 steht die Einführung eines Wasserentnahmeentgelts. Vgl. CSU und Freie Wähler (2023).

- 393 Vgl. <https://www.euwid-wasser.de/news/wirtschaft/wie-die-wasserentnahmeent-gelte-in-deutschland-harmonisieren-270524/>, <https://www.evergabe-online.de/tenderdetails.html?1&id=660026> (letzter Abruf jeweils am 16. Januar 2025).
- 394 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 75).
- 395 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 73).
- 396 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 75), WBGU (2024: 61).
- 397 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025).
- 398 Vgl. Europäisches Parlament (2000: 4).
- 399 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 46).
- 400 Vgl. § 9(4) AbwAG und Gawel et al. (2021: 26).
- 401 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 50).
- 402 Vgl. AbwV und § 57 WHG. Der „Stand der Technik“ wird im Rahmen der Industrieemissionsrichtlinie der EU durch sogenannte Beste-Verfügbare-Technik-Merkblätter (BVT-Merkblätter) festgeschrieben. Vgl. Kraus et al. (2015).
- 403 Vgl. Gawel et al. (2021: 146).
- 404 Vgl. <https://www.bmu.de/themen/wasser-und-binnengewasser/abwasser> (letzter Abruf am 16. Januar 2025).
- 405 Vgl. Europäisches Parlament (2024), Kommunale Abwasserrichtlinie, Art. 9, Abs. 3.
- 406 Vgl. hierzu auch WBGU (2024: 14). Konzepte hierfür wurden in Gawel et al. (2017) entwickelt.
- 407 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 53).
- 408 Ein mögliches umsetzungsfähiges Modell findet man in Möckel et al. (2015).
- 409 Vgl. Niederste-Hollenberg et al. (2025: 54), WBGU (2024: 20), EFI (2024: 70).
- 410 Weitere EU-Staaten, die ein solches Modell umgesetzt haben, sind u. a. Frankreich und Schweden. Möckel et al. (2015).
- 411 Vgl. BMUV (2023: 52).
- 412 Vgl. EFI (2024).

C7 F&I-Dashboard

Die Dokumentation der Leistungsfähigkeit des Forschungs- und Innovationsstandortes Deutschland ist ein fester Bestandteil der Berichterstattung der Expertenkommission. Die Darstellung erfolgt anhand verschiedener Kernindikatoren, die einen Rückschluss auf die Leistungsfähigkeit und Dynamik des deutschen Forschungs- und Innovationssystems zulassen sowie einen Vergleich mit wichtigen Volkswirtschaften ermöglichen.

Das F&I-Dashboard der EFI umfasst zum Berichtsjahr 2025 neben diesen Kernindikatoren auch erstmals ein F&I-Monitoring, das regelmäßig aktualisierte Indikatoren zur Wettbewerbsposition Deutschlands in ausgewählten Technologiebereichen wie künstliche Intelligenz, Mikroelektronik und Biotechnologie bereitstellt.

Die zum Berichtsjahr 2025 aktualisierten Kernindikatoren und das F&I-Monitoring sind auf dem F&I-Dashboard unter <https://www.e-fi.de/dashboard> sowie unter folgendem QR-Code aufrufbar:



Kontakt und weitere Informationen

Geschäftsstelle der Expertenkommission
Forschung und Innovation (EFI)
Pariser Platz 6
D-10117 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 322 982 564
E-Mail: kontakt@e-fi.de
www.e-fi.de

Herausgeberin

Expertenkommission Forschung und
Innovation (EFI), Berlin.

© 2025 EFI, Berlin.

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk einschließlich
all seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung ist ohne Zustimmung der
Herausgeberin unzulässig.

Zitierhinweis

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2025):
Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer
Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025, Berlin: EFI.

Gestaltung

GROOTHUIS. Gesellschaft der Ideen und Passionen mbH
für Kommunikation und Medien,
Marketing und Gestaltung: Sophie Popp,
Illustrationen: Gerd Schröder; groothuis.de

Produktion

MKL Druck GmbH & Co. KG, Ostbevern

Redaktionsschluss: 16. Januar 2025

Die im Jahresgutachten 2025 verwendeten Abbildungen und
Tabellen sowie die dazugehörigen Datensätze stehen in der Online-
Version des Gutachtens sowie auf www.e-fi.de zum Herunterladen
bereit.

