



Fachbereich WD 5

Zukunftstechnologien identifizieren und priorisieren II

Strukturierung und Kategorisierung von Technologiefeldern

Zukunftstechnologien identifizieren und priorisieren II

Strukturierung und Kategorisierung von Technologiefeldern

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 102/26
Abschluss der Arbeit: 02.09.2026
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft, Energie und Klima

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Merkmale von zukünftigen, strategischen Technologien	6
3.	Analyse der priorisierten Technologienübersichten	9
3.1.	Aufbau und Konsistenz der Technologieübersichten	12
3.1.1.	Tiefe und Granularität der Gliederung	12
3.1.2.	Vorherrschende Kategorisierungslogik	14
3.1.3.	Funktionstypen der Technologieübersichten	17
3.1.4.	Ergebniszusammenfassung	19
3.2.	Analyse der ausgewählten Technologie- und Anwendungsfelder	19
3.2.1.	Wiederkehrende technologische Kernfelder	21
3.2.2.	Querschnitts- und anwendungsspezifische Technologien	23
3.2.3.	Wiederkehrende Anwendungs- und Transformationsfelder	23
3.2.4.	Zunehmende Verknüpfung von Technologie und Anwendung	24
3.2.5.	Konvergenz und Komplementarität von Technologien	25
3.2.6.	Gesellschaftliche Herausforderungen als ergänzende Perspektive	27
4.	Fazit und Implikationen	28
5.	Anlage: Übersicht Technologielisten	30

1. Einleitung

Zukunfts- bzw. Schlüsseltechnologien¹ sind ein wichtiger Faktor für künftiges Wirtschaftswachstum, industrielle Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität. Sie können neue Märkte eröffnen, bestehende Industrien verändern und zugleich Abhängigkeiten in strategisch wichtigen Bereichen verringern. Das wirtschaftliche Potenzial ist laut dem Beratungsunternehmen Boston Consulting Group (BCG) und dem Wissenschafts- und Gründungsnetzwerk UnternehmerTUM erheblich: Sie schätzen den weltweit adressierbaren Markt der sechs von ihnen untersuchten Fokustechnologiefelder für 2026 auf rund 4,1 Billionen Euro. Bis 2030 könnte er auf etwa 7,2 Billionen Euro wachsen.² Für deutsche Unternehmen sei davon 2030 grundsätzlich ein Marktvolumen von rund 1,7 Billionen Euro erreichbar. Auch für Europa werden mit Deep Tech große Wachstumschancen verbunden. Dem Beratungsunternehmen McKinsey zufolge könnte ein stärkeres europäisches Deep-Tech-Ökosystem bis 2030 bis zu eine Billion US-Dollar zusätzlichen Unternehmenswert und bis zu eine Million Arbeitsplätze hervorbringen. Gleichzeitig könnten eigene technologische Fähigkeiten die europäische Handlungsfähigkeit unter anderem in Energie, Verteidigung oder Ernährung stärken.³

Diese Chancen treffen auf einen intensiven internationalen Wettbewerb. Europa verfügt über eine starke Forschungslandschaft, qualifizierte Fachkräfte und eine breite industrielle Basis, hat aber insbesondere bei der Skalierung technologieorientierter Unternehmen gegenüber den USA Nachteile. Als Hemmnisse gelten unter anderem fragmentierte Märkte, begrenztes Wachstumskapital und regulatorische Unterschiede. Für Deutschland besteht die Herausforderung dabei nicht nur darin, neue Technologien zu entwickeln, sondern sie auch frühzeitig wirtschaftlich anzuwenden. Es gibt daher den Wettlauf um **Entwicklung, Skalierung und Bereitstellung einer Technologie** sowie den Wettlauf um ihre **Anwendung und Wertschöpfung** in Produkten, Prozessen und Geschäftsmodellen.⁴

-
- 1 Im Folgenden werden Begriffe wie Zukunftstechnologien, Schlüsseltechnologien oder Emerging Technologies – wie auch in der breiten politischen und wirtschaftlichen Debatte – weitgehend synonym verwendet. Für eine **kompakte Beschreibung** der einzelnen Fachbegriffe siehe Wissenschaftliche Dienste (2026), Grundlegende Konzepte des Technologie- und Innovationsmanagements vor dem Hintergrund von Zukunftstechnologien I – Konzeptsteckbriefe zu Technologiebegriffen und -typen, WD 5-037/26. Für eine **Analyse der Verwendung** der Technologiebegriffe siehe Wissenschaftliche Dienste (2026), Zukunftstechnologien identifizieren und priorisieren II – Strukturierung und Kategorisierung von Technologiefeldern, WD 5-102/26.
 - 2 BCG (Boston Consulting Group) & UnternehmerTUM (2026), Wachstumspfade für Deutschland - Roadmap zur wettbewerbsfähigen Hightech-Nation, https://assets.foleon.com/eu-central-1/de-uploads-7e3kk3/50809/wachstumspfade_fr_deutschland.9a17fb08f341.pdf.
 - 3 Erntell, Berger-de León, Flötotto, Bout, Henz, Olanrewaju & Musai (2025), Europe's deep-tech engine could spur \$1 trillion in economic growth, <https://www.mckinsey.com/capabilities/business-building/our-insights/eu-ropes-deep-tech-engine-could-spur-1-trillion-in-economic-growth>.
 - 4 BCG (Boston Consulting Group) & BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.) (2025), Deep Tech für den Industriestandort Deutschland - Wie Zukunftstechnologien Wachstum und Resilienz stärken können, <https://web-assets.bcg.com/1f/a9/0d43419a48bdad302d71149b61f7/bcg-bdi-deeptech.pdf>.

Vor diesem Hintergrund hat die Bundesregierung im Juli 2025 die **Hightech Agenda Deutschland** beschlossen.⁵ Sie soll Forschungs-, Technologie- und Innovationspolitik stärker auf Wertschöpfung, Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität ausrichten und konzentriert sich zunächst auf sechs Schlüsseltechnologien: Künstliche Intelligenz, Quantentechnologien, Mikroelektronik, Biotechnologie, Fusion und klimaneutrale Energieerzeugung sowie Technologien für klimaneutrale Mobilität. International verfolgen eine Reihe von Staaten diese Strategie der Forschungs- und Industriepolitik.⁶ Die damit verbundene Fokussierung verdeutlicht eine grundlegende Herausforderung strategischer Technologiepolitik: Staaten können nicht sämtliche technologischen Entwicklungen mit gleicher Intensität verfolgen. Sie müssen entscheiden, **welche Technologien besonders relevant sind, wo eigene Stärken ausgebaut werden sollen und auf welche Felder begrenzte Ressourcen konzentriert werden.**

Damit stellt sich zunächst die übergeordnete Frage, **wie Zukunfts- und Schlüsseltechnologien identifiziert, bewertet und priorisiert werden können.** Eine solche Priorisierung setzt jedoch bereits voraus, dass ein breites Technologiespektrum strukturiert und in handhabbare Felder überführt wird. Denn die Art der Strukturierung beeinflusst damit, welche Technologien sichtbar werden, wie sie miteinander verglichen werden können und auf welcher Ebene politische Prioritäten gesetzt werden.

Die vorliegende Ausarbeitung untersucht daher speziell, **wie Technologiefelder in unterschiedlichen Studien und Strategiepapieren strukturiert und kategorisiert werden und welche Folgen dies für die Prioritätensetzung hat.** Im Mittelpunkt stehen folgende Leitfragen:

- Wie werden Technologiefelder in unterschiedlichen Studien und Strategiepapieren strukturiert, kategorisiert und miteinander verknüpft, und welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zeigen sich dabei?
- Welche Schlussfolgerungen ergeben sich aus diesen unterschiedlichen Strukturierungs- und Kategorisierungsansätzen für die Erstellung, Interpretation und Nutzung von Technologieübersichten im Rahmen strategischer Priorisierungsentscheidungen?

Kapitel 2 stellt zunächst Merkmale zukünftiger und strategischer Technologien heraus und schafft damit eine begriffliche Grundlage für die weitere Analyse. Kapitel 3 untersucht ausgewählte Technologieübersichten in zwei Schritten. Zunächst werden Aufbau und Konsistenz der Listen verglichen. Im Mittelpunkt stehen Tiefe und Granularität, die jeweils vorherrschende Kategorisierungslogik sowie unterschiedliche Funktionstypen. Anschließend richtet sich der Blick auf die Inhalte: wiederkehrende technologische Kernfelder, Querschnitts- und anwendungsspezifische Technologien sowie zentrale Anwendungs- und Transformationsfelder. Darüber hinaus wird betrachtet, wie Technologien und Anwendungen miteinander verknüpft werden, welche technologischen Komplementaritäten erkennbar sind und in welchem Umfang gesellschaftliche Herausforderungen eine zusätzliche Ordnungsperspektive bilden. Kapitel 4 fasst die Ergebnisse

5 <https://hightech-agenda-deutschland.de/>.

6 Frantz & Warta (2025), Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien (Endbericht), BMK, Technopolis, https://repository.fteval.at/736/1/Schl%C3%BCsseltechnologien_Endbericht_BMK.pdf, S. 15 ff.

zusammen und leitet daraus Schlussfolgerungen für die Erstellung und Nutzung von Technologielisten ab. Eine Übersicht der untersuchten Technologiefelder befindet sich in der Anlage.

Diese Ausarbeitung ist Teil einer Reihe zu Zukunftstechnologien und zum Technologie- und Innovationsmanagement. Ergänzende Veröffentlichungen behandeln grundlegende Technologie- und Innovationskonzepte (WD 5-037/26, WD 5-097/26, WD 5-098/26 und WD 5-099/26), Verfahren der strategischen Vorausschau (WD 5-100/26) sowie Bewertungsansätze und Auswahlkriterien für Zukunftstechnologien (WD 5-101/26).

2. Merkmale von zukünftigen, strategischen Technologien

In verschiedenen Technologieberichten und Quellen werden **unterschiedliche Technologiebegriffe verwendet**, um Technologien von besonderer gegenwärtiger oder zukünftiger Bedeutung zu kennzeichnen. Darunter sind beispielsweise Schlüsseltechnologien, Zukunftstechnologien, Emerging Technologies, kritische Technologien, General Purpose Technologies oder Deep Tech, auf welche bereits detailliert in anderen Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste eingegangen wurde.⁷

Diese Bezeichnungen beruhen jedoch nicht auf einem einheitlichen Begriffsverständnis. Eher **selten werden verschiedene Begriffe in den Berichten systematisch voneinander abgegrenzt**. Zumeist wird ein Begriff als Ausgangspunkt gesetzt und anschließend durch eine Kombination technologischer, wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und politischer Eigenschaften definiert. Die Begriffe sind daher vor allem in der Praxis **weniger als trennscharfe Kategorien**, sondern **eher als unterschiedliche sprachliche Rahmungen** eines weitgehend überlappenden Technologiebereichs zu verstehen.

Es liegt jenseits der Möglichkeiten dieser Arbeit die Begriffe bzw. die Verwendung zu vereinheitlichen. Zwar werden oftmals die Begriffe bzw. deren Verwendung detailliert beschrieben und die Überschneidungen sind deutlich und trotzdem werden die Begriffe weiterhin uneinheitlich verwendet. Damit ist fraglich, ob es eine sprachliche Präzisierung benötigt, oder ob man die begriffliche Vielfalt zulässt und Besonderheiten oder Details zusätzlich beschreibt. Dies wäre ohnehin naheliegend rein aus der Motivation heraus, weil die Themen so bereichs- und disziplinübergreifend, weshalb nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle Akteure des Forschungs- und Innovationssystems die speziellen Fachtermini und deren Abgrenzungen deuten und erfassen können.

