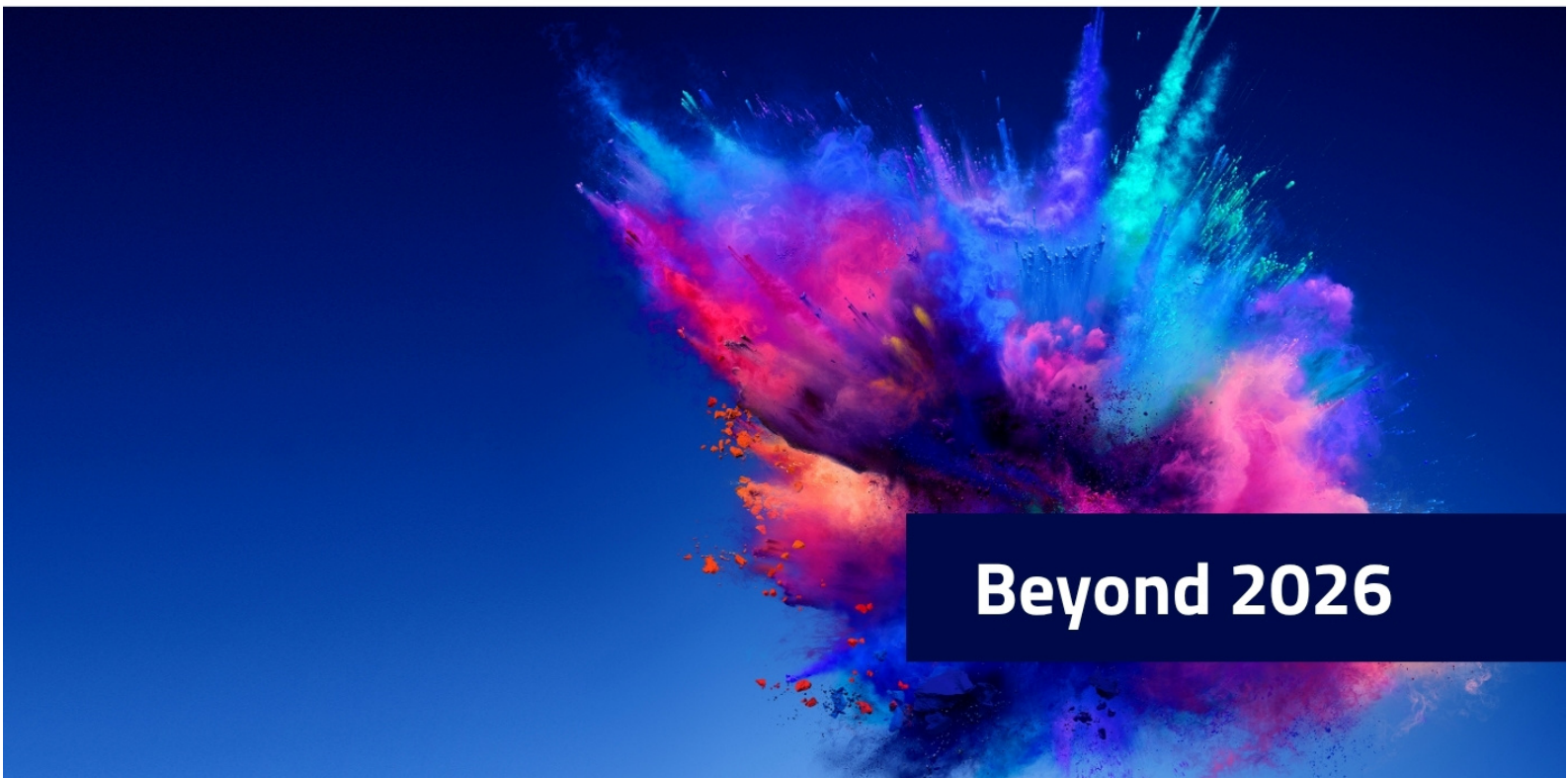




Beyond 2026

Zehn Technologie-Trends, die unsere Zukunft prägen

Ein Whitepaper der bwcon research

Stand: November 2025

www.bwcon-research.org

Vorwort

Technologische Entwicklungen sind längst mehr als Treiber wirtschaftlicher Effizienz. Sie gestalten die Grundlagen gesellschaftlicher Organisation, Kommunikation und Entscheidungsfindung neu. Sie verändern Wertschöpfungsketten, verschieben Machtverhältnisse und eröffnen neue Möglichkeitsräume – sie schaffen aber zugleich neue Spannungsfelder oder Widerstände. Dieses Whitepaper beleuchtet zentrale Technologietrends und analysiert ihre systemische Bedeutung für die gesellschaftliche Weiterentwicklung.

Aus vergangenen Innovationszyklen wissen wir: Es ist nie eine einzelne Technologie, die den Wandel auslöst. Innovation entsteht dort, wo Technologien konvergieren, wo ein funktionierender Mix aus Reifegrad, Skalierbarkeit und Kostenstruktur die Gestaltung neuer Systeme ermöglicht. In der Frühphase werden diese Systeme noch mit den Bewertungsmaßstäben des Bestehenden gemessen. Wir implementieren mit neuer Technologie zunächst das alte System, meist mit dem Ziel von Effizienzsteigerung oder Prozessoptimierung. Nicht selten wird dieser Optimierungsschritt fälschlich bereits als Innovation bezeichnet.

Mit zunehmender Diffusion verändern sich jedoch die Maßstäbe selbst: Alte Paradigmen weichen, neue Systemlogiken entstehen. Neue Systeme werden gestaltet, die bestehende Strukturen nicht selten in einem Prozess „schöpferischer Zerstörung“ ablösen. Aus systemischer Perspektive verlassen gesellschaftliche Teilsysteme ihren bisherigen Gleichgewichtszustand und begeben sich in eine Phase der Reorganisation. Sie begeben sich auf die Suche nach neuen, stabilen Konfigurationen bzw. Gleichgewichtszuständen.

Genau hier liegt die Chance: Technologietrends dürfen nicht nur beobachtet, sondern müssen aktiv gestaltet werden. Für eine Hochlohnregion wie Südwestdeutschland ist dies zwingend notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Wirtschaft zu sichern. Die Unternehmen der Region sind gefordert, neue Systeme im Sinne von Resilienz, Teilhabe und Nachhaltigkeit mitzugestalten.

Dieses Whitepaper bietet einen kompakten Überblick über relevante Entwicklungen aus der Perspektive von bwcon und zeigt auf, an welchen Schnittstellen neue Systeme entstehen können und wie diese strategisch genutzt werden können. Die Chancen überwiegen. Risiken entstehen vor allem für jene, die die sich eröffnenden Möglichkeiten nicht ergreifen.

Zusammenfassung – Executive Summary

Das Whitepaper „Beyond 2026 – Zehn Technologie-Trends, die unsere Zukunft prägen“ untersucht, welche technologischen Entwicklungen bis 2045 maßgeblich bestimmen werden, wie wir arbeiten, produzieren, forschen und leben. Es zeigt, dass Technologie zunehmend nicht nur Werkzeuge hervorbringt, sondern ganze Systeme verändert – und dass deren Zusammenspiel über wirtschaftlichen Erfolg, Nachhaltigkeit und gesellschaftliche Resilienz entscheidet.

Unter Technologietrends verstehen wir Entwicklungen, die auf wissenschaftlichen Durchbrüchen, datengetriebenen Prozessen oder neuen Formen der Vernetzung beruhen und damit dauerhaftes Transformationspotenzial entfalten. Diese Trends wirken selten isoliert, sondern verstärken sich gegenseitig und bilden zusammen den Nährboden einer neuen industriellen Epoche.

Die zehn Technologie-Trends im Überblick

1. **Computing Power:** Rechenleistung wird zum universellen Produktionsfaktor – sinkende Kosten und wachsende Energieeffizienz treiben datenintensive Anwendungen in allen Branchen voran.
2. **Extended Reality:** Die Grenzen zwischen physischer und digitaler Welt verschwimmen – immersive Umgebungen schaffen neue Formen des Lernens, Arbeitens und Erlebens.
3. **Digitale Zwillinge:** Virtuelle Abbilder realer Systeme ermöglichen vorausschauende Steuerung, schnellere Entwicklung und optimierte Produktion.
4. **Kohlendioxidreduktion:** Der Weg von der Emissionsvermeidung zur Wertschöpfung mit CO₂-Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung werden zur industriellen Chance.
5. **Mensch-Maschine-Zusammenarbeit:** Der Mensch bleibt Gestalter, die Maschine wird Enabler – Vertrauen, Transparenz und ergonomische Interaktion stehen im Mittelpunkt.
6. **Metamaterialien:** Künstlich strukturierte Werkstoffe eröffnen neue Eigenschaften in Optik, Akustik und Energieeffizienz und reduzieren die Abhängigkeit von seltenen Rohstoffen.
7. **Künstliche Intelligenz:** KI entwickelt sich von assistierenden zu planenden und autonomen Systemen – sie steigert Produktivität, prägt Entscheidungsprozesse und verändert Geschäftsmodelle.
8. **Biotechnologie:** Die Programmierbarkeit biologischer Systeme schafft neue Möglichkeiten in Medizin, Landwirtschaft, Chemie und Materialentwicklung.
9. **Blockchain:** Transparente, manipulationssichere Infrastrukturen ermöglichen Vertrauen in komplexen Lieferketten und neue Formen digitaler Identität.
10. **SecureTech:** Cybersicherheit wandelt sich zur digitalen Resilienz – Sicherheit wird zur Grundlage von Stabilität, Lizenzfähigkeit und Vertrauen.

Trendradar und Szenarien

Der Trendradar zeigt, dass die meisten Technologien ineinandergreifen und sich gegenseitig beschleunigen. Kurzfristig prägen Computing Power, KI, SecureTech und Extended Reality bereits konkrete Geschäftsmodelle, während Kohlendioxidreduktion, Biotechnologie und Metamaterialien in den 2030er-Jahren an strategischer Bedeutung gewinnen.

Vier Zukunftsszenarien – von „Zwischen Komfort und Kontrolle“ (2030) über „Kaffeepause im Zeitalter der Perfektion“ (2035) bis „Ein gewöhnlicher Tag in der perfekten Zukunft“ (2045) – illustrieren, wie technologische Dynamik, gesellschaftliche Akzeptanz und regulatorische Rahmenbedingungen sich gegenseitig beeinflussen. Sie verdeutlichen: Die Richtung des Fortschritts ist offen, seine Gestaltung jedoch entscheidend.

Business Impact

Der Business Impact der Trends zeigt sich in allen Wertschöpfungsstufen:

Steigende Rechenleistung und KI führen zu sinkenden Betriebskosten und höherer Produktivität. Digitale Zwillinge und Extended Reality verkürzen Entwicklungszeiten, verbessern Qualität und ermöglichen neue Service-Modelle. Kohlendioxidreduktion und Metamaterialien eröffnen zusätzliche Erlösquellen im Nachhaltigkeitssektor.

Blockchain und SecureTech stärken Vertrauen, Nachvollziehbarkeit und Sicherheit – Grundvoraussetzungen für globale Kooperationen. Die Mensch-Maschine-Zusammenarbeit und Biotechnologie schaffen neue Berufsbilder und Märkte, während gleichzeitig Datenkompetenz, Sicherheitsbewusstsein und interdisziplinäre Teams zu Schlüsselfaktoren des Erfolgs werden.

Für mittelständische Unternehmen bedeutet dies: Digitalisierung, KI-Integration, Datennutzung und nachhaltige Produktionsprozesse werden zu zentralen Wettbewerbsparametern. Baden-Württemberg, Deutschland und ganz Europa können ihre Stärken – Ingenieurskunst, Qualität und Verantwortungsbewusstsein – nutzen, um Innovation mit gesellschaftlicher Stabilität zu verbinden.

Fazit und Ausblick

Die Autor*innen dieses Whitepapers zeigen, dass die großen Zukunftstechnologien sich nicht addieren, sondern konvergieren. Sie leiten den Übergang in eine kognitive und nachhaltige Industriegesellschaft ein. Der technologische Fortschritt bringt enorme Chancen für Effizienz, Nachhaltigkeit und Wachstum, erfordert aber auch Verantwortung und klare Gestaltung.