Daher rücken bei den verschiedenen Begriffsverwendungen eher mehrere **wiederkehrende Beschreibung- und Wirkungsdimensionen** in den Mittelpunkt. Diese Merkmale, die möglicherweise wichtiger sind als die Fachbegriffe an sich, treten in Kombination auf und markieren den zentralen Unterschied zwischen „gewöhnlichen“ Technologien und solchen, die als besonders relevant für die Wettbewerbsfähigkeit und Souveränität ganzer Länder hervorgehoben werden.

⁷ Siehe Wissenschaftlichen Dienste (2026), Grundlegende Konzepte des Technologie- und Innovationsmanagements I - Konzeptsteckbriefe zu Technologiebegriffen und -typen, WD 5-037/26.

Charakteristisch ist zunächst ihre **breite und systemische Wirkung**: Sie dienen nicht nur einzelnen Anwendungen, sondern fungieren als Grundlage für Innovationen in unterschiedlichen Branchen, entfalten Wirkung entlang ganzer Wertschöpfungsketten und sind eng mit anderen Technologien verflochten.⁸

Hinzu kommt ein **überdurchschnittliches wirtschaftliches und strategisches Gewicht**. Diese Technologien werden mit erheblichen Beiträgen zu Wettbewerbsfähigkeit, Produktivität und Wachstum verbunden und spielen zugleich eine zentrale Rolle für industrielle Fähigkeiten, technologische Souveränität und die Resilienz gegenüber geopolitischen Abhängigkeiten.⁹ Gleichzeitig wird ihnen häufig eine besondere Bedeutung für die Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen zugeschrieben, etwa im Kontext von Klimaschutz, Energie- oder Gesundheitssystemen, auch wenn ihre Anwendungsbreite im Einzelfall begrenzt sein kann.¹⁰

Ein weiteres gemeinsames Merkmal liegt in ihren spezifischen Entstehungs- und Entwicklungsbedingungen. Es handelt sich häufig um **wissens- und forschungsintensive Technologien mit hohen Investitionsanforderungen, technischen Risiken und langen Entwicklungs- und Skalierungsprozessen**.¹¹ Schließlich ist ihre Einordnung dynamisch: Reifegrad, wirtschaftliche Bedeutung und strategische Relevanz entwickeln sich im Zeitverlauf unterschiedlich, sodass die

-
- 8 Stehnken (2022), Schlüsseltechnologien und technologische Zukunftsfelder in Ostdeutschland - Bestandsaufnahme und Potenziale, Fraunhofer IMW, prognos, <https://www.ostbeauftragte.de/ostb/Content/DE/Downloads/Themen/studie-schluessseltechnologien-endbericht.pdf?blob=publicationFile&v=1>; Hofmann et al. (2024), Schlüsseltechnologien - Position und Potenzial Österreichs, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, https://www.wifo.ac.at/wp-content/uploads/upload-5002/s_2024_schluessseltechnologien_54409433.pdf; Frantz & Warta (2025), Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien (Endbericht), BMK, Technopolis, https://repository.fteval.at/736/1/Schl%C3%BCsseltechnologien_Endbericht_BMK.pdf.
- 9 Stehnken (2022), Schlüsseltechnologien und technologische Zukunftsfelder in Ostdeutschland - Bestandsaufnahme und Potenziale, Fraunhofer IMW, prognos, <https://www.ostbeauftragte.de/ostb/Content/DE/Downloads/Themen/studie-schluessseltechnologien-endbericht.pdf?blob=publicationFile&v=1>; Thielmann (2025), Zur Bedeutung von Schlüsseltechnologien für die Wertschöpfung der Zukunft, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/cdda7d84-b45f-4cf0-ad66-1b74a78fa49c>.
- 10 Hofmann et al. (2024), Schlüsseltechnologien - Position und Potenzial Österreichs, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, https://www.wifo.ac.at/wp-content/uploads/upload-5002/s_2024_schluessseltechnologien_54409433.pdf; Frantz & Warta (2025), Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien (Endbericht), BMK, Technopolis, https://repository.fteval.at/736/1/Schl%C3%BCsseltechnologien_Endbericht_BMK.pdf.
- 11 Erntell, Berger-de León, Flötotto, Bout, Henz, Olanrewaju & Musai (2025), Europe's deep-tech engine could spur \$1 trillion in economic growth, <https://www.mckinsey.com/capabilities/business-building/our-insights/europes-deep-tech-engine-could-spur-1-trillion-in-economic-growth>; Stehnken (2022), Schlüsseltechnologien und technologische Zukunftsfelder in Ostdeutschland - Bestandsaufnahme und Potenziale, Fraunhofer IMW, prognos, <https://www.ostbeauftragte.de/ostb/Content/DE/Downloads/Themen/studie-schluessseltechnologien-endbericht.pdf?blob=publicationFile&v=1>.

Auswahl solcher Technologien stets vorläufig bleibt und sich mit neuen wissenschaftlichen, wirtschaftlichen oder geopolitischen Entwicklungen verschiebt.¹²

Insgesamt zeigt sich eine breite Verwendung von Begriffen bei eher ähnlichen Auffassungen, ohne dass daraus grundlegend unterschiedliche Ergebnisse oder Technologielandschaften entstehen. Die Studien **setzen zwar unterschiedliche Begriffe ein** und gewichten einzelne Dimensionen verschieden, **richten ihren Blick jedoch weitgehend auf ähnliche technologische Entwicklungen**. Wiederkehrend betrachtet werden:¹³

- digitale Technologien,
- künstliche Intelligenz,
- Quantentechnologien,
- Mikroelektronik,
- Biotechnologie,
- Robotik,
- fortgeschrittene Produktions- und Materialtechnologien sowie
- Energie-, Mobilitäts-, Raumfahrt- und Sicherheitstechnologien

Die begriffliche Wahl dürfte daher wesentlich vom institutionellen Umfeld, dem Entstehungszeitpunkt einer Studie, ihrem Adressatenkreis, ihrem Untersuchungszweck und gegebenenfalls auch vom Auftraggeber abhängen. Auffällig ist, dass die wenigsten Studien zunächst eine systematische Abgrenzung der verschiedenen Technologiebegriffe vornehmen. Stattdessen wird ein Begriff gewählt und anschließend entsprechend der jeweiligen Zielsetzung definiert. Teilweise werden innerhalb derselben Untersuchung sogar mehrere Begriffe parallel oder weitgehend synonym verwendet. Die Unterschiede zwischen den **Bezeichnungen sollten deshalb nicht überinterpretiert werden**. Sie markieren vor allem graduelle Deutungstendenzen und unterschiedliche Gewichtungen gemeinsamer Wirkungsdimensionen. In der Gegenüberstellung der Technologiefelder dürften

12 Thielmann (2025), Zur Bedeutung von Schlüsseltechnologien für die Wertschöpfung der Zukunft, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/cdda7d84-b45f-4cf0-ad66-1b74a78fa49c>; Frantz & Warta (2025), Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien (Endbericht), BMK, Technopolis, https://repository.fteval.at/736/1/Schl%C3%BCsseltechnologien_Endbericht_BMK.pdf.

13 Erntell, Berger-de León, Flötotto, Bout, Henz, Olanrewaju & Musai (2025), Europe's deep-tech engine could spur \$1 trillion in economic growth, <https://www.mckinsey.com/capabilities/business-building/our-insights/europes-deep-tech-engine-could-spur-1-trillion-in-economic-growth>; BCG (Boston Consulting Group) & UnternehmerTUM (2026): Wachstumspfade für Deutschland - Roadmap zur wettbewerbsfähigen Hightech-Nation, https://assets.foleon.com/eu-central-1/de-uploads-7e3kk3/50809/wachstumspfade_fr_deutschland.9a17fb08f341.pdf.

diese terminologischen Abgrenzungen eine geringere Rolle spielen als die zugrunde gelegten Kriterien, Perspektiven und Aggregationsebenen.

3. Analyse der priorisierten Technologienübersichten

Für die vorliegende Arbeit wurden 16 Berichte Studien und Aufzählungen ausgewertet, die insgesamt knapp 900 Einträge enthalten, darunter teils überschneidend oder mehrfach aufgeführte Technologiefamilien, konkrete Technologiefelder oder andere Kategorien zur Sortierung von strategischen oder zukunfts-kritischen Technologien. Diese Auswahl ist nicht allumfassend und soll als eine qualitative Annäherung an die Problemstellung verstanden werden. Dabei wurde auf fachliche Heterogenität, eine interdisziplinäre Sichtweise verschiedener Akteure und unterschiedlichen Funktionen wert gelegt. Letztere lässt sich grundlegend in zwei Funktionen von den untersuchten Technologieübersichten einteilen:

- Zur Priorisierung von Technologiefeldern, um forschungsseitig, politisch und wirtschaftlich Ressourcen zu lenken (Lenkungs-funktion) oder
- als Struktur, um Beziehungen, Anknüpfungspunkte, Expertisen oder Disziplinen für alle Involvierten zu definieren (Transparenzfunktion)

Die 16 Technologieübersichten¹⁴ in Tabelle 1 bilden die Datenbasis für die folgenden tiefergehende Analysen.

Tabelle 1: Übersicht zum Umfang der Technologieaufzählungen in den verwendeten Quellen (eigene Darstellung)

Quelle/Studie	Überkategorien*	Hauptkategorien	Subkategorien
1. BCG (Boston Consulting Group) & UnternehmerTUM (2026), Wachstumspfade für Deutschland - Roadmap zur wettbewerbsfähigen Hightech-Nation, https://assets.foleon.com/eu-central-1/de-uploads-7e3kk3/50809/wachstumspfade_fr_deutschland.9a17fb08f341.pdf .	3	10	–
2. BCG (Boston Consulting Group) & BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie) (2025), Deep Tech für den Industriestandort Deutschland - Wie Zukunftstechnologien Wachstum und Resilienz stärken können, https://web-assets.bcg.com/1f/a9/0d43419a48bdad302d71149b61f7/bcg-bdi-deeptech.pdf .	1	4	–

14 In dieser Arbeit werden die Technologieübersichten synonym mit ähnlichen Begriffen wie Technologieraster, -prioritätenlisten, -aufzählungen und -felder verwendet.