Zukunft ist kein Naturereignis, sondern das Ergebnis menschlicher Entscheidungen. Wer Technologie mit Weitblick, Ethik und Kreativität verbindet, wird nicht von der Zukunft überrascht – sondern gestaltet sie.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Einleitung.....	9
Technologietrends.....	10
TREND #1: Computing Power.....	11
Definition: Was wir unter Computing Power verstehen	11
Der Trend: Unbegrenzte Rechenleistung.....	11
Erwarteter Business Impact: Sinkende Kosten.....	12
TREND #2: Extended Reality	14
Definition: Vom realen Erleben zur virtuellen Erweiterung.....	14
Der Trend: Vom Konzept zur produktiven Realität	14
Erwarteter Business Impact: Von immersiven Erlebnissen zu neuen Geschäftsmodellen.....	16
SZENARIO 2030: Zwischen Komfort und Kontrolle	18
TREND #3: Digitale Zwillinge	19
Definition: Was wir unter Digitalen Zwillingen verstehen.....	19
Der Trend: Veränderte Anwendungen durch Digitale Zwillinge und Identitäten	20
Erwarteter Business Impact: Zukunft mit digitalen Zwillingen steuern	22
TREND #4: Kohlendioxidreduktion	23
Definition: Kohlendioxidmanagement und seine Maßnahmen	23
Der Trend: Vom industriellen CCUS zur ganzheitlichen Kohlenstoffstrategie	23
Erwarteter Business Impact: Von der Emissionsreduktion zur Wertschöpfung mit CO ₂	25
SZENARIO 2035: Kaffeepause im Zeitalter der Perfektion.....	27
TREND #5: Mensch-Maschine-Zusammenarbeit	29
Definition: Was ist Mensch-Maschine-Interaktion?.....	29
Der Trend: Interaktionen auf Effizienz und Vertrauen optimieren.....	29
Erwarteter Business Impact: Mensch im Mittelpunkt, Maschine als Enabler	30
TREND #6: Metamaterialen	32
Definition: Das sind Metamaterialien	32
Der Trend: Vom Labor in die Praxis.....	32
Erwarteter Business Impact: Der wirtschaftliche Impact von Metamaterialien.....	34

SZENARIO 2040: Zwischen Kopie und Kontrolle.....	35
TREND #7: Künstliche Intelligenz	36
Definition: Was wir unter Künstlicher Intelligenz verstehen	36
Der Trend: Autonome und planende Künstliche Intelligenz.....	37
Erwarteter Business Impact: Große Produktivitätssteigerung	38
TREND #8: Biotechnologie.....	39
Definition: Die programmierbare Basis des Lebens.....	39
Der Trend: Von der Entdeckung zur Steuerung biologischer Systeme	39
Erwarteter Business Impact: Wie Biotechnologie Märkte und Modelle verändert.....	41
SZENARIO 2045: Ein gewöhnlicher Tag in der perfekten Zukunft	42
TREND #9: Blockchain	43
Definition: Was ist unter Blockchain zu verstehen?	43
Der Trend: Branchenweit transparente Infrastruktur	44
Erwarteter Business Impact: Pilotprojekte und neue Geschäftsfelder	46
TREND #10: SecureTech.....	47
Definition: Von IT-Security und SecureTech	47
Der Trend: Von Cybersecurity zu aktiver digitaler Resilienz	48
Erwarteter Business Impact: Resilienz, Effizienz und neue Kompetenzen.....	50
Der Trendradar: Die Trends im Überblick.....	51
Branchenanalyse: Kurzfristiger Business Impact der Trends	53
Fazit und Ausblick: Die Zukunft gestalten – zwischen Konvergenz und Beschleunigung.....	56
Die Autor*innen.....	58
Über bwcon research – Forschung im Netzwerk.....	59
Literaturverzeichnis.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung Preis-Leistungsverhältnis von Rechenleistung 1939–2023. [9]	12
Abbildung 2: Kostenentwicklung für ausgewählte digitale Produkte und Dienstleistungen. [13]..	13
Abbildung 3: Augmented Reality in Abgrenzung zu Virtual Reality und zur physikalischen und digitalen Realität. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [16])	14
Abbildung 4: Das klassische Konzept von Digitalen Zwillingen. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [21])	19
Abbildung 5: Entwicklungsstufen Digitaler Zwillinge – von der isolierten Repräsentation zum vernetzten, intelligenten und vertrauenswürdigen System. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [21, 24, 23]).....	21
Abbildung 6: Entwicklung von industrieller CO ₂ -Abscheidung hin zur zirkulären Kohlenstoffwirtschaft bis 2035. (Eigene Darstellung)	24
Abbildung 7: Technologiereifegrade von Metamaterialien 2025. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [54, 55]).....	33
Abbildung 8: Kategorisierung von KI-Systemen auf der Basis von Umgebungen und Selbstständigkeit. [60, p. 33].....	36
Abbildung 9: Technologische Entwicklungen in der Biotechnologie. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [72, 73, 74, 75])	40
Abbildung 10: Aufbau einer Blockchain (Eigene Darstellung in Anlehnung an [87])	43
Abbildung 11: Hype Cycle für Blockchain und Web3. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [89]) .	44
Abbildung 12: Entwicklungspfad zur digitalen Resilienz. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [98, 94]).....	49
Abbildung 13: Technologischer Trendradar 2026 bis 2035+. (Eigene Darstellung).....	51
Abbildung 14: Impact-Matrix der Technologietrends nach Branchen (Zeithorizont < 5 Jahre). (Eigene Darstellung, basierend auf Team-Workshops und Branchenanalysen).....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklungsetappen von Extended Reality. (Eigene Darstellung)	16
Tabelle 2: Entwicklungsetappen der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine. (Eigene Darstellung).....	30
Tabelle 3: Erwartete Entwicklung der Blockchain-Technologie. (Eigene Darstellung)	46
Tabelle 4: Zeithorizont zentraler Technologien zur digitalen Resilienz. (Eigene Darstellung).....	49

Einleitung

Technologietrends verändern die Grundlagen gesellschaftlicher Entwicklung und wirtschaftlicher Wertschöpfung in einem Ausmaß, das sektorübergreifende Anpassung und strategische Neuausrichtung erforderlich macht. Insbesondere die Bereiche Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion stehen im Zentrum dieser Transformation.

Die Mobilität der Zukunft wird durch Elektrifizierung, automatisierte Verkehrssteuerung und multimodale Infrastruktur geprägt. Dabei entstehen neue Schnittstellen zwischen urbaner Planung, Fahrzeugtechnologie und digitaler Vernetzung, die nicht nur ökologische Ziele unterstützen, sondern auch soziale Teilhabe und regionale Resilienz fördern.

Im Gesundheitssektor ermöglichen digitale Diagnostik, KI-gestützte Therapieplanung und vernetzte Versorgungssysteme eine präzisere, effizientere und patientenzentrierte Betreuung. Gleichzeitig stellen Datenschutz, Interoperabilität und ethische Standards hohe Anforderungen an die technologische Umsetzung und regulatorische Begleitung.

Die Energieversorgung wiederum befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel: Dezentralisierung, Sektorkopplung und intelligente Netze sind zentrale Elemente einer nachhaltigen, resilienten Infrastruktur. Technologietrends wie Power-to-X, bidirektionales Laden und digitale Laststeuerung eröffnen neue Spielräume für Versorgungssicherheit und Klimaneutralität.

Auch die Produktionslandschaft erfährt durch additive Fertigung, cyber-physische Systeme und datengetriebene Prozessoptimierung eine grundlegende Neudefinition. Die Integration von Nachhaltigkeitsindikatoren, Kreislaufwirtschaft und flexibler Skalierbarkeit wird zunehmend zum strategischen Erfolgsfaktor – nicht nur für industrielle Großakteure, sondern auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und gemeinnützige Produktionsnetzwerke.

In der Zusammenschau dieser vier Felder zeigt sich, dass technologischer Fortschritt nicht isoliert wirkt, sondern als systemischer Hebel für gesellschaftliche Transformation verstanden werden muss. Die Herausforderung liegt darin, technologische Potenziale mit rechtlicher Klarheit, sozialer Verantwortung und strategischer Förderlogik zu verbinden.

Technologietrends

Technologietrends entstehen an der Schnittstelle von Forschung, Anwendung und gesellschaftlicher Akzeptanz. Sie entwickeln sich über Jahre hinweg und verändern Märkte, Wertschöpfung und Kompetenzen nachhaltig. Ihre Beobachtung und Bewertung ist deshalb eine zentrale Grundlage strategischer Innovationsplanung.

Was verstehen wir unter Technologietrends? Um diese Frage zu klären, beschreiben wir im Folgenden unser Verständnis der beiden Begriffe:

Mit Technologie bezeichnen wir die systematische Anwendung von Wissen, Methoden, Verfahren und Werkzeugen, um praktische Probleme zu lösen oder bestimmte Zwecke effizient zu erreichen. Sie umfasst sowohl materielle Komponenten (z. B. Maschinen, Sensorik, Robotik) als auch immaterielle Elemente wie Algorithmen, Modelle oder Software. Hier verstehen wir unter Technologie insbesondere die kombinierte Nutzung von Hard- und Software zur datenbasierten Entscheidungsfindung und Handlungsausführung – sowohl in digitalen als auch physischen Systemen [1, 2, 3].

Ein Technologietrend wiederum beschreibt eine mittel- bis langfristige, strukturgetriebene Entwicklung, die durch den Einsatz neuer oder sich weiterentwickelnder Technologien ausgelöst wird und das Potenzial hat, Wirtschaft, Gesellschaft, Märkte oder Geschäftsmodelle nachhaltig zu verändern. Im Unterschied zu kurzfristigen Hypes sind Technologietrends durch eine anhaltende Dynamik, zunehmende Marktreife und strategische Relevanz gekennzeichnet. Sie verlaufen typischerweise in Phasen – von der wissenschaftlichen Grundlagenforschung über erste Anwendungen bis zur breiten Diffusion [4, 5, 6]. Zeitlich lassen sich Technologietrends wie folgt einordnen:

- Kurzfristige Trends (1–3 Jahre): Frühphase mit ersten Pilotprojekten
- Mittelfristige Trends (3–10 Jahre): Wachsende Reife, zunehmende Skalierung
- Langfristige Trends (10–25 Jahre): Potenziell disruptiv, gesellschaftliche Transformation möglich
- Megatrends (25+ Jahre): Strukturell und kulturell tief verankert

In diesem Whitepaper bezeichnen wir als Technologietrend eine nachhaltige technologische Bewegung, die sich über mehrere Jahre hinweg beobachten, analysieren und strategisch antizipieren lässt.

TREND #1: Computing Power

Definition: Was wir unter Computing Power verstehen

Rechenleistung (engl. Computing Power) bezeichnet die Fähigkeit von Rechensystemen, komplexe Rechenoperationen effizient, skalierbar und aufgabenspezifisch auszuführen. Sie wird heute nicht mehr allein über klassische Maßeinheiten wie „Operations per Second“ (OPS) oder „Floating Point Operations per Second“ (FLOPS) definiert, sondern umfasst auch Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit, Echtzeitfähigkeit und Spezialisierung – etwa das spezielle Berechnen von Algorithmen für maschinelles Lernen, für Simulationen oder das Analysieren großer Datenmengen.

Anwendungen wie bereits erwähntes maschinelles Lernen oder automatisierte Entscheidungsunterstützung lassen sich wirtschaftlich nur umsetzen, wenn ausreichend leistungsfähige und kostengünstige Systeme verfügbar sind. Rechenleistung war bis in die 80er-Jahre des letzten Jahrtausends zentralisiert. Mit Einzug des Personal Computers in den 1980er-Jahren hat sich eine Dezentralisierung eingestellt. Cloud Computing war ein Technologietrend, der sich im Jahre 2005 entwickelte und eine gewissen Re-Zentralisierung einführte. Dies wird aktuell in Teilen von einem dezentraleren Edge Computing abgelöst. Hier werden etwa in der Produktion energieeffiziente Edge-Systeme genutzt, um KI-Modelle direkt an Maschinen auszuführen. Im Onlinehandel analysieren spezialisierte Chips Millionen Transaktionen gleichzeitig, um personalisierte Empfehlungen in Echtzeit zu generieren.

Lange Zeit orientierte sich die Leistungsentwicklung am Mooreschen Gesetz [7], das ein stetiges Wachstum durch Miniaturisierung versprach. Dieses Prinzip stößt heute jedoch an physikalische und ökonomische Grenzen.