Quelle/Studie	Überkategorien*	Hauptkategorien	Subkategorien
3. BMFTR (2025), Hightech Agenda Deutschland, https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/L/31881_Hightech_Agenda_Deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=14 .	2	11	–
4. Kroll , Berghäuser, Blind, Neuhäusler, Scheifele, Thielmann & Wydra (2022), Schlüsseltechnologien, Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 7-2022, Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI), https://www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Studien/2022/StuDIS_07_2022.pdf .	4	13	74
5. Hofmann , Janger, Strauss-Kollin, Uhl, Unterlass, Hartmann & Schütz (2024), Schlüsseltechnologien - Position und Potenzial Österreichs, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, https://www.wifo.ac.at/wp-content/uploads/upload-5002/s_2024_schlueseltechnologien_54409433.pdf .	3	4	19
6. Frantz & Warta (2025), Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien (Endbericht), BMK, Technopolis, https://repository.fte-val.at/736/1/Schl%C3%BCsseltechnologien_Endbericht_BMK.pdf .	8	69	–
7. TNO (2023), Key Enabling Technologies, im Auftrag von der Niederländischen Organisation für Wissenschaftliche Forschung, https://www.nwo.nl/en/key-enabling-technologies .	8	44	–
8. Stehnken , Aminova & Klement (2022), Schlüsseltechnologien und technologische Zukunftsfelder in Ostdeutschland - Bestandsaufnahme und Potenziale, Fraunhofer IMW, prognos, https://www.ostbeauftragte.de/ostb/Content/DE/Downloads/Themen/studie-schlueseltechnologien-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1 .	6	17	–
9. Schmoch , Beckert, Reiß, Neuhäusler & Rothengatter (2020), Identifizierung und Bewertung von Zukunftstechnologien für Deutschland, Fraunhofer ISI, https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/a3c358ed-ff97-4a99-8741-5aef777b3b61/download .	7	32	–
10. EU (o. D.), Critical technology areas for the EU's economic security for further risk assessment with Member States in Bailey, Farinha, Mochan, Riveong & Pólvera (2025), Eyes on the future – Signals from recent reports on emerging technologies and breakthrough innovations to support European Innovation Council strategic intelligence, Volume 3, Publications Office of the European Union, https://data.europa.eu/doi/10.2760/1104283 .	10	42	–

Quelle/Studie	Überkategorien*	Hauptkategorien	Subkategorien
11. Strategic Technologies for Europe Platform (STEP) (o. D.), Targeted investment areas; in Bailey, Farinha, Mochan, Riveong & Pólvara (2025), Eyes on the future – Signals from recent reports on emerging technologies and breakthrough innovations to support European Innovation Council strategic intelligence, Volume 3, Publications Office of the European Union, https://data.europa.eu/doi/10.2760/1104283 .	3	36	–
12. Bobier , Coulin, Morez, Emerson, Wagle & Gourévitch (2023), An Investor's Guide to Deep Tech, Boston Consulting Group, https://web-assets.bcg.com/a8/e4/d3f2698b436aa0f23aed168cd2ef/bcg-an-investors-guide-to-deep-tech-nov-2023-1.pdf .	2	20	70
13. EIC (European Innovation Council) Taxonomy 2024 in Bailey, Farinha, Mochan & Polvora (2024), Eyes on the Future - Signals from recent reports on emerging technologies and breakthrough innovations to support European Innovation Council strategic intelligence - Volume 1, Publications Office of the European Union, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC137811 .	11	116	–
14. Langkau , Kamamia, Maisel, Beck, Bodenheimer, Bregadze, Deubzer, Döscher, Eberling, Haendel, Khamashta, Krail, Kunze, Loibl, Marwede, Neef, Rostek, Rückschloss, Shirinzadeh, Tercero Espinoza & Tippner (2026), Rohstoffe für Zukunftstechnologien, DERA Rohstoffinformationen 67, https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/SharedDocs/Downloads/Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-67_vorversion.pdf?__blob=publicationFile&v=3 .	4	35	–
15. Deloitte (2025), Digitale Technologien made in Germany - Deutschland im Rennen um die globale Innovationsführerschaft, https://www.deloitte.com/de/de/Industries/government-public/research/deutschland-im-globalen-technologiewettbewerb.html .	4	21	–
16. EIC (European Innovation Council) and SMEs Executive Agency (2025), Impact report 2025 - Scaling Deep Tech in Europe, Publications Office of the European Union, https://data.europa.eu/doi/10.2826/1391424 .	3	12	160

Anmerkungen 1: *Nicht alle Überkategorien sind zwangsweise auf einer Ebene verortet, sondern teilweise mehrdimensional zu verstehen. So werden verschiedene Perspektiven miteinander kombiniert, wie z. B. eine Überkategorie für Technologien in der einen Quellen und eine Überkategorie für kritische Anwendungsbereiche von Technologien in einer anderen Quelle. Daher sind die reinen Zahlen nur bedingt vergleichbar.

Anmerkungen 2: Die **fett**-markierten Wörter werden im Folgenden zur Benennung der jeweiligen Quelle genutzt.

Die untersuchten Studien und Berichte **unterscheiden sich erheblich** darin, wie sie Schlüssel-, Zukunfts- oder kritische Technologien strukturieren. Die Unterschiede betreffen nicht nur die Zahl der genannten Technologien, sondern auch die Tiefe der Gliederung, die Granularität der verwendeten Begriffe und vor allem die zugrunde liegende Kategorisierungslogik. Die formalen Ebenen einer Aufzählung – etwa Oberkategorie, Hauptkategorie und Unterkategorie – sind dabei nur eingeschränkt vergleichbar. Auf derselben formalen Ebene können Technologiefelder, einzelne Technologien, Sektoren, Anwendungsbereiche oder strategische Handlungsfelder stehen. Umgekehrt können zwei formal gleich tiefe Klassifikationen sehr unterschiedliche inhaltliche Auflösungen erreichen. Für den Vergleich von ausgewählten Technologiefeldern ist deshalb zwischen der **Tiefe und Granularität der Gliederung**, der **inhaltlichen Kategorisierungslogik** sowie der **Funktion der jeweiligen Technologieaufzählung** zu unterscheiden.

3.1. Aufbau und Konsistenz der Technologieübersichten

3.1.1. Tiefe und Granularität der Gliederung

Die untersuchten Technologieaufzählungen weisen zunächst eine sehr unterschiedliche formale Tiefe auf. Die Mehrzahl arbeitet mit zwei inhaltlichen Ebenen: Einem übergeordneten Feld werden einzelne Technologien oder spezifischere Teilbereiche zugeordnet. Andere Studien differenzieren über drei Ebenen bis zu Technologiefamilien, Einzeltechnologien oder technischen Verfahren. Die Zahl der Ebenen ist jedoch nur ein grober Indikator für die tatsächliche Granularität. Entscheidend ist vielmehr, auf welchem **inhaltlichen Abstraktionsniveau** eine Aufzählung beginnt und bis zu welchem Konkretisierungsgrad sie reicht.

Am oberen Ende des Abstraktionsspektrums stehen relativ **kurze strategische Prioritätenlisten**. Sie beschränken sich auf wenige breite Technologiefelder und verzichten weitgehend auf eine weitere technische Ausdifferenzierung. Besonders deutlich ist dies bei der Hightech Agenda Deutschland, die sechs Schlüsseltechnologien – darunter Künstliche Intelligenz, Quantentechnologien, Mikroelektronik und Biotechnologie – sowie ergänzend strategische Forschungsfelder ausweist. Auch die BCG/BDI-Studie konzentriert sich mit Künstlicher Intelligenz, KI-basierter Robotik, Quantentechnologien sowie mRNA-Medikamenten und Gen- und Zelltherapien auf wenige ausgewählte Deep-Tech-Felder. Solche Aufzählungen bewegen sich überwiegend auf der Ebene breiter Technologiefelder oder strategischer Schwerpunkte. Sie zielen weniger auf eine vollständige technologische Taxonomie als auf die Identifikation einer begrenzten Zahl besonders relevanter Prioritäten (BMFTR, 2025).

Eine mittlere Granularität weisen Aufzählungen auf, die breite Technologiefelder systematisch in Technologiefamilien oder Teiltechnologien untergliedern. Ein Beispiel ist die Klassifikation von TNO (2023). Übergeordnete Bereiche wie „Advanced materials“, „Photonics and optical technologies“, „Quantum technologies“, „Digital and information technologies“ oder „Life science and biotechnologies“ werden jeweils in spezifischere technologische Felder zerlegt. Unter Quantentechnologien stehen beispielsweise Quantum Computing, Quantum Communication und Quantum Sensing; chemische Technologien werden unter anderem in Process Technology, Reactor Engineering, Separation Technology und Catalysis differenziert. Ähnlich strukturieren Frantz und Warta ihre Aufzählung. Breite Felder wie fortgeschrittene Materialien, digitale und Informationstechnologien, Quantentechnologien, Mikroelektronik oder Life-Science-Technologien werden durch konkrete Teiltechnologien wie Metamaterialien, Cloud and Edge Computing, Quantenkryptografie, Halbleiterfertigungsanlagen oder Nanobiotechnologie operationalisiert.

Noch stärker ausdifferenziert ist die Klassifikation von Kroll et al. Dort werden zunächst Gruppen von Schlüsseltechnologien wie Digitalisierungstechnologien, Materialwissenschaften, Produktion oder Bio-/Lebenswissenschaften unterschieden. Innerhalb dieser Gruppen werden Technologiefelder wie Künstliche Intelligenz, Big Data, Nanotechnologie, Advanced Manufacturing oder Biotechnologie ausgewiesen und anschließend teilweise nochmals in einzelne Verfahren und technische Ansätze zerlegt. Künstliche Intelligenz umfasst beispielsweise Entscheidungsmanagement, Signalerkennung, Spracherkennung, Computerlinguistik, Video- und Bildverarbeitung sowie Deep Learning. Unter Nanotechnologie werden unter anderem Nanopartikel, Nanodrähte und -röhren, 2D-Materialien, nanostrukturierte Beschichtungen und Nanomembranen gefasst. Damit reicht die Klassifikation von breiten Technologiedomänen bis in relativ spezifische technologische Ansätze hinein.

Die Granularität kann allerdings auch bei nur zwei Ebenen sehr hoch sein. Dies zeigt insbesondere die Studie von Langkau et al. Sie ordnet konkrete Zukunftstechnologien vier übergeordneten Bereichen zu: „Mobilität, Luft- und Raumfahrt“, „Digitalisierung“, „Strom- und Datennetze“ sowie „Energie- und Dekarbonisierungstechnologien“. Unter diesen Bereichen finden sich bereits sehr spezifische technische Systeme und Verfahren wie Lithium-Feststoffbatterien für mobile Anwendungen, mikroelektronische Kondensatoren, Indium-Zinn-Oxid in der Displaytechnik, Redox-Flow-Speicher, Direct Air Capture, Small Modular Reactors oder Laser- und Magnetfusion. Formal ist die Gliederung damit nur zweistufig, inhaltlich reicht sie jedoch wesentlich tiefer als manche dreistufige Klassifikation. Gleiches gilt für die Studie von Deloitte, in der beispielsweise Neural Networks & Deep Learning, Neuromorphic Computing, EUV-Fotolithografie, elektrooptische Chip-Technologien oder energieeffiziente Computerhardware als konkrete Technologiezweige ausgewiesen werden.¹⁵

Dies verweist auf einen grundlegenden Zusammenhang zwischen **Untersuchungszweck und Granularität**. Je stärker Technologien empirisch operationalisiert werden müssen, desto spezifischer müssen sie häufig abgegrenzt werden. Patentanalysen, wie bei Deloitte, benötigen beispielsweise Suchfelder, die einzelne technologische Entwicklungen hinreichend präzise erfassen können. Rohstoffanalysen, wie bei Langkau et al. müssen unterscheiden können, welche Materialien für unterschiedliche Batterietypen, Halbleiter, Energieanlagen oder Produktionsverfahren benötigt werden. Politische Berichte oder Dokumente können demgegenüber mit wesentlich breiteren Kategorien arbeiten, weil ihre Funktion zunächst darin besteht, strategische Aufmerksamkeit und Ressourcen auf wenige Felder zu konzentrieren. Eine feinere Gliederung ist daher nicht grundsätzlich „besser“ als eine gröbere. Sie erfüllt lediglich eine andere analytische oder politische Funktion.

Zudem unterscheiden sich die Aufzählungen hinsichtlich ihrer **Granularitätsspanne**. Einige Systeme bleiben über alle Kategorien hinweg auf einem relativ ähnlichen Abstraktionsniveau. TNO nennt beispielsweise überwiegend Technologiefamilien und technische Teilgebiete.¹⁶ Andere Aufzählungen verbinden dagegen sehr breite Felder mit eng abgegrenzten technischen Verfahren

15 Deloitte (2025), Digitale Technologien made in Germany - Deutschland im Rennen um die globale Innovationsführerschaft, <https://www.deloitte.com/de/de/Industries/government-public/research/deutschland-im-globalen-technologiewettbewerb.html>.