Rechenleistung ist deshalb heute mehrdimensional und strategisch zu verstehen: als Grundlage für Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz, autonome Systeme, digitale Zwillinge, Cybersicherheit – und als Bestandteil digitaler Souveränität auf nationaler Ebene [8].

Der Trend: Unbegrenzte Rechenleistung

Die Entwicklung der Rechenleistung gehört zu den fundamentalen Triebkräften technologischen Fortschritts. Über Jahrzehnte wurde sie durch das sogenannte Mooresche Gesetz geprägt. Es besagt, dass sich die Anzahl der Transistoren auf integrierten Schaltkreisen etwa alle 18 bis 24 Monate verdoppelt – mit dem Effekt, dass Rechenkapazität bei gleichzeitig sinkenden Kosten exponentiell zunimmt. [9, 7] Jedoch stößt dieses Miniaturisierungsparadigma an physikalische wie wirtschaftliche Grenzen, unter anderem durch Strukturgrößen unterhalb von zwei Nanometern, der komprimierten Wärmeentwicklung, die nicht effektiv abgeführt werden kann, und Fertigungskomplexität.

Die folgende Abbildung zeigt, wie sich das Preis-Leistungs-Verhältnis seit 1939 vervielfacht hat – von 0,01 OPS/\$ auf über 100 Milliarden OPS/\$ [9].

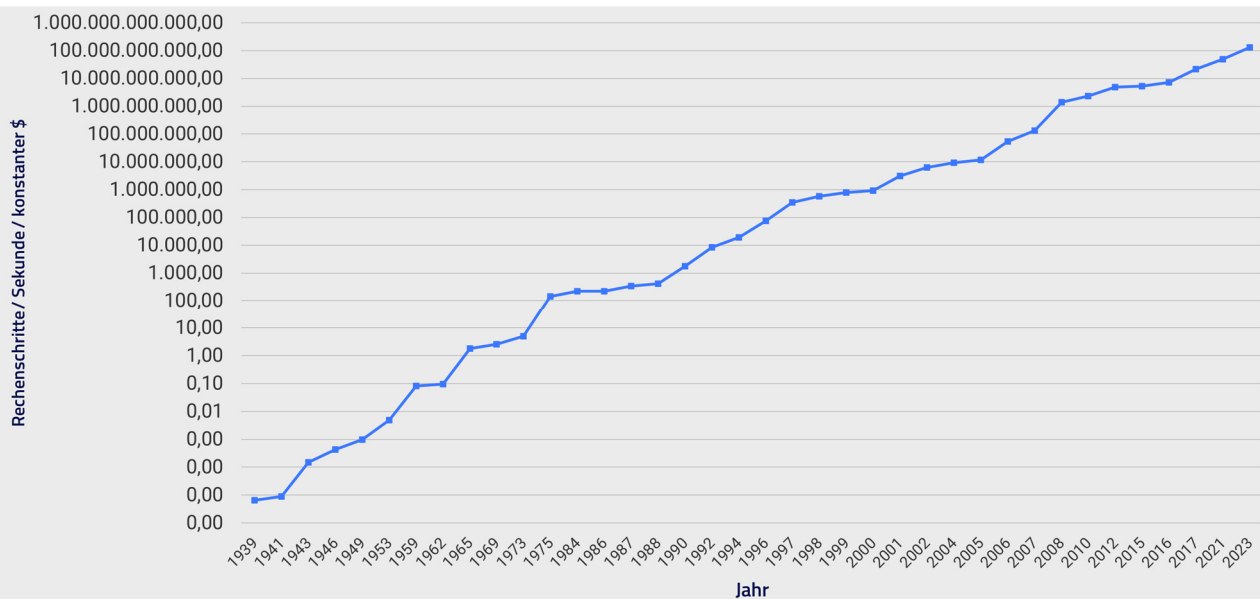


Abbildung 1: Entwicklung Preis-Leistungsverhältnis von Rechenleistung 1939–2023. [9]

Rückblickend lassen sich drei technologische Epochen unterscheiden: Die Pionierzeit (1939–1960) brachte erste Rechner wie Z3 oder Colossus hervor, aber ohne breite Anwendung. In der Moore-Ära (1965–2010) wurde Rechenleistung durch Miniaturisierung zum Massenprodukt und zur Basis der digitalen Wirtschaft. Seit 2010 prägt die Post-Moore-Ära spezialisierte Architekturen (GPU, TPU, ASIC, FPGA) sowie einen wachsender Fokus auf Energieeffizienz und Echtzeitfähigkeit.

Ab 2025 setzt ein Paradigmenwechsel ein: Während klassische Halbleitertechnologien an Grenzen stoßen, gewinnt Post-Quantum-Computing an strategischer Bedeutung [10], Hybrid-Computing verankert Nachhaltigkeit im Chipdesign [11] und Agentic AI erfordert neben hohen Anforderungen an Datenverfügbarkeit insbesondere adaptive Hardware [4, 12].

Der Blick nach vorn zeigt drei Zeithorizonte: kurzfristig sind Cloud-basierte GPUs, spezialisierte ASICs, Edge-AI-Plattformen mit Anwendungen wie Realtime-Analyse, Bildverarbeitung, KI-Modelle vor Ort entscheidend. Mittelfristig (bis 2030) folgen adaptive FPGAs, 3D-Chiplet-Technologien, hybride Rechnerarchitekturen mit Anwendungen wie IoT, intelligente Fertigung sowie ESG-orientierte Plattformen. Erst langfristig (ab 2030) sollten Quanten- und neuromorphe Systeme Optimierungen, Simulationen und autonome Entscheidungen revolutionieren.

Die Ära der bloßen Rechenleistungsvergrößerung durch Miniaturisierung ist vorüber. Entscheidend wird künftig sein, die richtige Architektur für die jeweilige Anwendung zu wählen – sei es zentral, dezentral, spezialisiert oder hybrid. Rechenleistung entwickelt sich damit von einer technischen Kennzahl zu einer strategischen Plattformentscheidung mit hoher wirtschaftlicher Tragweite.

Erwarteter Business Impact: Sinkende Kosten

Sinkende Kosten digitaler Schlüsselressourcen verändern Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten grundlegend. Wie Abbildung 2 zeigt, sind die Preise für zentrale digitale

Infrastrukturelemente, darunter Rechenleistung (CPU, \$/MFLOP), Bandbreite (\$/MPS) und Speicher (\$/MB), seit den 1970er-Jahren exponentiell gefallen – ein Trend, der sich bis mindestens 2030 fortsetzen dürfte [13].

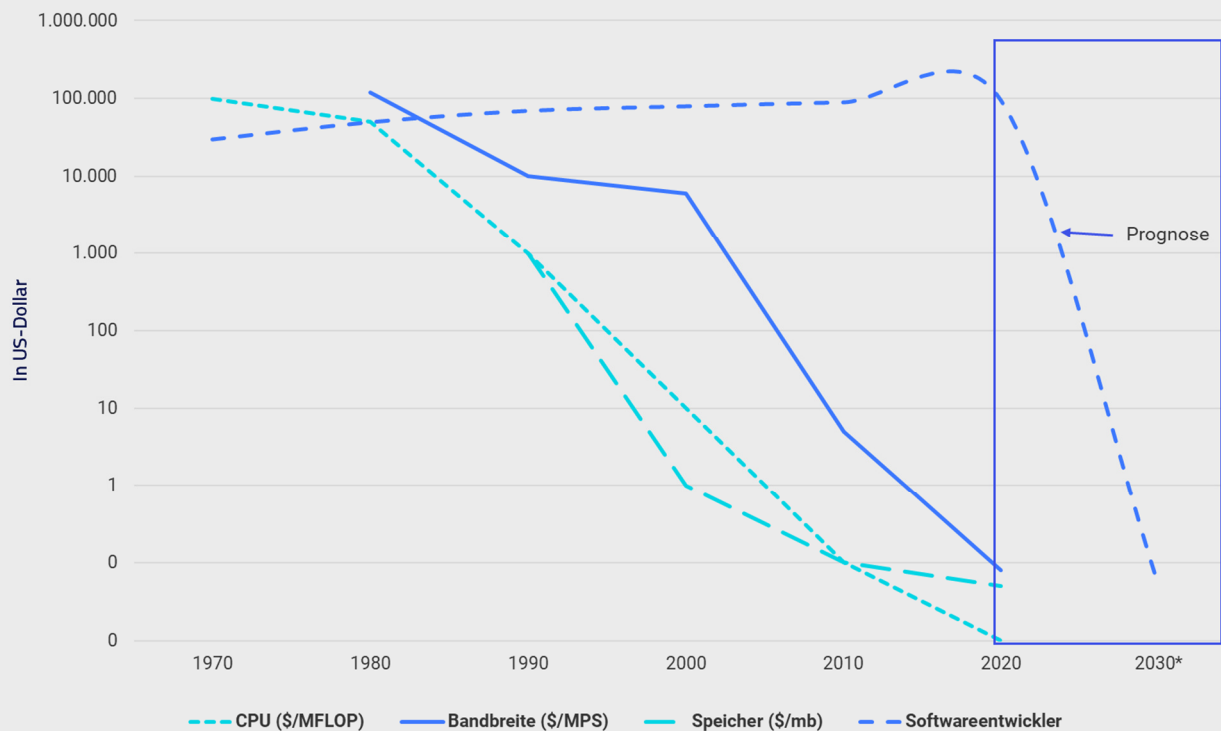


Abbildung 2: Kostenentwicklung für ausgewählte digitale Produkte und Dienstleistungen. [13]

Für Unternehmen bedeutet das: Rechnertechnologien, die früher Großkonzernen vorbehalten waren, sind heute auch für den Mittelstand zugänglich. Hochleistungsrechnen, KI-gestützte Automatisierung oder datenbasierte Services können über Cloud- und Edge-Lösungen flexibel und wirtschaftlich genutzt werden. Besonders KI-Modelle für Qualitätsprüfung, Wartung oder Energieoptimierung lassen sich heute schneller, günstiger und zunehmend dezentral betreiben.

Die Betriebskosten (im Wesentlichen elektrische Energie für Rechnerbetrieb und Kühlung) sind inzwischen entscheidend für eine Standortwahl.

Die Wahl der richtigen Technologieplattform entwickelt sich damit zur strategischen Unternehmensentscheidung. Sie beeinflusst nicht nur die operative Effizienz, sondern auch die Innovationsfähigkeit und Wettbewerbsposition. Unternehmen, die in flexible und vor allem energieeffiziente Recheninfrastruktur investieren, profitieren durch niedrigere Betriebskosten und können sich somit einen Vorteil bei ihrer Wettbewerbsfähigkeit schaffen.

Zusammengefasst ist Rechenleistung damit kein IT-Thema mehr, sondern ein Produktionsfaktor. Wie Fabriken der Zukunft werden im KI-Zeitalter bzw. Daten-Zeitalter die Rechenzentren sein. Wer sie richtig nutzt, erschließt neue Märkte, senkt Kosten und stärkt seine Innovationskraft – unabhängig von der Unternehmensgröße. Aber: Ohne wettbewerbsfähige Energiekosten investiert Deutschland (wie so oft) in Forschung und die Industrialisierung des Wissens erfolgt im Ausland.

TREND #2: Extended Reality

Definition: Vom realen Erleben zur virtuellen Erweiterung

Extended Reality (XR) ist ein Sammelbegriff für immersive Technologien, die physische und digitale Realitäten miteinander verschmelzen. Dazu zählen:

- Virtual Reality (VR): vollständiges Eintauchen in computergenerierte Umgebungen.
- Augmented Reality (AR): digitale Inhalte werden in die reale Welt eingeblendet.
- Mixed Reality (MR): reale und virtuelle Elemente interagieren dynamisch miteinander.

Ziel von XR ist es, interaktive und multisensorische Erlebnisse zu ermöglichen, die zunehmend in Branchen wie Unterhaltung, Bildung, Industrie, Gesundheitswesen und öffentlicher Verwaltung zum Einsatz kommen [14, 15].

Der Begriff der vollständig virtuellen Welt wurde bereits 1992 in Neal Stephensons Roman „Snow Crash“ als „Metaverse“ beschrieben – eine Vision, die durch Fortschritte in XR-Technologie und durch Investitionen globaler Technologiekonzerne wie Meta, Apple und Microsoft neue Relevanz erlangt hat.