16 TNO (2023), Key Enabling Technologies, im Auftrag von der Niederländischen Organisation für Wissenschaftliche Forschung, <https://www.nwo.nl/en/key-enabling-technologies>.

oder Anwendungen. Besonders umfassende Portfolio-Taxonomien können auf einer Ebene sowohl Technologiefamilien als auch technische Systeme, Anwendungen oder Problemfelder enthalten. Die EIC Taxonomy reicht beispielsweise von Kategorien wie „Quantum Technologies“ oder „Artificial Intelligence & Machine Learning“ bis zu „Autonomous Vehicles“, „Healthcare Systems & Emergency Preparedness“, „Waste“ oder „Cities & Territorial Planning“.¹⁷ Im EIC Impact Report wird diese Breite durch eine zusätzliche Ebene weiter ausdifferenziert: Unter „AI, Data & ICT“ finden sich etwa Generative AI & Foundation Models, Machine & Deep Learning oder Computer Vision, während andere Bereiche stärker sektor- oder anwendungsbezogen aufgebaut sind.¹⁸

Die **Tiefe einer Technologiegliederung sollte deshalb nicht allein anhand der Zahl ihrer formalen Ebenen beurteilt werden**. Aussagekräftiger ist eine Kombination mehrerer Merkmale: die Zahl der Ebenen, die Breite der Kategorien, die Spezifität der untersten Ebene sowie die Spanne zwischen den allgemeinsten und den konkretesten Elementen. Auf dieser Grundlage reicht das Spektrum der untersuchten Quellen von hoch aggregierten strategischen Prioritäten bis zu sehr fein ausdifferenzierten Technologie- und Innovationsportfolios.

3.1.2. Vorherrschende Kategorisierungslogik

Noch grundlegender als die Unterschiede der Granularität sind die Unterschiede darin, **was die Studien überhaupt ordnen**. Die Aufzählungen stellen keineswegs durchgängig Technologietaxonomien dar, in denen allgemeine Technologien in immer spezifischere Untertechnologien zerlegt werden. Vielmehr lassen sich **unterschiedliche Beziehungen zwischen technologischen und anwendungsbezogenen Elementen** beobachten. Entscheidend ist daher, ob eine Studie primär Technologien und Technologiefamilien klassifiziert, Technologien bestimmten Anwendungsbereichen zuordnet oder Technologie- und Anwendungsperspektiven parallel bzw. integriert behandelt. Die untersuchten Berichte und Studien zeigen verschiedene Logiken auf, die zu unterschiedlichen mehr oder weniger konsistenten Kategorisierungen führen:

Tabelle 2: Kategorisierungstypen von Technologiefeldern

Klassifizierungstyp	Grundlogik	Kennzeichen	Beispiele
A. Technologie-zentrierte Klassifikation	Technologie → Technologiefamilie/Teil-technologie	Die Gliederung bleibt im Wesentlichen innerhalb der technologischen Dimension. Anwendungen oder Sektoren dienen nicht	Kroll et al.; Frantz & Warta; TNO; EU Critical Technology Areas; STEP

17 EIC (European Innovation Council) Taxonomy 2024 in Bailey, Farinha,Mochan & Polvora (2024), Eyes on the Future - Signals from recent reports on emerging technologies and breakthrough innovations to support European Innovation Council strategic intelligence - Volume 1, Publications Office of the European Union, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC137811>.

18 EIC (European Innovation Council) and SMEs Executive Agency (2025), Scaling Deep Tech in Europe – European Innovation Council – Impact report 2025, Publications Office of the European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2826/1391424>.

Klassifizierungstyp	Grundlogik	Kennzeichen	Beispiele
		als eigenständiges Ordnungsprinzip.	
B. Technologiezentrierte Liste mit funktionaler bzw. anwendungsbezogener Beimischung	überwiegend Technologien, einzelne Kategorien aber bereits über Funktion oder Anwendung definiert	Technologische Felder dominieren, sind aber nicht vollständig typologisch homogen.	BCG & BDI; Deloitte
C. Bereiche/Sektoren → zugeordnete Technologien	Anwendungs-, Wirtschafts- oder Funktionsbereich bildet die Oberstruktur; darunter werden relevante Technologien eingeordnet	Technologie wird aus der Perspektive ihres Einsatzbereichs strukturiert.	Stehnken et al.; Schmoch et al.; Langkau et al.
D. Technologieperspektive und Anwendungsperspektive werden nebeneinandergestellt	Technologien und Anwendungs-/Strategiefelder bilden getrennte oder parallel geführte Perspektiven	Keine durchgehende Ober-Unter-Hierarchie zwischen beiden Perspektiven.	BCG & UnternehmerTUM; BMFTR; Hofmann et al.; Bobier et al.
E. Integrierte Mischklassifikation aus Technologien, Sektoren, Anwendungen und Problemfeldern	mehrere Elementtypen werden innerhalb einer gemeinsamen Klassifikation miteinander verschachtelt	Die Hierarchie ist formal eindeutig, semantisch wechseln aber die Elementtypen zwischen und teilweise innerhalb der Ebenen.	EIC Taxonomy; EIC Impact Report

Eine erste Gruppe folgt einer weitgehend **technologiezentrierten Kategorisierungslogik**. Ausgangspunkt ist die wissenschaftlich-technische Verwandtschaft der betrachteten Elemente. Breite Technologiefelder werden in Technologiefamilien und gegebenenfalls in konkrete Einzeltechnologien untergliedert. Besonders ausgeprägt ist diese Logik bei TNO (2023), Frantz & Warta sowie in weiten Teilen bei Kroll et al. sowie bei den beiden EU Quellen Critical Technology Areas und STEP. Die Beziehung lautet in diesen Fällen im Wesentlichen: **Technologiefeld → Technologiefamilie bzw. Einzeltechnologie**.

Eine zweite Variante bleibt zwar technologiezentriert, verwendet aber bereits **funktionale oder anwendungsbezogene Kriterien zur Gruppenbildung**. Dies zeigt sich etwa bei Deloitte. Neben „Enabler-Technologien“ werden „Technologien für vernetzte Mobilität“, „Digitale Anwendungstechnologien in der Industrie“ und „Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz“ unterschieden. Die untergeordneten Elemente sind überwiegend konkrete Technologien, ihre Zusammenfassung erfolgt jedoch nicht ausschließlich aufgrund technologischer Verwandtschaft, sondern teilweise aufgrund eines gemeinsamen Einsatzbereichs oder einer gemeinsamen Funktion. Auch bei der BCG/BDI-Studie dominiert weiterhin die technologische Perspektive, die Kategorien sind aber nicht vollständig auf derselben technisch-systematischen Ebene angelegt.

Eine dritte Gruppe kehrt die Perspektive um. Hier bilden **Sektoren, Anwendungsbereiche oder Funktionsräume die übergeordnete Ordnung**, denen anschließend relevante Technologien zugewiesen werden. Besonders deutlich ist dies bei Schmoch et al. und Stehnken et al. Die Studie von Schmoch et al. unterscheidet Informationstechnik, Produktionstechnik, Werkstoffe, Gesundheit, Verkehr, Umwelt und Klima sowie Energie und ordnet diesen Bereichen Technologien wie Blockchain, Künstliche Intelligenz, 3D-Druck, neue Impfstoffe, Brennstoffzellen, Recycling oder Wasserstoffproduktion zu. Die Beziehung lautet daher nicht „Technologie → Untertechnologie“, sondern „Bereich/Sektor → relevante Technologie“. Bei Stehnken et al. können dieselben Technologien in mehreren Bereichen auftreten. Batterietechnologie und Wasserstoff werden beispielsweise sowohl im Mobilitäts- als auch im Energiekontext erfasst. Mehrfachzuordnungen sind hier kein methodischer Fehler, sondern eine Konsequenz der anwendungsbezogenen Perspektive. Auch bei Langkau et al. bilden Mobilität, Digitalisierung, Netze sowie Energie und Dekarbonisierung übergeordnete Funktions- und Anwendungsbereiche, in denen konkrete Technologien aufgrund ihrer jeweiligen Relevanz verortet werden.

Eine vierte Kategorisierungslogik besteht darin, **Technologie- und Anwendungsperspektive ausdrücklich nebeneinanderzustellen**. In diesen Fällen handelt es sich nicht um eine einzige durchgehende Taxonomie, sondern um mehrere Perspektiven auf denselben Gegenstandsbereich. In der Hightech Agenda Deutschland werden sechs „Schlüsseltechnologien“ durch „strategische Forschungsfelder“ wie Luft- und Raumfahrt, Gesundheitsforschung, Sicherheits- und Verteidigungsforschung oder Meeres-, Klima- und Nachhaltigkeitsforschung ergänzt. Technologische und forschungs- bzw. anwendungsbezogene Prioritäten werden damit bewusst parallel geführt. Eine Interpretation der Forschungsfelder als Unter- oder Oberkategorien der Schlüsseltechnologien würde die tatsächliche Struktur der Agenda verfehlen. Ebenso die Kategorien bei BCG & UnternehmerTUM repräsentieren unterschiedliche Arten strategischer Felder und keine durchgehend hierarchische technologische Ordnung. Auch Hofmann et al. verbinden technologiezentrierte Kategorien mit anwendungsbezogenen Perspektiven, etwa industriellen, grünen und handelsbasierten Technologiegruppen, ohne diese in eine einheitliche Ordnung zu integrieren (Hofmann et al.). Am deutlichsten trennt Bobier et al. beide Ebenen: Neben einer Technology-Perspektive mit Technologiefamilien wie KI, Quantentechnologien oder synthetischer Biologie steht eine separate Use-Case-Perspektive mit Bereichen wie Mobilität, Gesundheit, Energie, Raumfahrt oder Verteidigung. Technologien und Anwendungen lassen sich so in einer Matrix zueinander in Beziehung setzen.

Eine fünfte Variante bilden **integrierte Mischklassifikationen**, in denen Technologie-, Anwendungs- und Sektorkategorien verschachtelt werden. Besonders deutlich ist dies in den EIC-Systematiken. In der EIC Taxonomy stehen auf oberster Ebene etwa Health, Mobility und Agriculture & Food neben Hardware & Semiconductors, Advanced Manufacturing, Advanced Materials und ICT. Bereits hier werden Anwendungsdomänen und Technologien kombiniert. Auf der nächsten Ebene zeigt sich diese Heterogenität noch stärker: Unter Health finden sich neben Verfahren auch Krankheitsfelder wie Cancer oder Cardiovascular; andere Bereiche umfassen Technologien, Infrastrukturen oder Problemstellungen.

Auch im EIC Impact Report ordnen sich unter dieser Logik „Digital, Industry and Space“, „Green“ und „Health“ technologische Plattformen, Sektoren und Anwendungen gemeinsam an. Die Klassifikation ist daher weniger eine reine Technologietaxonomie als vielmehr eine **Portfolioordnung**, die unterschiedliche Projekte in ein gemeinsames Raster überführt.

Insgesamt zeigt sich damit, dass die betrachteten Aufzählungen unterschiedliche Beziehungen zwischen Technologie und Anwendung konstruieren. Diese reichen von **Technologie → Unter-technologie** über **Sektor bzw. Anwendungsbereich → Technologie** bis zur **parallelen Betrachtung von Technologie und Use Case** oder zu einer **integrierten Verschachtelung mehrerer Elementtypen**. Diese Unterschiede sind für den Vergleich zentral, weil identisch benannte Ebenen in unterschiedlichen Studien gänzlich verschiedene Funktionen erfüllen können.