XR-Spektrum: Von der Physischen zur Digitalen Realität (am Beispiel Architektur)

Physical Reality	Augmented Reality	Mixed Reality	Virtual Reality
Reale Umgebung	Digitale Erweiterung der realen Welt	Nahtlose Interaktion von physischer und digitaler Realität	Vollständig virtuelle Umgebung
			
Der Architekt zeichnet den Grundriss eines Gebäudes von Hand auf Papier und begutachtet das reale Baugelände.	Der Architekt sieht durch seine AR-Brille, das geplante Gebäude als virtuelles 3D-Modell, das sich präzise in das reale Baufeld einfügt.	Im Büro projiziert der Architekt ein 3D-Hologramm des Gebäudes in den Raum, kann es per Handgeste drehen, skalieren oder verändern.	Der Architekt trägt ein VR-Headset und bewegt sich virtuell durch das geplante Gebäude, um Raumwirkung, Lichtführung und Materialität immersiv zu erleben

Abbildung 3: Augmented Reality in Abgrenzung zu Virtual Reality und zur physischen und digitalen Realität. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [16])

Der Trend: Vom Konzept zur produktiven Realität

Die Anfänge immersiver Technologien reichen bis in die 1960er-Jahre zurück – etwa zum Sensorama oder dem ersten Head-Mounted-Display (Sword of Damocles). Doch erst durch

Fortschritte bei Grafikprozessoren, Tracking-Systemen und mobilen Endgeräten ist XR in den letzten Jahren massentauglich geworden.

Insbesondere die Weiterentwicklung der Hardware ist der Motor der aktuellen Dynamik. Moderne XR-Geräte wie die Apple Vision Pro, Meta Quest 3 oder Magic Leap 2 bieten

- höhere Auflösung und Farbtiefe (z. B. Micro-OLED),
- präzises Raum-Tracking durch Sensorfusion,
- ergonomischere Bauformen und
- geringere Latenzen zur Reduktion von Motion Sickness.

Der Übergang von reiner VR zu immersiver Mixed Reality (z. B. Passthrough-Funktionalität) ist ein technologischer Meilenstein, der XR auch für produktive Alltagsanwendungen nutzbar macht [15].

Aktuelle Schlüsseltrends

1. Fortschritte in Hardware und Display-Technologien:

XR-Geräte werden kleiner, leistungsfähiger und intuitiver bedienbar. Eye-Tracking, Haptik-Systeme und Spatial Audio tragen dazu bei, das Eintauchen in virtuelle Umgebungen noch realistischer zu gestalten. Hardwareseitige Innovationen bilden die Grundlage für alle weiteren Entwicklungen [112].

2. Industrielle und bildungsbezogene Anwendungen:

In Unternehmen etabliert sich XR als Werkzeug für:

- Simulationsbasiertes Training (z. B. für Wartung, Notfälle, medizinische Eingriffe)
- Digitale Zwillinge zur Echtzeitüberwachung von Maschinen und Anlagen
- Virtuelle Kollaboration über Entfernungen hinweg (z. B. Microsoft Mesh, NVIDIA Omniverse)

Im Bildungsbereich ermöglichen XR-Anwendungen immersive Lernumgebungen, die über klassische E-Learning-Formate hinausgehen [18].

3. Integration von Künstlicher Intelligenz und Cloud-Technologie:

XR-Umgebungen werden zunehmend dynamisch und adaptiv: KI ermöglicht semantische Objekterkennung, naturalistische Avatare und automatische Szenengenerierung. Gleichzeitig erlauben Cloud-basierte XR und die Verfügbarkeit von Breitbandnetzen das Streamen rechenintensiver Inhalte (etwa 3D-Welten oder -Renderings) – unabhängig vom Endgerät [113].

Tabelle 1 zeigt die Entwicklungsetappen und Einsatzperspektiven von Extended Reality (XR) im Zusammenspiel mit Künstlicher Intelligenz und Cloud-Technologien. Sie verdeutlicht, wie sich XR von spezialisierten industriellen Anwendungen hin zu allgegenwärtigen, intelligenten und kontextsensitiven Umgebungen entwickelt.

Zeithorizont	Fokusbereiche	Einsatzperspektive	Schlagwort
Kurzfristig (< 5 Jahre)	Hardware und industrielle Anwendungen	Produktreife erreicht, stark wachsender Einsatz im B2B	Immersive Workplaces
Mittelfristig (5–10 Jahre)	Konsumentenmarkt und Bildung	Marktdurchbruch bei sinkenden Preisen und stabiler Infrastruktur	Everyday XR
Langfristig (> 10 Jahre)	KI-gestützte XR, Cloud-Streaming, Spatial Computing	Dynamische, kontextadaptive Welten; Integration in Smart Environments	Cognitive XR

Tabelle 1: Entwicklungsstadien von Extended Reality. (Eigene Darstellung)

Erwarteter Business Impact: Von immersiven Erlebnissen zu neuen Geschäftsmodellen

Laut Schätzungen von McKinsey [14] wird der globale XR-Markt bis 2030 ein Volumen von über 600 Milliarden US-Dollar erreichen. Besonders dynamisch entwickeln sich:

- Gaming und Entertainment: etwa durch plattformübergreifende VR-Spiele, virtuelle Konzerte oder immersive Filmformate
- Bildung und Training: z. B. mit virtuellen Klassenräumen, AR-gestützten Lernszenarien und Onboarding-Simulationen
- Medizin: für präoperative Planung, Fern-Operationstrainings, Schmerztherapie oder kognitive Reha
- Industrie und Logistik: für virtuelles Prototyping, Fernwartung, Lagerautomatisierung und Sicherheitsunterweisungen
- Architektur und Stadtplanung: etwa durch begehbare 3D-Modelle und partizipative XR-Beteiligungsformate

Die Kombination von XR mit 5G, IoT, Edge Computing und KI eröffnet neue digitale Ökosysteme, die physische und virtuelle Realität dauerhaft miteinander vernetzen.

Ein Beispiel dafür ist „Metaverse Seoul“, eine städtische Plattform, die XR für digitale Bürgerdienste, Stadtinformation, Bildung und virtuelle Verwaltungsangebote nutzt. Solche Ansätze zeigen das Potenzial, XR in die öffentliche Infrastruktur zu integrieren – als Teil smarterer, partizipativer Städte.

Dabei lässt sich eine inhaltliche Weiterentwicklung des Konzepts von Second Life erkennen – einer frühen, 2003 gestarteten virtuellen 3D-Welt, die erstmals soziale und wirtschaftliche Aktivitäten in den digitalen Raum verlagerte. Während Second Life vor allem auf Interaktion über Bildschirme beschränkt blieb, ermöglichen moderne XR-Umgebungen wie Metaverse Seoul heute immersive, realitätsnahe Erfahrungen und die Verknüpfung mit realen Verwaltungs- und Bildungsprozessen.

Chancen und Herausforderungen für Start-ups und den Mittelstand in Deutschland

Im Grundsatz führt diese Technologie zu einem engeren Zusammenwachsen zwischen einer realen Welt und einer virtuellen Welt, die Teilaspekte der realen Welt abbilden kann. Durch ein schnelleres Abspulen des virtuellen Teils, kann man in die eigene Zukunft schauen und sich somit auf bestimmte Gegebenheiten vorbereiten. In einem ersten Schritt können Daten für eine bessere Entscheidungsgrundlage bereitgestellt werden, mittelfristig kann man dann Entscheidungsautonomie in die virtuelle Welt übertragen.

Für deutsche Start-ups und mittelständische Unternehmen bietet Extended Reality signifikante Potenziale zur Digitalisierung und Differenzierung in zunehmend globalisierten Märkten. Laut einer Erhebung des Bitkom e. V. [17] sehen 74 % der deutschen Industrieunternehmen XR als wichtigen Zukunftstrend, insbesondere im Bereich Fernwartung, Training und Maschinenvisualisierung als Anwendungsfelder für Optimierung und Effizienzsteigerung, aber auch komplett neue Geschäftsmodelle durch autonome Systeme und Agenten, die bestimmte Aufgaben eigenständig ausführen. Die Integration immersiver Technologien kann somit neue Geschäftsfelder erschließen mit deren Hilfe dem demographischen Wandel und somit dem Fachkräftemangel adäquat begegnet werden kann.

Chancen ergeben sich besonders in Bereichen wie:

- Spezialisierte Branchenlösungen, z. B. XR-gestützte Montage- und Servicetrainings im Maschinenbau oder bei Hidden Champions
- Digitale Dienstleistungen und neue Geschäftsmodelle, wie XR-as-a-Service, White-Label-Plattformen oder mobile AR-Lösungen für Wartung und Bau
- Frühzeitige Positionierung im öffentlichen Sektor, z. B. im Rahmen von Smart-City-Projekten oder bei der Digitalisierung kommunaler Dienste

Laut PwC [18] profitieren Unternehmen dann besonders, wenn sie XR in vorhandene Prozesse integrieren, statt isolierte Pilotprojekte zu betreiben – Stichwort: „Use-case-driven XR“.

Gleichzeitig bestehen zentrale Herausforderungen:

- Der Einstieg in XR erfordert Investitionen in Content-Produktion, User Experience und Hardwarebeschaffung – laut dem XR-Hub Bavaria [19] ein zentrales Hemmnis für kleine Unternehmen.
- Es mangelt an XR-spezifischen Fachkräften, insbesondere an Entwickler*innen mit Erfahrung in Unity, Unreal Engine oder interaktiver 3D-Gestaltung.
- Auch die Art und Weise wie Deutschland den Datenschutz lebt, rechtliche Unsicherheit (z. B. bei biometrischer Datennutzung) und komplexe Plattformabhängigkeiten (z. B. Apple vs. Meta) bremsen eine breitere Umsetzung in Deutschland.

SZENARIO 2030: Zwischen Komfort und Kontrolle



Digitale Sicherheit ist zum Alltagsthema geworden. Selbst Wecker, Kühlschränke und Heizsysteme laufen heute über staatlich zertifizierte Netze. In welchem Umfang werden wir unseren Alltag noch selbst gestalten, wenn Algorithmen längst wissen, was wir brauchen – oder glauben, es zu wissen?

Ich heiße Amir, bin 29 Jahre alt und Softwareentwickler in Hamburg. Mein Tag beginnt um 6:30 Uhr – nicht, weil ich es so will, sondern weil mein smarter Wecker entschieden hat, dass mein Schlafzyklus dann „optimal unterbrochen“ werden kann. Ich fühle mich trotzdem müde. Während ich dusche, stellt das Bad automatisch Temperatur und Licht ein. Praktisch, aber manchmal wünsche ich mir einfach einen Lichtschalter.

In der Küche wartet mein Frühstück – zubereitet von einem Küchenroboter, der sich an meinen digitalen Ernährungsplan hält. Ich habe vergessen, wie es ist, spontan zu essen. Während ich kaue, blendet mein AR-Tisch Nachrichten und Termine ein. Ich entscheide mich fürs Homeoffice – nicht aus Bequemlichkeit, sondern weil die KI mir rät, den Verkehr zu meiden. Sie hat meistens recht.

Mein Rechner erkennt mich per Gesichtsscan. Seit den Angriffen auf städtische Datennetze werden alle Geräte regelmäßig geprüft – angeblich nur zur Sicherheit. Ich frage mich manchmal, wo all diese Daten landen.

Die Meetings finden in virtuellen Räumen statt. Unsere Avatare sehen aus wie wir – nur besser. Die KI protokolliert alles, verteilt Aufgaben, bewertet sogar unsere Beiträge. Effizient, aber irgendwie entmenschlichend.

Mittags gehe ich in den Park. Drohnen pflegen das Grün, Sensoren in den Bäumen messen die Luftqualität. Alles ist vernetzt. Alles wird überwacht. Ich frage mich, ob die Natur noch Natur ist, wenn sie ständig analysiert wird.

Abends treffe ich Freunde zum Sport. Eine App hat den Platz gebucht. Danach bestelle ich Essen per Sprachassistent. Es kommt kontaktlos mit einem autonomen Lieferfahrzeug. Ich sehe kaum noch Menschen, aber alles funktioniert.

Bevor ich schlafen gehe, checke ich meine Gesundheitsdaten. Die KI empfiehlt mehr Magnesium. Ich frage mich, ob sie auch merkt, dass mir manchmal einfach ein echtes Gespräch fehlt.