3.1.3. Funktionstypen der Technologieübersichten

Die unterschiedlichen Strukturen lassen sich schließlich mit der jeweiligen **Funktion der Aufzählung** verbinden. Aus dem Vergleich ergeben sich fünf idealtypische Funktionstypen. Die Typisierung beschreibt dabei keine vollständig trennscharfen Gruppen; einzelne Studien können Merkmale mehrerer Typen verbinden. Sie verdeutlicht jedoch, warum Umfang, Granularität und Kategorisierungslogik systematisch variieren.

Tabelle 3: Funktionstypen der Technologieübersichten

Typ	Charakteristik	typische Beispiele
1. Strategische Prioritätenliste	wenige politisch oder wirtschaftlich priorisierte Felder	BCG & BDI, BMFTR
2. Technologietaxonomie	technisch verwandte Technologien und Untertechnologien	TNO, Kroll et al., Frantz & Warta
3. Sektorales Technologieportfolio	Anwendungsdomänen mit jeweils relevanten Technologien	Schmoch et al., Langkau et al.
4. Regulatorisch-strategische Technologieliste	Technologien nach Kritikalität, Souveränität oder Förderfähigkeit	EU Critical Technologies, STEP
5. Mehrdimensionale Innovations-/Investitionstaxonomie	Kombination von Technologie, Anwendung, Sektor und Funktion	EIC Taxonomy, EIC Impact Report, Bobier et al.

Der erste Typ ist die **strategische Prioritätenliste**. Ihr Zweck besteht darin, aus einem wesentlich größeren Technologiespektrum eine begrenzte Zahl strategisch besonders relevanter Felder hervorzuheben. Entsprechend bleiben die Kategorien breit und kommunikativ anschlussfähig. Eine vollständige technologische Systematik ist weder notwendig noch beabsichtigt. Die Hightech Agenda Deutschland und die BCG & BDI-Studie entsprechen diesem Typ besonders deutlich. Auch BCG & UnternehmerTUM verwenden eine vergleichsweise kleine Zahl strategischer Technologie- und Handlungsfelder. Solche Listen dienen vor allem der politischen oder wirtschaftsstrategischen Schwerpunktsetzung: Sie definieren, auf welche Technologien oder Felder Aufmerksamkeit, Investitionen, Roadmaps oder weitere Maßnahmen konzentriert werden sollen.

Der zweite Typ ist die **Technologietaxonomie**. Hier steht eine systematische Strukturierung technologischer Wissens- und Entwicklungsfelder im Vordergrund. Breitere Technologiefamilien werden in spezifischere Teiltechnologien untergliedert, um technologische Zusammenhänge sichtbar und einzelne Entwicklungen analytisch abgrenzbar zu machen. Typische Beispiele sind

in TNO, Frantz und Warta sowie Kroll et al. zu finden. Die größere Tiefe und Differenzierung dieser Aufzählungen ist funktional: Sie soll nicht nur Prioritäten benennen, sondern technologische Räume systematisch beschreiben und eine Grundlage für weitere Bewertungsschritte schaffen.

Der dritte Typ ist das **sektorale Technologieportfolio**. Ausgangspunkt ist hier ein wirtschaftlicher, gesellschaftlicher oder funktionaler Bereich, für den relevante Technologien zusammengestellt werden. Damit rückt weniger die technologische Verwandtschaft als die Frage in den Mittelpunkt, welche Technologien zur Entwicklung eines bestimmten Sektors oder Anwendungsfeldes beitragen. Schmoch et al., Stehnken et al. und Langkau et al. weisen Elemente dieser Logik auf. Sie ordnen Technologien etwa den Bereichen Produktion, Gesundheit, Verkehr, Energie, Mobilität oder Dekarbonisierung zu. Ein Vorteil dieser Perspektive liegt darin, technologische Konvergenzen und Mehrfachanwendungen sichtbar zu machen. Dieselbe Technologie kann in mehreren Anwendungsfeldern relevant sein und entsprechend mehrfach auftreten.

Der vierte Typ ist die **regulatorisch-strategische Technologielliste**. Hier dient die Klassifikation dazu, Technologiesegmente für konkrete politische Instrumente, Sicherheitsbewertungen oder Förderentscheidungen abzugrenzen. Besonders deutlich ist dies bei der Kategorisierung von Critical Technology Areas der EU und bei STEP. Die Aufzählungen müssen einerseits hinreichend breit sein, um strategisch wichtige Entwicklungen abzudecken, andererseits ausreichend konkret, um politische Maßnahmen, Investitionsbereiche oder Risikobewertungen daran auszurichten. Dies erklärt die Kombination aus übergeordneten Technologiefamilien und relativ konkreten technischen Teilbereichen. Die Taxonomie erfüllt damit unmittelbar eine operative Governance-Funktion und unterscheidet sich sowohl von einer rein wissenschaftlichen Klassifikation als auch von einer kurzen politischen Prioritätenliste.

Der fünfte Typ ist die **mehrdimensionale Innovations- oder Investitionstaxonomie**. Sie soll heterogene Innovationsaktivitäten, Unternehmen, Projekte oder Investitionsmöglichkeiten in einem gemeinsamen Ordnungssystem erfassen. Dafür reicht eine rein technologiezentrierte Gliederung häufig nicht aus. Technologien müssen zugleich nach Anwendungsbereich, Markt, Sektor, Problemstellung oder Funktion klassifizierbar sein. Bobier et al., die EIC Taxonomy und der EIC Impact Report sind hierfür besonders aussagekräftige Beispiele. Bobier trennt Technologie- und Use-Case-Perspektive ausdrücklich; die EIC-Systematiken integrieren beide Dimensionen stärker in gemeinsame Portfoliostrukturen. Der höhere Grad semantischer Heterogenität ist in solchen Systemen daher nicht zwangsläufig ein konzeptioneller Mangel, sondern kann eine Folge ihres breiteren Klassifikationszwecks sein.

Die funktionale Einordnung erklärt damit einen erheblichen Teil der beobachteten Unterschiede. Eine kurze strategische Prioritätenliste muss andere Anforderungen erfüllen als eine Patent- oder Rohstoffanalyse, eine regulatorische Technologielliste oder eine Taxonomie für ein großes Förder- und Investitionsportfolio. **Granularität und Kategorisierungslogik sind deshalb nicht unabhängig vom Verwendungszweck zu beurteilen.** Je stärker eine Klassifikation der Kommunikation und politischen Schwerpunktsetzung dient, desto eher arbeitet sie mit wenigen breiten Feldern. Je stärker sie Technologien empirisch erfassen, Projekte zuordnen, Rohstoffbedarfe bestimmen, Patente analysieren oder Investitionen strukturieren soll, desto spezifischer und häufig auch mehrdimensionaler wird ihre Gliederung.

3.1.4. Ergebniszusammenfassung

Der Vergleich der 16 Quellen zeigt, dass Technologieaufzählungen nicht als unmittelbar vergleichbare Listen verstanden werden sollten. Hinter ihnen stehen unterschiedliche Vorstellungen darüber, welche Einheit überhaupt als „Technologie“ behandelt wird, auf welchem Abstraktionsniveau diese Einheit sinnvoll abgegrenzt werden kann und in welchem Verhältnis Technologie zu Anwendung, Sektor oder gesellschaftlichem Problem steht. Die Bandbreite reicht von wenigen strategischen Schlüsseltechnologien über detaillierte Technologiefamilien bis zu integrierten Klassifikationen von Technologien, Anwendungen und Märkten.

Diese Heterogenität ist nicht zwangsläufig ein methodischer Fehler. Für strategie- und anwendungsorientierte Untersuchungen kann es zweckmäßig sein, unterschiedliche Elementtypen zusammenzuführen. Allerdings sollte dies beim Vergleich der Technologielisten verschiedener Studien und Berichte berücksichtigt werden. Eine einmalige Nennung von „Biotechnologie“ kann einen ähnlich großen Gegenstandsbereich erfassen wie eine Liste aus zahlreichen konkreten biotechnologischen Verfahren, Produkten und Anwendungen. Die Zahl der Tabellenpositionen ist daher nicht ohne Weiteres mit dem inhaltlichen Gewicht oder der Breite eines Technologiefeldes gleichzusetzen.

Für einen systematischen Vergleich sind deshalb mindestens drei Fragen getrennt zu beantworten: **Wie tief und granular ist die Klassifikation? Welche Arten von Elementen werden miteinander verbunden? Und welchem analytischen oder strategischen Zweck dient die Aufzählung?** Erst durch diese Unterscheidung lässt sich erklären, weshalb verschiedene Studien bei der Identifikation von Schlüssel- und Zukunftstechnologien zu teilweise stark voneinander abweichenden Listen und Strukturen gelangen.

3.2. Analyse der ausgewählten Technologie- und Anwendungsfelder

Aufbauend auf der zuvor erfolgten Analyse der ausgewählten Technologieübersichten hinsichtlich ihrer Tiefe und Granularität, ihrer Kategorisierungslogiken sowie ihrer unterschiedlichen Funktionstypen, richtet sich der folgende Abschnitt nun auf die inhaltliche Ebene der betrachteten Zukunftstechnologien.

Einschränkend soll nochmal erwähnt sein, dass die Analyse und die Aussagen auf Basis dieser 16 Quellen getroffen werden und eine beschränkte Allgemeingültigkeit darstellen. Wie gezeigt, sind die Quellen konzeptionell und methodisch zu heterogen, um sie quantitativ und quantitativ gleichgesetzt auszuwerten. Daher wird auf z.B. auf eine semantische Normalisierung von Technologiebegriffen verzichtet, aber es wird versucht, das Abstraktionsniveau und auch die Kategorisierungslogik zu berücksichtigen.

Im Mittelpunkt der aufgezählten Technologien steht dabei die Frage, welche technologischen Kernfelder sowie welche wiederkehrenden Anwendungsbereiche in den untersuchten Aufzählungen adressiert werden. Dabei zeigen sich trotz unterschiedlicher Untersuchungszwecke, Begriffe und Abgrenzungen deutliche inhaltliche Überschneidungen. Zugleich wird sichtbar, dass Technologien häufig nicht isoliert betrachtet werden, sondern als Bestandteile größerer Technologiekomplexe oder als Querschnittstechnologien, die in mehreren Wirtschafts- und Anwendungsbereichen relevant sind. Für die vergleichende Betrachtung ist daher weniger die exakte

Übereinstimmung einzelner Bezeichnungen entscheidend als die Frage, welche technologischen Fähigkeiten, Anwendungsbereiche oder gesellschaftlichen Probleme adressiert werden.

Die folgende Abbildung fasst die zentralen inhaltlichen Befunde dieser vergleichenden Analyse schematisch zusammen. Sie ist nicht als quantitative Auszählung oder statistische Gewichtung der 16 Quellen zu verstehen, sondern als strukturierende Übersicht über die wiederkehrenden Perspektiven, die sich aus den untersuchten Technologieaufzählungen ableiten lassen. Die dargestellten Anteile dienen daher ausschließlich der **Veranschaulichung der relativen Bedeutung der jeweiligen Analysebereiche** im Rahmen dieser Auswertung. Die innerhalb der Bereiche aufgeführten Beispiele sind exemplarisch und gleichgewichtet. Inhaltlich ist die Abbildung von den technologischen Kernfeldern und dem Unterschied zwischen Querschnitts- und anwendungsspezifischen Technologien über wiederkehrende Anwendungs- und Transformationsfelder bis hin zur zunehmenden Verknüpfung und Komplementarität von Technologien zu lesen. Gesellschaftliche Herausforderungen bilden demgegenüber eine ergänzende, in den untersuchten Quellen weniger häufig ausgeprägte Perspektive. Die nachfolgenden Unterkapitel greifen diese sechs Analysebereiche nacheinander auf und erläutern die jeweiligen Befunde anhand ausgewählter Beispiele aus den Technologieübersichten.



Abbildung 1: Zukunfts- und Schlüsseltechnologien – Technologiefelder, Anwendungen und Verbindungen (eigene Darstellung)

3.2.1. Wiederkehrende technologische Kernfelder

Über die unterschiedlichen Aufzählungen hinweg zeichnet sich ein vergleichsweise stabiler technologischer Kern ab. Besonders häufig erscheinen Künstliche Intelligenz und datenbasierte Technologien, Quantentechnologien, Mikroelektronik und Halbleiter, Biotechnologien und Life Sciences, fortgeschrittene Materialien, Produktion und Robotik sowie Energie- und

Speichertechnologien. Die Felder werden je nach Untersuchungszweck unterschiedlich breit abgegrenzt, finden sich aber in sehr verschiedenen Studien- und Strategietypen wieder.

Künstliche Intelligenz gehört zu den am breitesten vertretenen Technologiefeldern. Während strategische Dokumente sie meist als eigenständiges Schwerpunktfeld ausweisen, differenzieren technologieorientierte Taxonomien zwischen Teilgebieten wie Machine Learning, Deep Learning, Computer Vision oder Sprachverarbeitung. Anwendungsorientierte Studien ordnen KI zugleich konkreten Einsatzfeldern etwa in Gesundheit, Produktion oder Mobilität zu (z. B. BMFTR; Kroll et al.; Bobier et al.; Deloitte). KI erscheint damit zugleich als eigenständiges Technologiefeld und als Querschnittstechnologie für unterschiedliche Anwendungssysteme.

Ähnlich regelmäßig treten **Quantentechnologien** auf. Während breitere Strategien häufig den Sammelbegriff verwenden, unterscheiden detailliertere Klassifikationen typischerweise zwischen Quantum Computing, Quantum Communication und Quantum Sensing; teilweise werden zusätzlich Quantum Cryptography oder Post-Quantum Cryptography ausgewiesen (z. B. bei TNO; Frantz & Warta; EU Critical Technology Areas; Bobier et al.). Unterschiede zwischen den Studien betreffen vor allem die Granularität des Feldes.

Ein weiterer wiederkehrender Komplex umfasst **Mikroelektronik, Halbleiter, Photonik und Sensorik**. Je nach Quelle werden diese Felder getrennt oder gemeinsam mit fortgeschrittenem Computing und digitalen Infrastrukturen betrachtet. Die Aufzählungen reichen von allgemeinen Kategorien wie Mikroelektronik oder Advanced Semiconductor Technologies bis zu spezifischeren Technologien wie EUV-Fotolithografie, neuromorphem Computing oder elektrooptischen Chips (z. B. EU Critical Technology Areas; EIC Taxonomy; Deloitte). Vergleichbare Überschneidungen bestehen bei Biotechnologie und Life Sciences. Dort reicht das Spektrum von breit gefasster Biotechnologie über synthetische Biologie und Genomtechnologien bis zu Zell- und Gentherapien oder Bioinformatik (siehe STEP; Bobier et al.; EIC Taxonomy).

Fortgeschrittene Materialien sowie Produktions-, Robotik- und Automatisierungstechnologien bilden weitere wiederkehrende Schwerpunkte. **Advanced Materials** werden etwa über Nano- und 2D-Materialien, Metamaterialien, intelligente Materialien, Biomaterialien oder Verbundwerkstoffe konkretisiert. Im **Produktionsbereich** treten additive Fertigung, industrielle Robotik, digitale Zwillinge, Automatisierung und intelligente Fertigung regelmäßig auf (Kroll et al.; TNO; Frantz & Warta; EIC Taxonomy). Beide Bereiche werden häufig miteinander verbunden, da neue Materialien neue Produktionsverfahren ermöglichen und fortgeschrittene Fertigung wiederum spezifische Materialeigenschaften voraussetzt.

Besonders breit vertreten sind schließlich **Energie-, Speicher- und Dekarbonisierungstechnologien**. Wiederkehrende Elemente sind Batterien und andere Speicher, Wasserstoff, Photovoltaik, Windenergie, Stromnetze, Energieeffizienz sowie Technologien zur CO₂-Minderung. Je nach Untersuchungszweck reicht die Differenzierung bis zu spezifischen technischen Ansätzen wie Redox-Flow-Speichern, Feststoffbatterien, Direct Air Capture oder Small Modular Reactors (STEP; Langkau et al.). Hier zeigt sich besonders deutlich, wie stark Granularität und Untersuchungszweck zusammenhängen: Strategische Programme bündeln Technologien unter größeren Transformationsfeldern, während Rohstoff-, Patent- oder Investitionsanalysen stärker zwischen technischen Varianten unterscheiden.

Insgesamt deutet die wiederholte Berücksichtigung dieser Felder auf einen **relativ stabilen Kern strategisch relevanter Technologiefamilien** hin. Dieser Kern ist jedoch nicht mit einer einheitlichen Liste gleichzusetzen. Die Grenzen der Felder variieren erheblich: Mikroelektronik kann als eigenständige Schlüsseltechnologie, als Teil von Hardware und Semiconductors oder gemeinsam mit Photonik und Sensorik auftreten; vergleichbare Verschiebungen finden sich bei KI, Biotechnologie, Produktion und Energietechnologien. Die inhaltliche Konvergenz liegt daher stärker auf der Ebene größerer Technologiekomplexe als bei einzelnen Begriffen.

3.2.2. Querschnitts- und anwendungsspezifische Technologien

Die Aufzählungen unterscheiden sich zudem danach, wie breit einzelne Technologien einsetzbar sind. Einige besitzen einen ausgeprägten Querschnitts- oder Enabler-Charakter, andere sind stärker an bestimmte technische Systeme oder Anwendungen gebunden.

Künstliche Intelligenz ist hierfür das deutlichste Beispiel. Sie erscheint als eigenständiges Technologiefeld, zugleich aber auch innerhalb von industrieller Produktion, Mobilität, Gesundheit, autonomen Systemen oder digitalen Dienstleistungen. Ähnlich breit einsetzbar sind Halbleiter, Sensorik, Photonik, digitale Konnektivität und fortgeschrittene Materialien. Ihre strategische Bedeutung beruht gerade darauf, dass sie zahlreiche andere Technologien und Anwendungen ermöglichen oder deren Leistungsfähigkeit erhöhen.

Demgegenüber sind andere Technologien stärker an einzelne Problemstellungen oder Wertschöpfungssysteme gebunden. Direct Air Capture dient primär der CO₂-Entnahme, bestimmte Batterietypen adressieren spezifische Speicheranforderungen, Zell- und Gentherapien konkrete medizinische Anwendungen. Auch solche Technologien können strategisch hoch relevant sein, ihre Bedeutung ergibt sich jedoch weniger aus breiter Anwendbarkeit als aus ihrer möglichen Schlüsselstellung innerhalb eines bestimmten Systems oder gesellschaftlichen Handlungsfeldes.

Die Aufzählungen bilden damit zwei unterschiedliche Formen technologischer Bedeutung ab. **Querschnittstechnologien** gewinnen strategische Relevanz durch ihre breite Hebelwirkung über mehrere Sektoren und Anwendungen hinweg. **Anwendungsspezifische Technologien** können dagegen aufgrund ihrer Bedeutung für einzelne Transformationsprozesse, kritische Wertschöpfungsketten oder gesellschaftliche Herausforderungen zentral werden. Beide Typen werden in den untersuchten Studien regelmäßig gemeinsam erfasst.

3.2.3. Wiederkehrende Anwendungs- und Transformationsfelder

Neben den Technologien selbst lassen sich auch bei den Anwendungsbereichen deutliche inhaltliche Schwerpunkte erkennen. Besonders häufig treten Industrie und Produktion, Energie und Klima, Mobilität, Gesundheit sowie digitale Informations- und Kommunikationssysteme auf. Ergänzend finden sich Raumfahrt, Landwirtschaft und Ernährung sowie Sicherheits- und Verteidigungsanwendungen.

Industrie und Produktion bilden einen der wichtigsten Anwendungsräume. Die Aufzählungen umfassen unter anderem Advanced Manufacturing, Robotik, additive Fertigung, Smart Factory, digitale Zwillinge, Automatisierung sowie Mess- und Prüftechnik (Schmoch et al.; Deloitte; EIC Taxonomy). Der Bereich verdeutlicht zugleich die starke technologische Konvergenz: Moderne

Produktionssysteme verbinden digitale Technologien, Maschinenbau, Sensorik, Materialien und Datenverarbeitung.

Ein zweiter großer Schwerpunkt ist **Energie, Klima und Dekarbonisierung**. Die betrachteten Felder reichen von Energieerzeugung, Speicherung und Netzen über Wasserstoff und Energieeffizienz bis zu Carbon Capture, Kreislaufwirtschaft und industrieller Dekarbonisierung. Breitere Klassifikationen beziehen darüber hinaus Umweltmonitoring, Wassertechnologien, Ressourceneffizienz oder Rohstoffsubstitution ein (STEP; EIC Taxonomy; EIC Impact Report). Energie und Klima bilden damit zunehmend einen gemeinsamen Transformationsraum, in dem technische, industrielle und ressourcenbezogene Fragestellungen miteinander verbunden werden.

Auch **Mobilität und Verkehr** erscheinen regelmäßig als eigenständiger Anwendungsbereich. Hierzu zählen Elektromobilität, autonome Fahrzeuge, alternative Antriebe, Brennstoffzellen, Logistik sowie Luft- und Schifffahrt. Während einzelne Studien konkrete Fahrzeugtechnologien betrachten, strukturieren andere den gesamten Mobilitätsraum nach Straßenverkehr, Schiene, Luftfahrt, maritimen Anwendungen oder Logistik (Schmoch et al.; Bobier et al.; EIC Taxonomy). Mobilität ist damit ein typisches Beispiel für einen Anwendungsbereich, der auf zahlreiche technologische Basen gleichzeitig angewiesen ist.

Der Bereich **Gesundheit und Life Sciences** verbindet technologische und anwendungsbezogene Perspektiven besonders eng. Neben Biotechnologie, Zell- und Gentherapien, Diagnostik und medizinischer Bildgebung treten konkrete Krankheits- und Versorgungsfelder auf. Zugleich werden digitale Technologien, KI, Robotik und Sensorik in medizinische Anwendungen integriert (Bobier et al.; EIC Taxonomy). Der Gesundheitsbereich zeigt damit exemplarisch, wie unterschiedliche Querschnittstechnologien innerhalb eines spezifischen gesellschaftlichen Anwendungssystems zusammengeführt werden.

Raumfahrt, Landwirtschaft und Ernährung sowie Sicherheit und Verteidigung treten vereinzelt auf, bilden aber ebenfalls wiederkehrende strategische Anwendungsräume. Raumfahrt verbindet unter anderem Satellitentechnik, Kommunikation, Navigation und Antriebssysteme; Landwirtschaft verknüpft Biotechnologie, Sensorik und Precision Farming; Sicherheits- und Verteidigungsanwendungen greifen auf Cybersecurity, autonome Systeme, Sensorik und weitere digitale Technologien zurück (Bobier et al.; BMFTR; EU Critical Technology Areas).