2030 ist ein Jahr der Effizienz – aber auch der leisen Entfremdung. Alles funktioniert perfekt. Nur Sicherheit fühlt sich plötzlich politisch an.

TREND #3: Digitale Zwillinge

Definition: Was wir unter Digitalen Zwillingen verstehen

Ein Digitaler Zwilling ist eine digitale Repräsentation eines realen Objekts, Systems oder Prozesses, die kontinuierlich mit der physischen Welt synchronisiert wird. Ziel ist es, reale Zustände abzubilden, zu analysieren, vorherzusagen und zu optimieren. Die zugrunde liegenden Daten stammen aus Sensoren, Produktionssystemen oder externen Quellen und werden mithilfe von Künstlicher Intelligenz, Simulationen und Big Data ausgewertet. [20, 21]

Das Konzept wurde erstmals 2002 von Michael Grieves [20] im Kontext des Produktlebenszyklusmanagements beschrieben und später von der NASA aufgegriffen, um komplexe Systeme virtuell zu modellieren. [22, 23] Abbildung 4 verdeutlicht dieses klassische Konzept am Beispiel eines Fahrzeugs: Sensoren erfassen reale Zustände, die ins digitale Modell gespiegelt werden – umgekehrt können Optimierungen aus dem Zwilling in die physische Welt zurückfließen.

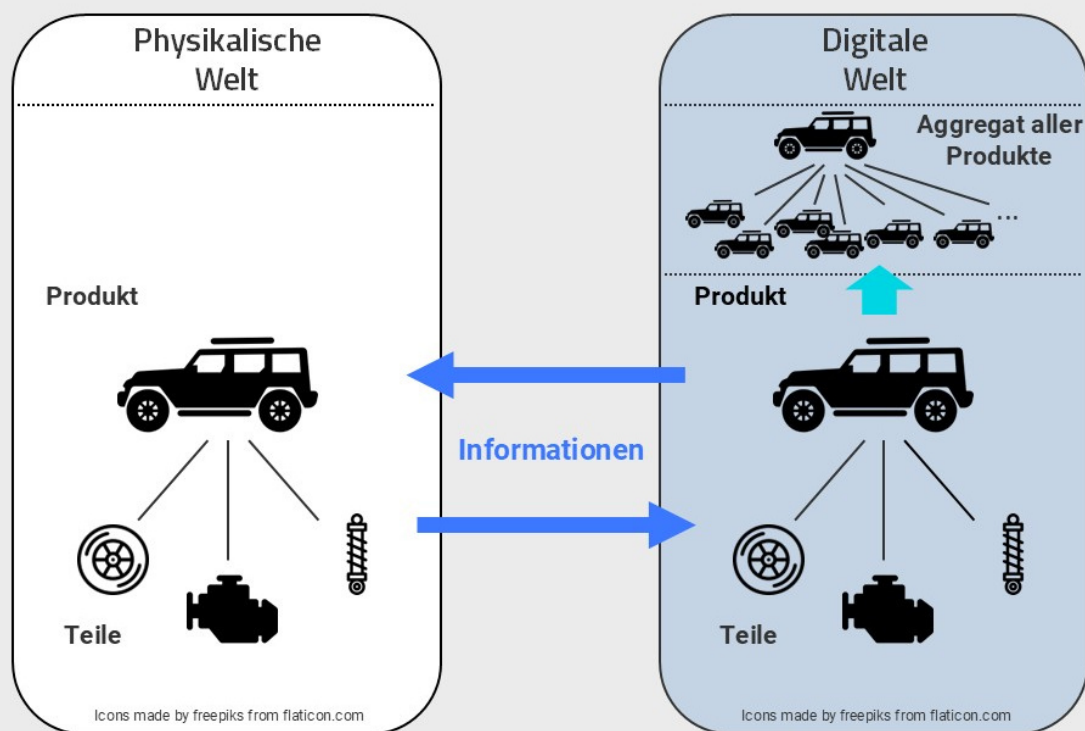


Abbildung 4: Das klassische Konzept von Digitalen Zwillingen. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [21])

Eine zentrale Herausforderung ist die Pflege und der systematische Einsatz von Zwillingen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung. Bei großen Fahrzeugherstellern entstehen so Millionen Digitaler Zwillinge – mit enormen Datenmengen, verursacht durch zahlreiche Sensoren und lange Produkt-/Servicelebenszyklen. So können z. B. Hersteller wie Volkswagen gezielt tausende Fahrzeuge zurückrufen [22]. Außerdem ermöglichen

gut gepflegte Zwillinge mithilfe von Künstlicher Intelligenz die frühzeitige Erkennung von Anomalien und proaktive Wartungsmaßnahmen. Somit steuern virtuelle Welten zunehmend reale Welten.

Inzwischen geht das Konzept weit über einzelne Produkte hinaus: Auch Produktsysteme, komplette Fabriken, Lieferketten, urbane Infrastrukturen oder Energiesysteme werden digital abgebildet. Selbst mittelständische Unternehmen können heute ganze Produktionslinien virtuell darstellen und optimieren. Damit hat sich der Digitale Zwilling von einem ingenieurgetriebenen Werkzeug zu einem universellen Konzept der digitalen Transformation entwickelt, das auch auf der Wertschöpfungsebene neue Optionen für die Unternehmen bietet. Z. B. könnten Digitale Zwillinge wissen, wie oft eine Dienstleistung wirklich vom Kunden benutzt wurde und die Wertschöpfung orientiert sich am Kundennutzen.

Der Trend: Veränderte Anwendungen durch Digitale Zwillinge und Identitäten

Aufbauend auf der auf Seite 19 beschriebenen Definition entwickeln sich Digitale Zwillinge zu einem der dynamischsten Technologietrends unserer Zeit. Durch die Kombination von Sensorik, Künstlicher Intelligenz und dem Internet der Dinge (IoT) entstehen virtuelle Abbilder, die reale Systeme in Echtzeit überwachen, analysieren und zunehmend selbstständig steuern. Der weltweite Markt wächst rasant und soll laut Prognosen bis 2028 ein Volumen von über 110 Milliarden US-Dollar erreichen [4].

Während frühe Anwendungen auf einzelne Produkte und Maschinen fokussiert waren, steht heute die Vernetzung ganzer Systeme im Vordergrund. Produktionslinien, Fabriken, Energie- und Verkehrsinfrastrukturen werden als zusammenhängende digitale Ökosysteme modelliert. Beispiele wie der Digitale Zwilling des Abwassernetzes von Northumbrian Water, die 3D-Zwillinge der Offshore-Anlagen von Shell oder der A350-Zwilling von Airbus zeigen, wie Unternehmen Betriebssicherheit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit verbessern. [4]

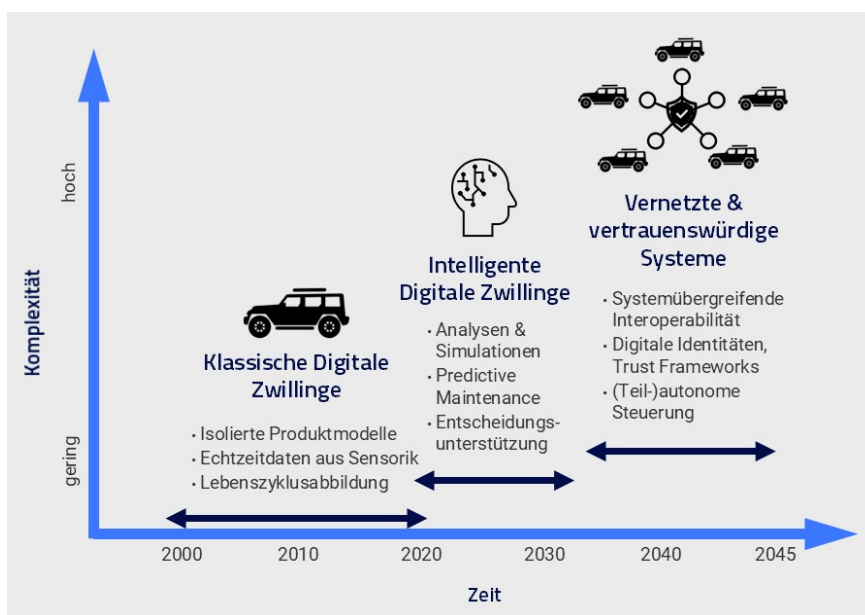
Parallel dazu entwickeln sich Digitale Zwillinge zu intelligenten und (teil-)autonomen Akteuren. Fortschritte in KI, Simulation und Edge-Computing ermöglichen, dass Zwillinge nicht mehr nur analysieren, sondern aktiv Handlungsempfehlungen ableiten oder Entscheidungen vorbereiten. In

Die eIDAS2-Verordnung in der EU

Die digitale Identität wird immer wichtiger, insbesondere durch die Einführung der eIDAS2-Verordnung in der EU, die digitale Wallets und qualifizierte elektronische Signaturen fördert. Aufbauend auf der eIDAS-Verordnung von 2014 wurde 2021 ein überarbeiteter Rahmen vorgeschlagen, der das Prinzip der Selbstbestimmung über digitale Identitätsdaten in den Mittelpunkt stellt. Ein Wallet ermöglicht es Bürger*innen, offizielle Nachweise wie Führerscheine, Diplome oder Zertifikate sicher auf mobilen Geräten zu speichern und grenzüberschreitend zu nutzen – ohne zentrale Speicherung oder unnötige Datenweitergabe. Mit dem Inkrafttreten der neuen Verordnung im Mai 2024 (EU 2024/1183) und dem Ziel, bis 2030 allen EU-Bürger*innen Zugang zu einer digitalen Identität zu ermöglichen, wird die Wallet derzeit in groß angelegten Pilotprojekten getestet und bis Ende 2026 flächendeckend eingeführt. [114, 124]

Kombination mit standardisierten Datenmodellen (z. B. Asset Administration Shell, Digital Product Passport) entsteht eine neue Generation vernetzter, lernfähiger Systeme, die ganze Prozessketten optimieren.

Mit wachsender Vernetzung und Interoperabilität gewinnen die digitalen Identitäten an Bedeutung. Sie stellen sicher, dass Digitale Zwillinge in offenen Datenökosystemen ebenso eindeutig identifizierbar, authentifizierbar und vertrauenswürdig sind, wie ihre realen Abbilder. Initiativen wie Gaia-X und Catena-X entwickeln für standardisierte Identitätsmechanismen gemeinsame Trust-Frameworks, Identity Wallets und semantische Submodelle, um Datenhoheit, Nachvollziehbarkeit und Interoperabilität zu gewährleisten. Dabei soll sichergestellt werden, dass Zwillinge eindeutig identifizierbar und über Organisations- sowie Ländergrenzen hinweg sicher kommunizieren können. [25, 26, 23, 24].



*Abbildung 5:
Entwicklungsstufen Digitaler
Zwillinge – von der isolierten
Repräsentation zum
vernetzten, intelligenten und
vertrauenswürdigen System.
(Eigene Darstellung in
Anlehnung an [21, 24, 23])*

Abbildung 5 zeigt drei aufeinander aufbauende Entwicklungsstufen:

1. Klassische Zwillinge: isolierte Produktmodelle auf Basis von Sensor- und Echtzeitdaten
2. Intelligente Zwillinge: KI-gestützte Analysen, Simulationen und Optimierungen ganzer Prozesse
3. Vernetzte und vertrauenswürdige Ökosysteme: interoperable, standardisierte Systeme mit digitalen Identitäten und (teil-)autonomer Steuerung

Erwarteter Business Impact: Zukunft mit digitalen Zwillingen steuern

Digitale Zwillinge entwickeln sich zu einem der wichtigsten Werkzeuge für Wertschöpfung und Effizienzsteigerung in datengetriebenen Unternehmen. Sie ermöglichen eine neue Qualität von Transparenz, Prognosefähigkeit und Steuerung, die in nahezu allen Branchen wirtschaftliche und ökologische Vorteile schafft.

In der Industrie verkürzen Digitale Zwillinge Entwicklungszyklen, reduzieren Ausschuss und ermöglichen vorausschauende Wartung. Hersteller wie Airbus oder BMW steigern damit Produktivität, Qualität und Ressourceneffizienz, während Wartungs- und Energiekosten sinken. Durch die Verbindung mit KI entstehen adaptive Systeme, die Prozessabweichungen selbst erkennen und korrigieren können – ein entscheidender Schritt hin zu autonomer Fertigung. Im Infrastruktur- und Energiesektor schaffen Digitale Zwillinge die Grundlage für resiliente und nachhaltige Systeme. Urbane und industrielle Energiezwillinge ermöglichen die Simulation von Verbrauchsszenarien, Lastverteilung und CO₂-Bilanzen in Echtzeit. Stadtverwaltungen nutzen digitale Stadtmodelle, um Verkehr, Bauprojekte und Ressourcenmanagement datenbasiert zu optimieren. In der Medizin eröffnen patientenspezifische Zwillinge neue Wege der personalisierten Therapieplanung, Medikamententestung und präventiven Diagnostik. Die Kombination aus biophysikalischer Modellierung und Echtzeitdaten führt zu sichereren und effizienteren Behandlungsstrategien.

Zunehmend wird die Vertrauenswürdigkeit zum geschäftskritischen Faktor. Nur wenn Digitale Zwillinge über standardisierte Identitäten verfügen und sicher in Ökosystemen interagieren können, lassen sich skalierbare und regulatorisch konforme Geschäftsmodelle realisieren. Initiativen wie die Manufacturing-X Familie schaffen dafür gemeinsame technische und rechtliche Rahmenbedingungen. Der Business Impact liegt damit in drei zentralen Dimensionen:

1. Effizienz & Wertschöpfung: schnellere Produktentwicklung, geringere Kosten, höhere Anlagenverfügbarkeit
2. Nachhaltigkeit & Resilienz: optimierte Ressourcennutzung, geringere Emissionen, stabile Lieferketten
3. Vertrauen & Datenhoheit: sichere Zusammenarbeit über Organisationsgrenzen hinweg durch digitale Identitäten und interoperable Standards

Digitale Zwillinge gelten damit als Schlüsseltechnologie der industriellen und gesellschaftlichen Transformation: Sie verbinden wirtschaftlichen Nutzen mit Nachhaltigkeit und schaffen die Basis für transparente, intelligente und vertrauenswürdige Prozesse in der digitalen Ökonomie. Unternehmen sollten den Einstieg in Digitale Zwillinge gezielt planen und schrittweise skalieren. Wesentliche Erfolgsfaktoren sind:

- Datenqualität sichern: konsistente, verknüpfbare Daten als Basis
- KI und Standards nutzen: für Prognosen, Optimierung und Interoperabilität
- Vertrauen schaffen: über digitale Identitäten und Frameworks wie Gaia-X und Catena-X
- Ökosystemisch denken: Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette aufbauen

Fazit: Der Digitale Zwilling ist kein einzelnes Tool, sondern ein strategischer Enabler für Effizienz, Nachhaltigkeit und Vertrauen in der digitalen Wirtschaft.

TREND #4: Kohlendioxidreduktion

Definition: Kohlendioxidmanagement und seine Maßnahmen

Kohlenstoffmanagement umfasst sämtliche technischen, biologischen und organisatorischen Maßnahmen, um Emissionen zu vermeiden, zu reduzieren, zu binden oder zu kompensieren. Dazu gehören industrielle Verfahren der Kohlendioxidabscheidung, -speicherung und -nutzung (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS), aber ebenso energieeffiziente Prozesse, Kreislaufwirtschaft, Materialsubstitution, naturbasierte Senken sowie Verhaltens- und Konsumänderungen. Ziel ist es, Netto-Null-Emissionen durch ein Zusammenspiel von Technik, Management und gesellschaftlicher Verantwortung zu erreichen [27, 28].

Industrielle Verfahren umfassen sämtliche technologischen, natürlichen und geochemischen Verfahren, die Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre oder industriellen Prozessen entfernen, dauerhaft speichern oder als Rohstoff weiterverwenden [27, 29]. Ziel dieser Ansätze ist es, die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu verringern und damit einen Beitrag zur Stabilisierung des Klimasystems zu leisten.

Technologische Verfahren wie Post-Combustion Capture, Direct Air Capture (DAC) oder Direct Ocean Capture (DOC) binden CO₂ chemisch und speichern es anschließend in geologischen Formationen, karbonatisierten Gesteinen oder im Ozean. Parallel ermöglichen Nutzungsansätze die stoffliche oder energetische Verwertung von CO₂, etwa in synthetischen Kraftstoffen, Baustoffen oder Kunststoffen.

Natürliche und hybride Verfahren wie Aufforstung, Moorwiedervernässung, Blue-Carbon-Ökosysteme (Mangroven, Seegraswiesen) oder Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) kombinieren biologische Kohlenstoffsinken mit technischer Abscheidung.

Auch geochemische Prozesse – etwa die beschleunigte Verwitterung von Silikat- und Kalkgestein – gewinnen als natürliche, langfristig stabile Form der CO₂-Bindung an Bedeutung [30, 31]. Der Kalkkreislauf fungiert hierbei als geologischer Langzeitpuffer: In Wasser gelöstes CO₂ reagiert mit Mineralien zu Hydrogencarbonaten, die in Sedimenten über Millionen Jahre gespeichert werden. Der Kalkkreislauf dient zunehmend auch als industrielles Prinzip der CO₂-Mineralisierung, etwa in der Zement- und Baustoffindustrie [29, 32].

Gleichzeitig bestehen Risiken und Grenzen: Das Auftauen des Permafrosts droht große Mengen an gebundenem Kohlenstoff freizusetzen [33], und Verfahren wie DAC oder DOC erfordern bislang noch erhebliche Energiemengen.

Trotz dieser Herausforderungen ist CCUS ein dynamisch wachsendes Feld, das biologische, chemische und digitale Innovationen verbindet.

Der Trend: Vom industriellen CCUS zur ganzheitlichen Kohlenstoffstrategie

CCUS hat sich von einer technischen Nischenlösung im Öl- und Gassektor zu einer zentralen Säule globaler Dekarbonisierungsstrategien entwickelt. Während in den 2000er-Jahren CO₂-

Abscheidung vor allem zur Enhanced Oil Recovery (EOR) genutzt wurde, verlagerte sich der Fokus ab den 2010er Jahren zunehmend auf die industriellen Anwendungen in Bereichen wie Zement, Stahl und Chemie [28, 34].

Kalkkreislauf: Bindung und Speicherung von CO₂ und Energie

Der Kalkkreislauf verbindet Klimaschutz und Energiespeicherung. Durch Carbon-Mineralisations-Verfahren wird CO₂ dauerhaft in Beton, Schlacken oder Basalt gebunden. Gleichzeitig dient Kalk im Calcium-Looping-Prozess der chemischen Energiespeicherung: Wird Kalkstein (CaCO₃) bei rund 900 °C zu Branntkalk (CaO) und CO₂ zerlegt, lässt sich die gespeicherte Wärme bei der Rückreaktion wiedergewinnen: Eine Schlüsseltechnologie an der Schnittstelle von Energie- und Klimawende. [123, 115, 116, 117]

Seit Mitte der 2020er-Jahre gewinnt CCUS deutlich an Dynamik: Fortschritte in Materialforschung, Prozessintegration und Digitalisierung senken Kosten und ermöglichen modulare, skalierbare Anlagen. Regierungen und Industrie investieren in clusterbasierte CO₂-Infrastrukturen und Hubs wie etwa Northern Lights (EU) oder Longship (Norwegen) – der Übergang von der Demonstration zur industriellen Skalierung [35].

Politisch wird der Trend durch Programme wie den EU-Net-Zero Industry Act [36] gestützt, der eine jährliche Speicherkapazität von 50 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr bis 2030 vorsieht. Gleichzeitig bestehen Risiken durch hohe

Investitionskosten und regulatorische Unsicherheiten, die laut BloombergNEF [37] zu einer Phase der Ernüchterung führen könnten. Zusammengefasst ist der Trend in dargestellt.

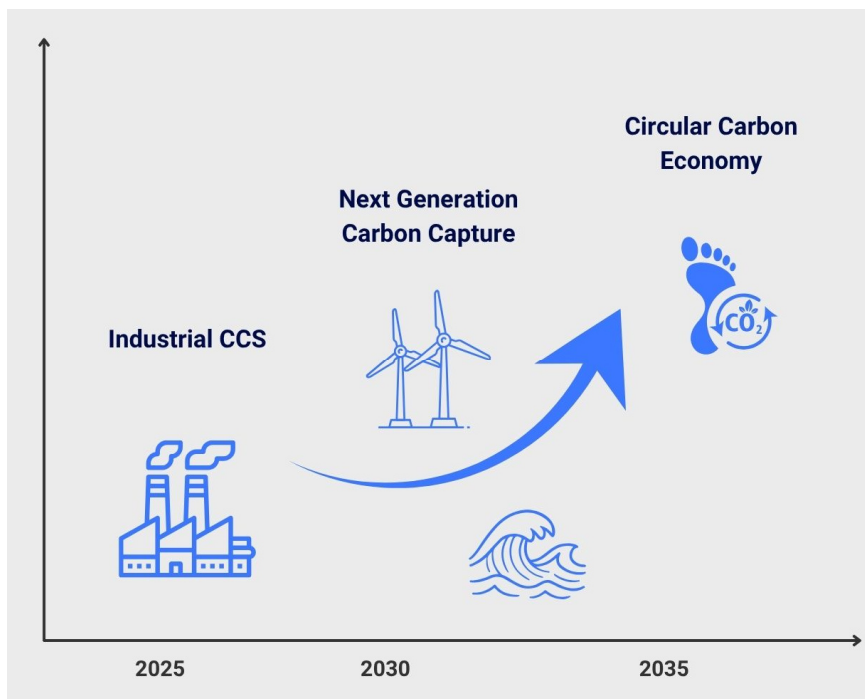


Abbildung 6: Entwicklung von industrieller CO₂-Abscheidung hin zur zirkulären Kohlenstoffwirtschaft bis 2035. (Eigene Darstellung)

Im Folgenden eine detailliertere Beschreibung des Trends entlang der Zeitachse:

Kurzfristig (bis 2030) liegt der Schwerpunkt auf der Skalierung bewährter Verfahren in der Schwerindustrie. Bestehende Anlagen werden ausgebaut und digitale Überwachungssysteme mit

KI und Sensorik erhöhen Transparenz und Effizienz. Ziel ist der Aufbau einer verlässlichen CO₂-Infrastruktur und die Etablierung von Industrial CCS als Standardlösung in Zement-, Stahl- und Chemieanlagen.

Mittelfristig (2030 – 2035) folgt die Diversifizierung durch Direct Air Capture (DAC), Bio-CCS und ozeanbasierte Verfahren. Diese Ansätze werden zunehmend mit Wasserstoffproduktion und Carbon Utilization [38] kombiniert, um Emissionen auch außerhalb industrieller Punktquellen zu senken. Laut [35] könnte die globale CCUS-Kapazität bis 2036 rund 0,7 Mrd. Tonnen CO₂ pro Jahr erreichen.

Langfristig (ab 2035) entsteht eine Circular Carbon Economy, in der CO₂ als Rohstoff dient. Durch Technologien wie DAC, Power-to-X und synthetische Biologie werden negative Emissionen möglich und Kohlenstoffkreisläufe geschlossen. Damit wandelt sich die lineare Industrieproduktion hin zu einem zirkulären, ressourceneffizienten System [39].

Doch zunehmend zeigt sich: Abscheidung allein reicht nicht aus. Unternehmen, Städte und Individuen müssen Emissionen zuerst soweit wie möglich vermeiden, bevor technische Bindung oder Kompensation greifen darf – das sogenannte „Mitigation Hierarchy“-Prinzip, das einen stufenweisen Ansatz verfolgt, bei dem Vermeidung und Reduktion von Emissionen Vorrang haben, bevor Wiederherstellungs- oder Kompensationsmaßnahmen ergriffen werden [40].

Der technologische Fortschritt erfordert zugleich eine Ausweitung der Verantwortung:

- Unternehmen müssen Klimastrategien entlang ihrer gesamten Wertschöpfungsketten umsetzen, inklusive Lieferanten und Kundennutzung (Scope 3: indirekte Emissionen von Lieferanten und durch die Produktnutzung).
- Politik definiert den Rahmen für Carbon Accounting, CO₂-Märkte und Transparenzpflichten.
- Gesellschaft und Individuen beeinflussen Nachfrage, Konsum und Akzeptanz neuer Materialien, Produkte und Mobilitätsformen.