Gemeinsam ist diesen Bereichen, dass es sich überwiegend nicht um einzelne Märkte oder konkrete Anwendungsfälle handelt, sondern um **komplexe wirtschaftliche und gesellschaftliche Transformationssysteme**. Industrie, Energie, Mobilität und Gesundheit bündeln zahlreiche Technologien und Wertschöpfungsketten. Die Technologieaufzählungen spiegeln damit nicht nur technologische Dynamik, sondern auch die Bereiche wider, in denen besonders weitreichende wirtschaftliche, industrielle oder gesellschaftliche Veränderungen erwartet werden.

3.2.4. Zunehmende Verknüpfung von Technologie und Anwendung

Die inhaltliche Analyse bestätigt damit die bereits bei der Kategorisierungslogik erkennbare zunehmende Verbindung von Technologie- und Anwendungsperspektive. Je stärker eine Studie strategische, investitionsbezogene oder transformationsorientierte Ziele verfolgt, desto häufiger werden Technologien im Zusammenhang mit den Systemen betrachtet, in denen sie eingesetzt werden.

Bobier et al. machen diese Verbindung besonders deutlich, indem sie Technologie und Use Case als zwei getrennte Perspektiven gegenüberstellen. Technologiefamilien wie Digital AI, Autonomous Systems, Synthetic Biology oder Quantum Technologies stehen Anwendungsfeldern wie Mobility and Logistics, Health and Well-being, Energy and Climate, Space, Agri-food oder Defense gegenüber. Dadurch wird sichtbar, dass zwischen Technologie und Anwendung keine einfache Eins-zu-eins-Beziehung besteht. Eine Technologie kann in mehreren Anwendungsbereichen eingesetzt werden; zugleich hängt ein Anwendungsbereich meist von mehreren Technologien ab.

Diese Mehrfachbeziehungen finden sich auch in anderen Studien. Wasserstoff kann der Energieversorgung, Mobilität und industriellen Dekarbonisierung dienen. KI ist für Gesundheit, Produktion und Mobilität relevant. Advanced Materials werden in Halbleitern, Energietechnik, Bau, Verkehr und Produktion benötigt. Robotik verbindet industrielle Fertigung, Logistik, Medizin und autonome Systeme. Für die strategische Bewertung wird daher nicht nur relevant, welche Eigenschaften eine Technologie besitzt, sondern auch, **welche Position sie innerhalb unterschiedlicher Anwendungs-, Produktions- und Wertschöpfungssysteme einnimmt.**

Damit verschiebt sich zugleich die analytisch sinnvolle Betrachtungsebene. Im Mittelpunkt stehen weniger isolierte Technologien als Kombinationen aus technologischen Fähigkeiten, komplementären Technologien und Anwendungskontexten. Eine Stärke bei KI entfaltet beispielsweise erst in Verbindung mit Recheninfrastrukturen, Halbleitern, Daten, Fachwissen und geeigneten Anwendungen wirtschaftliche und strategische Wirkung. Vergleichbare Zusammenhänge bestehen bei Wasserstoff, Quantentechnologien, Biotechnologie oder Advanced Manufacturing.

3.2.5. Konvergenz und Komplementarität von Technologien

Die untersuchten Aufzählungen zeigen, dass Schlüssel- und Zukunftstechnologien vielfach nicht isoliert betrachtet werden können. Technologische Entwicklungen entstehen zunehmend **im Zusammenspiel komplementärer Technologien und werden zugleich in unterschiedlichen Anwendungsfeldern miteinander verbunden.** Damit verlaufen Konvergenz und Verknüpfung in zwei Richtungen: zwischen Technologien untereinander sowie zwischen Technologien und ihren jeweiligen Anwendungen.

Besonders deutlich zeigt sich die technologische Komplementarität bei **digitalen Technologien:**

- KI benötigt leistungsfähige Halbleiter, Recheninfrastrukturen, Daten und Kommunikationsnetze
- autonome Systeme verbinden KI mit Sensorik, Robotik, Navigation und Konnektivität

- digitale Zwillinge¹⁹ basieren auf Datenverarbeitung, Sensoren und Modellierung.

Entsprechend treten KI, High Performance Computing, Cloud- und Edge-Computing, IoT, Sensorik, Kommunikationsnetze und Mikroelektronik in verschiedenen Studien wiederholt gemeinsam auf (Kroll et al.; EU Critical Technology Areas; Deloitte; EIC Impact Report). Die strategische Bedeutung einzelner Technologien lässt sich deshalb nicht isoliert, sondern nur im Zusammenhang mit diesen technologischen Wechselwirkungen beurteilen.

Vergleichbare Verflechtungen zeigen sich im **Energie- und Produktionsbereich**. Erneuerbare Energieerzeugung, Speicher, Wasserstoff, Stromnetze und Energieeffizienz werden ebenso gemeinsam betrachtet wie Technologien zur industriellen Dekarbonisierung und zur CO₂-Abscheidung und -Nutzung (STEP; Langkau et al.; EIC Taxonomy). In der Produktion wirken Robotik, additive Fertigung, KI, Sensorik, digitale Zwillinge, Machine-to-Machine-Kommunikation und neue Materialien zusammen (Schmoch et al.; Bobier et al.; Deloitte). **Technologische Leistungsfähigkeit entsteht damit häufig aus der Kombination mehrerer technologischer Fähigkeiten** und lässt sich nicht eindeutig einer einzelnen Technologie zurechnen.

Zugleich werden Technologien zunehmend über gemeinsame Anwendungs- und Transformationsfelder miteinander verknüpft. Kategorien wie „Advanced Manufacturing“, „Clean and Resource Efficient Technologies“, autonome Systeme, Smart Factory oder klimaneutrale Mobilität fassen unterschiedliche Technologien zusammen, weil sie gemeinsam für ein bestimmtes Anwendungs- oder Transformationsziel relevant sind. „Advanced Manufacturing“ verbindet beispielsweise Robotik, digitale Fertigung, Materialien, Sensorik, KI und digitale Zwillinge. „Clean and Resource Efficient Technologies“ bündelt erneuerbare Energien, Speicher, Netze, Wasserstoff, CO₂-Technologien und industrielle Dekarbonisierung (STEP; EIC Taxonomy; EIC Impact Report). **Der gemeinsame Bezugspunkt ist hier weniger die technologische Verwandtschaft als ihr Zusammenwirken in einem Anwendungsfeld.**

Diese Verflechtungen relativieren zugleich teilweise künstlich gezogene technologische Grenzen und Ebenen. Robotik kann als eigenständiges Technologiefeld, als Teil fortgeschrittener Produktion oder im Zusammenhang mit KI und autonomen Systemen erscheinen. Sensorik kann Hardware, IoT, Quantentechnologien, Mobilität oder Medizintechnik zugeordnet werden. Advanced Materials können eigenständig betrachtet oder als Voraussetzung für Energie-, Halbleiter-, Mobilitäts- und Produktionstechnologien auftreten. Unterschiedliche Zuordnungen in den Technologielisten sind daher nicht zwangsläufig inkonsistent, sondern können unterschiedliche Perspektiven auf technologische Zusammenhänge abbilden.

Die inhaltlichen Gemeinsamkeiten der untersuchten Aufzählungen liegen damit auf zwei miteinander verbundenen Ebenen:

19 „Ein Digital Twin (deutsch: Digitaler Zwilling) ist eine virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts oder Prozesses. Er wird vor allem eingesetzt, wenn Unternehmen ihre Produkte oder Systeme über den ganzen Lebenszyklus hinweg beobachten, analysieren, simulieren und optimieren möchten. Dazu werden vom realen Objekt oder Prozess kontinuierlich Modelle, Informationen und Daten in Echtzeit erhoben, welche es erlauben, Einblicke in den Zustand und das Verhalten zu erhalten.“ (<https://www.ipk.fraunhofer.de/de/kompetenzen-und-loesungen/industrietrends/digital-twins.html>).

- Einerseits lässt sich ein wiederkehrender Kern technologischer Fähigkeiten erkennen, insbesondere in den Bereichen KI und Digitalisierung, Quantentechnologien, Halbleiter und Mikroelektronik, Biotechnologie, Advanced Materials, Produktion und Robotik sowie Energie.
- Andererseits konzentriert sich deren Nutzung auf einen relativ stabilen Kreis großer Anwendungs- und Transformationsfelder, insbesondere Industrie, Energie und Klima, Mobilität und Gesundheit. Beide Ebenen überlagern sich zunehmend.

Für die Interpretation von Schlüssel- und Zukunftstechnologien bedeutet dies, dass die bloße Häufigkeit eines Technologienamens nur begrenzte Aussagekraft besitzt. Ebenso relevant ist, wie diese Technologien mit komplementären Technologien eingebettet wird und in welchen Anwendungskontexten ein Feld wiederkehrt. Querschnittstechnologien können in zahlreichen Kategorien auftreten und dadurch unterschiedlich bezeichnet oder eingeordnet werden, obwohl sie für mehrere Anwendungen eine zentrale Rolle spielen. Umgekehrt können spezialisierte Technologien nur in wenigen Studien genannt werden, innerhalb eines bestimmten Anwendungsfeldes aber eine Schlüsselposition einnehmen. Bei der Bewertungs- und Auswahlmethodik müssen solche Komplementaritäten und Konvergenzen berücksichtigt werden. Auch berücksichtigen verschiedene Quellen bereits diese Konvergenzen, jedoch werden diese in den tabellarischen Darstellungen kaschiert.

Aus der Analyse lässt sich schlussfolgern, dass technologische Prioritäten nicht ausschließlich als voneinander getrennte Felder zu betrachten, sondern auch ihre Komplementaritäten und ihre Verknüpfung mit unterschiedlichen Anwendungsbereichen einzubeziehen sind.

3.2.6. Gesellschaftliche Herausforderungen als ergänzende Perspektive

Neben Technologien und Anwendungsbereichen greifen einzelne Aufzählungen auch **gesellschaftliche Herausforderungen, Transformationsziele oder missionsähnliche Problemstellungen** als Ordnungsprinzip auf. Diese Perspektive ist gegenüber technologie- und sektorbezogenen Kategorien deutlich weniger verbreitet, zeigt aber, dass Technologien teilweise auch danach geordnet werden, **zu welchen gesellschaftlichen oder politischen Zielsetzungen sie beitragen sollen**.

Am deutlichsten ist dies bei **Klima, Umwelt und Nachhaltigkeit**. Kategorien wie klimaneutrale Energieerzeugung und Mobilität, Umwelt und Klima, ressourcensparende Technologien oder „Clean and resource efficient technologies“ bündeln unterschiedliche Technologien über ein gemeinsames Transformationsziel (BMFTR; Schmoch et al.; Stehnken et al.; STEP). In stärker ausdifferenzierten Taxonomien treten zudem problemorientierte Kategorien wie „Climate Change Mitigation & Adaptation“, „Circular Economy“, „Water Management & Resilience“ oder „Climate Adaptation“ auf (Bobier et al.; EIC Taxonomy).

Vereinzelte werden auch **Sicherheit und Resilienz** in vergleichbarer Weise aufgegriffen. Die Hightech Agenda nennt Sicherheits- und Verteidigungsforschung als strategisches Forschungsfeld; andere Aufzählungen berücksichtigen etwa Verteidigung, Airspace Security oder resilienzbezogene Infrastrukturen (BCG & UnternehmerTUM; BMFTR; Bobier et al.).

Diese Kategorien entsprechen allerdings meist nicht Missionen im engeren innovationspolitischen Sinne mit konkretem Zielwert, Zeithorizont und Umsetzungsstruktur. Treffender ist daher

von **missions- oder herausforderungsorientierten Kategorien** zu sprechen. Anders als sektorale Anwendungsbereiche wie Mobilität oder Gesundheit führen sie Technologien unterschiedlicher Herkunft über eine gemeinsame gesellschaftliche Problemstellung oder Zielsetzung zusammen.