So entsteht ein umfassender Ansatz, bei dem technologische Innovation, ökonomische Anreize und kultureller Wandel zusammenwirken.

Erwarteter Business Impact: Von der Emissionsreduktion zur Wertschöpfung mit CO₂

CCUS entwickelt sich in den kommenden Jahren zu einem zentralen Baustein der industriellen Transformation und damit zu einem strategischen Wettbewerbsfaktor in der globalen Wirtschaft.

Unternehmen, die glaubwürdig auf Netto-Null-Ziele hinarbeiten, profitieren von:

- Kostenreduktion durch Effizienz- und Materialoptimierung
- Zugang zu neuen Märkten (z. B. Carbon-Utilization, synthetische Kraftstoffe, Zertifikatehandel)
- Bessere Reputation bei Investoren, Partnern und Kunden
- Geringeres Risiko durch regulatorische Sicherheit und CO₂-Preisstabilität

Gleichzeitig verlangt die Entwicklung Transparenz und Nachweisbarkeit. Digitale Technologien – von KI-gestütztem Monitoring bis Blockchain-basierten Carbon-Credits – werden helfen, Fortschritte messbar zu machen.

Kohlenstoffmanagement ist damit kein Ersatz für Emissionsvermeidung, sondern ihr integraler Bestandteil. Der Trend verschiebt sich von technischer Abscheidung zu strategischer Verantwortung – von einzelnen Projekten zu einem kulturellen Wandel in Unternehmen und Gesellschaft.

Im Energiesektor ermöglicht CCUS die Dekarbonisierung fossiler Kraftwerke und die Produktion von blauem Wasserstoff, der als sauberer Energieträger in Industrie und Mobilität eingesetzt wird. Für energieintensive Branchen wie Zement, Stahl und Chemie ist CCUS unverzichtbar, da dort prozessbedingte Emissionen nicht allein durch erneuerbare Energien vermeidbar sind. Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ erlaubt diesen Sektoren, Klimavorgaben zu erfüllen und die Transformation zu klimaneutralen Produktionssystemen voranzutreiben [28, 41].

Im Mobilitätssektor eröffnet CCUS die Herstellung synthetischer Kraftstoffe (E-Fuels), die bestehende Infrastrukturen nutzen und Luft- sowie Schifffahrt klimafreundlicher machen. Zugleich verbessert die Verringerung von CO₂-Emissionen die Luftqualität und senkt Gesundheits- und Klimarisiken, was langfristig auch wirtschaftliche Vorteile bringt.

Ökonomisch entstehen neue Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle, etwa Carbon-as-a-Service (CCSaaS), bei dem spezialisierten Anbieter die CO₂-Abscheidung, den Transport und die Speicherung übernehmen. Darüber hinaus kann abgeschiedenes CO₂ als Rohstoff oder über zertifizierte Carbon Credits vermarktet werden. Laut McKinsey [41] kann CCUS bis 2050 bis zu 1,7 Gigatonnen CO₂ pro Jahr entfernen – ein entscheidender Beitrag zu den globalen Klimazielen. Gartner [42] betont, dass ein Net-Zero-Energiesystem ohne CCUS nicht realisierbar ist: Die Technologiegruppe sei derzeit die einzige Lösung, die sowohl direkte Industrieemissionen reduziert als auch schwer vermeidbare Emissionen kompensiert.

Politisch gilt CCUS zunehmend als strategische Infrastruktur. Die EU-Verordnung zur Nullverschmutzung (Net-Zero Pollution Regulation) und der europäische Net-Zero Industry Act erkennen CCUS als Schlüsseltechnologie an. Bis 2030 sollen mindestens 50 Mio. Tonnen CO₂ jährlich sicher und dauerhaft gespeichert werden – ein Impuls für den Aufbau eines europäischen Markts für CO₂-Speicherlösungen [36].

Zusammenfassend ist CCUS weit mehr als eine Klimaschutzmaßnahme – es schafft neue Märkte, Geschäftsmodelle und Investitionsfelder. Die Kombination aus technologischem Fortschritt, politischer Förderung und industrieller Nachfrage macht CCUS zu einem zentralen Hebel der globalen Dekarbonisierung – von der Emission zur Ressource.

Nicht die Maschine allein rettet das Klima, sondern das Zusammenspiel von Technologie, Management, Politik und Verhalten. CCUS ist ein wichtiger Baustein – aber nur wirksam, wenn er von einer umfassenden Transformationslogik getragen wird.

SZENARIO 2035: Kaffeepause im Zeitalter der Perfektion

Nach mehreren Angriffen auf europäische Energie- und Klimadaten arbeiten Städte nur noch in gesicherten Netzwerken. Nachhaltigkeit ist zur neuen geopolitischen Währung geworden, sie gilt als präzise berechenbare Größe. Städte werden von Digitalen Zwillingen gesteuert, CO₂-Emissionen in Echtzeit gehandelt, und selbst die Architektur produziert Energie. Nur eines bleibt schwer messbar: das Gefühl, in einer optimierten Welt zu leben.

MÜNCHEN, SMART CITY QUARTIER SÜD

PROTAGONISTEN



MARA, 34, Umwelttechnikerin im städtischen Klimainnovationszentrum



TIMO, 36, Berater für Energie- und CO₂-Systeme

Ein sonniger Nachmittag im Sommer 2035. MARA und TIMO treffen sich in einem Café, dessen Glasfassade aus selbstheilenden Metamaterialien besteht – sie filtert Lärm, produziert Strom und reguliert das Raumklima automatisch.

MARA

„Kaum zu glauben, wie leise die Stadt geworden ist. Früher hätte man hier den Verkehr noch durch die Wände gehört.“

TIMO

„Metamaterialien – leicht, selbstheilend, energieerzeugend. Nur schade, dass man sie nicht öffnen kann. Fenster sind inzwischen reine Simulation.“

MARA

„Ich vermisse manchmal den echten Wind. Aber hey – unser Quartier hat heute die erste Megatonne CO₂ gespeichert. Tokenisiert, zertifiziert und im städtischen Blockchain-Register abgelegt.“

TIMO

„Und direkt gehandelt. Willkommen im Zeitalter der Negativemissionen. Ohne Blockchain-Verifizierung glaubt dir ja keiner mehr, dass du wirklich etwas tust. Und die Blockchain läuft jetzt über das europäische Sicherheitsnetz – nach den Sabotageversuchen an den CO₂-Registern wollte niemand mehr nationale Lösungen.“

MARA

„Ich hab heute früh den Digital Twin der Stadt aufgerufen. Mit der AR-Brille sieht man an jeder Kreuzung die Luftqualität – in Echtzeit, farbcodiert. Beeindruckend ... und irgendwie beängstigend.“

TIMO

„Gestern hab ich die neue VR-Simulation getestet. Klimaszenarien für 2040 – die KI berechnet alles: Emissionen, Biodiversität, soziale Folgen. Aber weißt du, was fehlt?“

MARA

„Was denn?“

TIMO

„Das Gefühl. Wir optimieren die Welt – aber wir spüren sie kaum noch.“

MARA lächelt müde. Draußen fliegt eine Drohne vorbei und projiziert auf die Hauswand:

„Zero Carbon achieved – gemeinsam für unsere Zukunft.“

Sie nippt an ihrem Kaffee, der aus einem Labor-Klon ihrer Lieblingsbohne stammt. Perfekt im Geschmack. Und völlig reizlos.

2035 – Wir handeln mit CO₂, verteidigen Daten – und nennen es Frieden. Die Welt ist messbarer geworden. Nur Sinn und Sehnsucht entziehen sich jeder Optimierung.

TREND #5: Mensch-Maschine-Zusammenarbeit

Definition: Was ist Mensch-Maschine-Interaktion?

Menschliche Zusammenarbeit ist ein wesentlicher Bestandteil wissensintensiver Arbeit und wird seit langem in der Wirtschaftsinformatik analysiert und gestaltet. Kollaboration, als Form der menschlichen Zusammenarbeit, beschreibt die gemeinsame Arbeit von mindestens zwei Personen an einem Material, das auf ein gemeinsames Ziel ausgerichtet ist. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Kommunikation, Koordination und Kooperation erforderlich.

Zunehmend wird die menschliche Zusammenarbeit durch die Mensch-Maschine-Kollaboration (engl. Human Computer Interaction (HCI)) erweitert, bei der nicht-menschliche Agenten als autonome Partner agieren, was zu neuen Arbeits- und Kollaborationsszenarien führt. Dieser Paradigmenwechsel bringt vielfältige sozio-technische Herausforderungen mit sich, die von konkreten Anwendungen für Mensch-Maschine-Konstellationen bis hin zur Weiterentwicklung der Methoden der Kollaborationsforschung reichen. [43]

Der Trend: Interaktionen auf Effizienz und Vertrauen optimieren

Die fortschreitende Digitalisierung und die zunehmende Komplexität von Mensch-Computer-Systemen stellen neue Anforderungen an die Interaktionsgestaltung. Schlüsseltechnologien wie Verhaltensbiometrie, intelligente agentenbasierte Systeme und Edge Computing spielen eine zentrale Rolle bei der Bewältigung von Herausforderungen in den Bereichen Adaptivität, Echtzeit-Reaktionsfähigkeit, Kosten, Datenschutz, Sicherheit, immersive Nutzererfahrung, Portabilität und Energieeffizienz.

Die zukünftige Gestaltung von HCI-Systemen erfordert kontinuierliche Innovationen in den Bereichen KI, Machine Learning (ML), Quantencomputing und energieeffiziente Architekturen. Diese Technologien ermöglichen die Entwicklung personalisierter, sicherer und nachhaltiger Interaktionslösungen für verschiedenste Branchen. Insbesondere die Fortschritte in KI und ML tragen zur Weiterentwicklung adaptiver HCI-Frameworks bei. Trainingsprozesse und Fehlerdiagnosen werden zunehmend durch immersive Umgebungen unterstützt, die Echtzeit-Interventionen in komplexen Szenarien ermöglichen. Bedienende können Herausforderungen direkt erleben und darauf reagieren, während die Systeme ihre Entscheidungslogik durch Reinforcement Learning kontinuierlich verbessern. [44]

In der technologischen Entwicklung des Zukunftstrends [44] sind vor allem drei zentrale Elemente von erheblicher Relevanz, die im Folgenden erläutert werden:

- **Vertrauen durch Transparenz:** Ein zentrales Element für die Akzeptanz intelligenter Systeme ist das Vertrauen der Nutzer*innen. Erklärbare KI (XAI) bietet hier einen vielversprechenden Ansatz, indem sie Entscheidungsprozesse transparent macht und somit das Vertrauen in automatisierte Systeme stärkt. Darüber hinaus unterstützt Generative KI die Entwicklung mehrsprachiger und kontextsensitiver Schnittstellen, die eine barrierefreie Kommunikation für diverse Nutzergruppen ermöglichen.

- Kognitive und emotionale Anpassung: Die Integration von kognitivem Computing, Emotionserkennung und physiologischer Sensorik erlaubt eine dynamische Anpassung der Systeme an den mentalen Zustand und das Stresslevel der Nutzer*innen. Dies führt zu einer höheren Entscheidungsgenauigkeit und reduziert Fehler insbesondere in leistungsintensiven und sicherheitskritischen Umgebungen.
- Governance und Ethik-by-Design: Ein zentrales Element für die Akzeptanz intelligenter Systeme ist das Vertrauen der Nutzer*innen. XAI bietet hier einen vielversprechenden Ansatz, indem sie Entscheidungsprozesse transparent macht und somit das Vertrauen in automatisierte Systeme stärkt [45]. Governance-Plattformen ermöglichen die Integration von „Ethik-by-Design“, indem sie bereits im Entwicklungsprozess ethische Prinzipien wie Fairness, Nicht-Diskriminierung und Datenschutz berücksichtigen [46].

Tabelle 2 zeigt die Entwicklungsetappen und Einsatzperspektiven der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine im Zusammenspiel mit Künstlicher Intelligenz, Vertrauen und für Menschen „natürliche“ Interaktionen.