Insgesamt bleibt diese Kategorisierungslogik gegenüber der Ordnung nach Technologien, Technologiefamilien und Anwendungsbereichen **nachrangig**. Ihre punktuelle Verwendung erweitert die Betrachtung jedoch um eine zusätzliche Beziehung: Neben **Technologie → Untertechnologie** und **Technologie ↔ Anwendung** tritt **Technologie → gesellschaftliche Herausforderung bzw. strategisches Ziel**. Damit wird sichtbar, dass Zukunftstechnologien vereinzelt auch danach strukturiert werden, welchen Beitrag sie zu übergeordneten Transformationsaufgaben wie Klimaneutralität, Ressourceneffizienz, Resilienz oder Sicherheit leisten können.

4. Fazit und Implikationen

Die vergleichende Analyse der Technologieübersichten zeigt, dass solche Aufzählungen nicht als neutrale oder unmittelbar vergleichbare Abbilder eines objektiv gegebenen Technologiespektrums verstanden werden sollten. Sie sind vielmehr zweckgebundene Ordnungs- und Entscheidungsinstrumente, deren Aufbau von mehreren Stellschrauben geprägt wird. Dazu gehören insbesondere Zielsetzung und Adressatenkreis, die gewählte Granularität, das Abstraktionsniveau der Kategorien, die Kategorisierungslogik sowie die Frage, ob Technologien isoliert, als Technologiefamilien, im Zusammenhang mit Anwendungen und Sektoren oder mit Blick auf gesellschaftliche Herausforderungen dargestellt werden. Entsprechend können kurze strategische Prioritätenlisten neben breit angelegten Technologietaxonomien, sektoralen Portfolios oder mehrdimensionalen Innovations- und Investitionsklassifikationen stehen, ohne dass eine Form grundsätzlich analytisch überlegen wäre.

Die Unterschiede zeigen sich bereits in Tiefe und Granularität. Einige Studien verbleiben auf der Ebene breiter Technologiefelder wie Künstliche Intelligenz, Quantentechnologien oder Biotechnologie. Andere differenzieren bis zu Technologiefamilien, konkreten Verfahren oder Anwendungen. Die Zahl der Hierarchieebenen allein ist dabei kein verlässliches Maß für die tatsächliche Differenziertheit. Eine formal zweistufige Klassifikation kann inhaltlich wesentlich tiefer reichen als eine dreistufige, wenn ihre unterste Ebene bereits konkrete technische Ansätze erfasst. Granularität ist daher immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen Zweck zu lesen. Strategische Programme benötigen eher wenige verständliche und politisch anschlussfähige Kategorien; Patent-, Rohstoff-, Förder- oder Investitionsanalysen benötigen dagegen stärker operationalisierbare und spezifischere Einheiten.

Auch die Kategorisierungslogik unterscheidet sich deutlich. Ein Teil der Aufzählungen ordnet Technologien und Technologiefamilien weitgehend entlang ihrer technisch-wissenschaftlichen Verwandtschaft. Andere wählen den umgekehrten Zugang und ordnen Technologien bestimmten Sektoren oder Anwendungsfeldern wie Produktion, Mobilität, Gesundheit oder Energie zu. Wieder andere stellen Technologie- und Anwendungsperspektive parallel nebeneinander oder integrieren Technologien, Sektoren, Anwendungsfälle und Problemfelder in einer gemeinsamen Struktur. Gesellschaftliche Herausforderungen wie Klimaneutralität, Ressourceneffizienz, Resilienz oder Sicherheit treten ergänzend hinzu, spielen gegenüber technologie- und anwendungsbezogenen Kategorien aber eine geringere Rolle. Die Listen unterscheiden sich damit nicht nur

darin, wie fein sie Technologien aufschlüsseln, sondern bereits darin, welche Arten von Elementen sie überhaupt ordnen und welche Beziehungen zwischen ihnen hergestellt werden.

Trotz dieser strukturellen Unterschiede ist eine inhaltliche Konvergenz erkennbar. Wiederkehrend erscheinen insbesondere Künstliche Intelligenz und datenbasierte Technologien, Quantentechnologien, Mikroelektronik und Halbleiter, Biotechnologie und Life Sciences, fortgeschrittene Materialien, Produktions- und Robotiktechnologien sowie Energie- und Speichertechnologien. Auch auf der Anwendungsseite konzentrieren sich viele Aufzählungen auf einem vergleichsweise stabilen Kreis großer Transformationsfelder, insbesondere Industrie und Produktion, Energie und Klima, Mobilität sowie Gesundheit. Diese Übereinstimmungen sollten jedoch nicht als Beleg für eine eindeutig bestimmbar Kanon von Zukunftstechnologien missverstanden werden. Die Grenzen zwischen den Feldern bleiben beweglich, Begriffe werden unterschiedlich zugeschnitten und technologische Entwicklungen können bestehende Kategorien verändern.

Gerade die zunehmende **Konvergenz von Technologien** erschwert eine eindeutige Einordnung. Viele strategisch relevante Entwicklungen entstehen nicht innerhalb isolierter Technologiefelder, sondern durch deren Kombination. Künstliche Intelligenz ist beispielsweise auf leistungsfähige Halbleiter, Daten, Recheninfrastrukturen und Kommunikationsnetze angewiesen; moderne Produktionssysteme verbinden Robotik, Sensorik, KI, digitale Zwillinge und neue Materialien; Energiesysteme koppeln Erzeugung, Speicherung, Netze, Wasserstoff und Dekarbonisierungstechnologien. Welche Technologien künftig zusammenwachsen, welche Querschnittstechnologien mehrere Prioritäten gleichzeitig tragen und wo neue Abhängigkeiten entstehen, ist nur begrenzt vorhersehbar. Die Technologieaufzählungen bilden deshalb notwendigerweise eine Momentaufnahme und eine analytische Setzung zugleich.

Für politische und strategische Entscheidungen ergeben sich daraus mehrere Konsequenzen.

Erstens, **unterschiedliche Technologiebegriffe sollten nicht überinterpretiert werden**. Bezeichnungen wie Schlüsseltechnologien, Deep Tech, kritische oder strategische Technologien setzen zwar unterschiedliche Akzente, führen in den untersuchten Übersichten aber vielfach zu ähnlichen technologischen Schwerpunkten. Für Entscheider ist daher wichtiger zu verstehen, **nach welchen Kriterien Technologien ausgewählt, wie breit sie abgegrenzt und auf welcher Ebene sie zusammengefasst werden**, als sich allein an der jeweiligen Bezeichnung zu orientieren. Ein einheitlicher Begriff ist damit weniger entscheidend als Transparenz darüber, welche Perspektive und Zielsetzung hinter einer Technologieliste stehen. Gerade beim Vergleich verschiedener Strategien oder Studien sollte deshalb zunächst die zugrunde liegende Auswahl- und Strukturierungslogik betrachtet werden, bevor aus unterschiedlichen Begrifflichkeiten auf unterschiedliche technologische Prioritäten geschlossen wird.

Zweitens gewinnt die **Qualität des Categoriesystems selbst** an Bedeutung. Wenn politische Entscheidungsträger Prioritäten zwischen sehr unterschiedlichen Technologiefeldern setzen sollen, braucht es eine gemeinsame begriffliche und strukturelle Grundlage. Ein nachvollziehbares Categoriesystem erleichtert es, breite Technologiefamilien von konkreten Technologien, Anwendungen, Sektoren und gesellschaftlichen Zielstellungen zu unterscheiden und ihre Beziehungen zueinander sichtbar zu machen. Es kann technologische Konvergenzen oder Unsicherheiten nicht auflösen, aber es schafft Transparenz darüber, auf welcher Ebene eine Entscheidung getroffen wird und welche technologischen Zusammenhänge dabei berücksichtigt werden. Gerade bei Querschnittstechnologien ist dies wichtig, weil ihre strategische Bedeutung häufig nicht aus

einer einzelnen Anwendung, sondern aus ihrer Rolle in mehreren Technologie- und Wertschöpfungssystemen entsteht.

Drittens sollten Technologielisten **nicht als statische Endprodukte** behandelt werden. Da sich technologische Grenzen, Anwendungsmöglichkeiten und Abhängigkeiten verändern, müssen Kategorien und Zuordnungen regelmäßig überprüft werden. Dies betrifft nicht nur das Hinzufügen neuer Technologien. Ebenso wichtig ist die Frage, ob bisher getrennte Felder stärker zusammengeführt werden müssen, ob neue Anwendungen entstehen oder ob einzelne Technologien ihre strategische Bedeutung verändern. Ein Categoriesystem sollte deshalb ausreichend stabil sein, um politische Orientierung zu ermöglichen, zugleich aber offen genug bleiben, um technologische Konvergenzen und neue Entwicklungspfade aufzunehmen.

Viertens entfaltet eine Priorisierung erst dann Wirkung, wenn sie **in konkrete Umsetzungsmaßnahmen und eine tatsächliche Mobilisierung von Ressourcen übersetzt wird**. Die Benennung von Schlüssel- oder Zukunftstechnologien allein verändert weder Innovationsleistung noch Wettbewerbsposition. Entscheidend ist, ob Prioritäten Folgen für Forschungsförderung, Budgets, Infrastrukturen, Regulierung, öffentliche Beschaffung, Transfer, Skalierung, Fachkräfte oder internationale Zusammenarbeit haben. Eine Technologiemindestliste ist damit vor allem ein Ausgangspunkt für weitere Entscheidungen. Ihre strategische Relevanz zeigt sich daran, ob sie zu einer erkennbaren Konzentration von Aufmerksamkeit, Zuständigkeiten und Ressourcen führt.

Fünftens bedeutet jede ernsthafte Priorisierung zugleich, dass **andere Technologien relativ geringere Priorität erhalten**. Dieser Aspekt wird in Technologiemindestlisten häufig weniger sichtbar, ist für ihre politische Wirkung aber zentral. Wenn sämtliche Felder faktisch unverändert weiterverfolgt werden, bleibt eine Priorisierung weitgehend deklaratorisch. Umgekehrt kann ein vollständiger Rückzug aus nicht priorisierten Bereichen neue technologische Abhängigkeiten erzeugen oder den Zugang zu später wichtigen Entwicklungen erschweren. Strategische Technologiepolitik muss deshalb auch festlegen, wie mit geringer priorisierten Feldern umgegangen werden soll. Möglichkeiten reichen von reduziertem, aber kontinuierlichem Monitoring und dem Erhalt von Mindestkompetenzen bis zu europäischer oder internationaler Arbeitsteilung und Kooperation. Nicht jede Technologie muss in gleicher Breite national entwickelt werden; zugleich kann es strategisch sinnvoll sein, Wissen, Anschlussfähigkeit und Kooperationsfähigkeit auch dort zu sichern, wo keine eigene Schwerpunktsetzung erfolgt.

Die Qualität einer Technologiepriorisierung zeigt sich damit nicht allein darin, **welche Technologien auf einer Liste stehen und welchen Namen sie tragen**. Ebenso entscheidend ist, wie nachvollziehbar die Kategorien gebildet sind, wie mit technologischer Konvergenz und Unsicherheit umgegangen wird, welche Ressourcen tatsächlich mobilisiert werden und welche Strategie für nicht priorisierte Felder besteht. Technologiemindestlisten schaffen hierfür einen Orientierungsrahmen. Strategische Wirkung entsteht jedoch erst durch die Entscheidungen, die auf dieser Grundlage getroffen werden.

5. Anlage: Übersicht Technologiemindestlisten

* * *