Zeithorizont	Fokusbereiche	Einsatzperspektive	Schlagwort
Kurzfristig (< 5 Jahre)	Adaptive, KI-gestützte Interaktion	Echtzeit-Anpassung und Effizienz	Adaptive Intelligence
Mittelfristig (5–10 Jahre)	Vertrauenswürdige und erklärbare Systeme	Transparenz und Governance	Trustworthy AI
Langfristig (> 10 Jahre)	Emotionale und kognitive Schnittstellen	Empathische, natürliche Interaktion	Emotive Computing

Tabelle 2: Entwicklungsetappen der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine. (Eigene Darstellung)

Erwarteter Business Impact: Mensch im Mittelpunkt, Maschine als Enabler

Die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine bleibt ständig im Wandel. So wie sich zu Beginn der Industrialisierung der Mensch nach der Maschine gerichtet hat, ist zu erwarten, dass sich dieses Verhältnis wendet: Der Wert des Menschen verschiebt sich – von der Ausführung zur Ideenfindung, von der Wiederholungsarbeit zur Empathie, von der Arbeit zur Führung. Diese Entwicklung ist bekannt unter dem Begriff Industrie 5.0. Sie steht für einen grundlegenden Wandel in der Beziehung zwischen Mensch und Technologie im Produktionsumfeld. Im Gegensatz zur Industrie 4.0, die den Fokus auf Automatisierung, Datenverarbeitung und maschinelle Effizienz aus technikzentrierter Perspektive legte, rückt Industrie 5.0 den Menschen wieder in den Mittelpunkt von Innovation und Wertschöpfung.

Ziel ist eine neue Partnerschaft zwischen intelligenten Maschinen und menschlicher Kreativität, die nicht nur die Produktivität steigert, sondern auch aktiv zur ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit beiträgt. Industrie 5.0 erkennt die Notwendigkeit, technologische Fortschritte mit ethischen, sozialen und ökologischen Werten zu verbinden – und ebnet damit den Weg für eine zukunftsfähige, resiliente und menschenzentrierte Industrie.

Vor allem folgende konkrete Anwendungen im HCI-Bereich [44, 47, 48] können einen erheblichen Einfluss auf die jeweiligen Bereiche haben, da sie eine weitreichende Entwicklung in u. a. Adaptivität, Sicherheit und UX mit sich bringen:

- Verhaltensbiometrie für Cybersecurity, Betrugserkennung und Zugriffskontrollen
- Intelligente Agent-basierte HCI für interaktive Systeme, personenorientiertem Lernen sowie Automation
- Edge Computing für Echtzeit-Anpassungen in der industriellen Steuerung sowie für IoT und Smart-City-Projekte
- Governance-Frameworks zur Sicherstellung von Compliance, ethischer Verantwortung und Risikomanagement
- Regulatorisch konforme HCI-Systeme als Wettbewerbsvorteil in regulierten Märkten (z. B. Gesundheitswesen, Finanzsektor)

TREND #6: Metamaterialien

Definition: Das sind Metamaterialien

Metamaterialien sind künstlich entwickelte Werkstoffe, deren innere Strukturen auf Mikro- und Nanoskala präzise in drei Dimensionen gestaltet werden, um außergewöhnliche physikalische Eigenschaften zu erzeugen, die in natürlichen Materialien nicht vorkommen [49]. Durch diese gezielte Strukturierung lassen sich Licht, Schall, Wärme oder mechanischer Druck auf neuartige Weise beeinflussen und steuern.

Da ihre Eigenschaften nicht allein durch chemische Zusammensetzung, sondern vor allem durch ihre geometrische Struktur bestimmt werden, eröffnen Metamaterialien völlig neue Möglichkeiten in der Werkstofftechnik [50]. Sie können ultraleicht und gleichzeitig extrem stabil, hoch elastisch oder thermisch isolierend sein. Damit eignen sie sich besonders für Anwendungen in den Bereichen Mobilität, Luft- und Raumfahrt, Energie und Bauwesen, wo Vibrationsdämpfung, Geräuschreduktion und Wärmemanagement von zentraler Bedeutung sind [51].

Allerdings befindet sich die Entwicklung bislang noch im experimentellen Stadium. Viele der beschriebenen Eigenschaften sind bisher überwiegend im Labor nachgewiesen, ihre Übertragung in industrielle Maßstäbe bleibt technisch wie wirtschaftlich herausfordernd. Der Schritt von der Grundlagenforschung zur praxisnahen Anwendung wird voraussichtlich noch Zeit benötigen.

Der Trend: Vom Labor in die Praxis

Die Ursprünge der Metamaterialforschung reichen in die 1960er-Jahre zurück, als erstmals theoretische Modelle zu Materialien mit „negativem Brechungsindex“ veröffentlicht wurden [52].

Metamaterialien als Ersatz für Seltene Erden?

Seltene Erden sind zentrale Rohstoffe für Hochleistungsmagnete, Katalysatoren und Elektronik. China dominiert mit über 65 % Anteil (Stand 2024) den weltweiten Markt [118]. Diese geopolitische Abhängigkeit hat das Interesse an Metamaterialien als potenzielle Ersatzstoffe verstärkt. Forschende der Universitäten Leeds und Cambridge konnten durch gezielte molekulare Strukturierung magnetische Ersatzmaterialien entwickeln, etwa Kobalt-Kohlenstoff-Hybride oder das meteoriten-ähnliche Tetrataenit [119, 120].

Den praktischen Durchbruch ermöglichten jedoch erst moderne Nanofabrikationstechnologien um die Jahrtausendwende, als Forschende erstmals Mikrostrukturen herstellen konnten, die elektromagnetische Wellen gezielt beugen und dämpfen [53].

Seit den 2010er-Jahren hat sich die Entwicklung rasant beschleunigt: Fortschritte in 3D-Druck, Lithographie und Simulation führten zu einer breiten Palette elektromagnetischer, akustischer und mechanischer Metamaterialien. Forschungsinstitute wie das ILEK an der Universität Stuttgart arbeiten an adaptiven Strukturen und Materialsystemen für nachhaltige Bauwerke, während das Karlsruher

Institut für Technologie (KIT) neuartige mechanische Metamaterialien mit besonders hoher elastischer Energiedichte für die Fahrzeugtechnik, Robotik oder den Energiesektor entwickelt [54].

Gleichzeitig bleibt die industrielle Umsetzung eine der größten Herausforderungen. Die Übertragung der im Labor erzielten Eigenschaften auf großskalige Fertigungsprozesse ist bislang technisch und wirtschaftlich schwierig. Auch wenn erste Pilotanwendungen existieren, ist der Schritt zur breiten industriellen Nutzung noch nicht gelungen. Der erwartete „Sprung in die Praxis“ dürfte daher langsamer erfolgen, als vielfach prognostiziert.

In der mittelfristigen Perspektive werden Fortschritte in additiver Fertigung und KI-gestütztem Materialdesign entscheidend. Diese Technologien ermöglichen es, metamaterielle Strukturen zu simulieren, zu optimieren und künftig skalierbar herzustellen [12]. In der Automobilindustrie könnten akustische und mechanische Metamaterialien Gewicht reduzieren und Geräusche dämpfen; in der Energiebranche erhöhen metamaterielle Oberflächen die Effizienz von Photovoltaik- und Wärmetauschsystemen [55, 56].

Langfristig wird sich der Trend zu multifunktionalen, selbstadaptiven Materialien verstärken. Bis 2035 könnten Metamaterialien als strategische Basistechnologie etabliert sein – vergleichbar mit der Rolle von Halbleitern in den 1980er-Jahren [57]. Voraussetzung ist jedoch, dass Fertigung, Standardisierung und Nachhaltigkeit parallel weiterentwickelt werden.

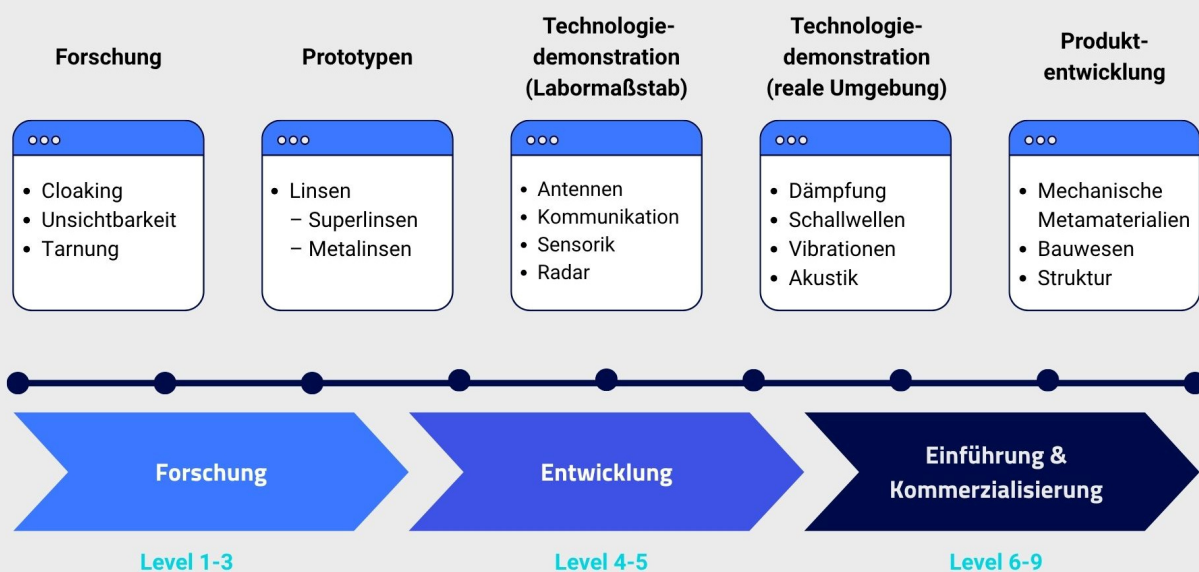


Abbildung 7: Technologiereifegrade von Metamaterialien 2025. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [54, 55])

Abbildung 7 zeigt den aktuellen Entwicklungsstand von Metamaterialien – von Grundlagenforschung (Technology Readiness Level (TRL) 1–3) über experimentelle Demonstrationen (TRL 4–5) bis hin zur Kommerzialisierung (TRL 6–9). Sie macht deutlich, dass sich die Technologie derzeit in der Übergangsphase zwischen Entwicklung und industrieller Einführung befindet. Die Abbildung veranschaulicht, dass sich Metamaterialien derzeit (2025) noch überwiegend in der Phase zwischen Forschung und Technologie-Demonstration befinden. Entsprechend konzentriert sich der wirtschaftliche Impact bislang auf Pilotanwendungen und frühe Marktsegmente, deren Potenzial sich in den kommenden Jahren weiter entfalten dürfte.

Erwarteter Business Impact: Der wirtschaftliche Impact von Metamaterialien

Metamaterialien stehen an der Schwelle zur industriellen Anwendung und könnten Geschäftsmodelle in mehreren Branchen grundlegend verändern. Der globale Markt wächst rasant, bleibt aber gemessen am technologischen Reifegrad noch in einer frühen Phase. Für Europa wird der Marktanteil auf rund 30 % des weltweiten Umsatzes geschätzt mit einem Volumen von rund 184 Mio. USD im Jahr 2024 und einem erwarteten Wachstum von 30–32 % p. a. bis 2032. [58]

In der Produktion ermöglichen Metamaterialien leichtere und zugleich festere Bauteile – etwa Rahmen, Greifarme oder Werkzeughalter. Das reduziert Materialeinsatz, Energieverbrauch und Transportkosten und unterstützt damit die Dekarbonisierung industrieller Prozesse. [55]

In der Mobilität bieten Metamaterialien Vorteile durch Energieabsorption und gezielte Rückgabe mechanischer Energie. Anwendungen finden sich in Crashzonen, Stoßdämpfern oder akustischen Dämpfungssystemen – insbesondere bei Elektro- und autonomen Fahrzeugen, wo Gewichtseinsparung und Sicherheit zentral sind.

In der Medizintechnik ermöglichen Metamaterialien neuartige Implantate und Geräte, die sich flexibel an Körpergeometrien anpassen und gleichzeitig stabil und biokompatibel bleiben – ein wichtiger Schritt hin zu personalisierten und adaptiven Medizinprodukten.

Auch der Energie- und Infrastruktursektor profitiert: Metamaterialien könnten als mechanische Energiespeicher, Vibrationsdämpfer oder Stabilisierungselemente in Bauwerken eingesetzt werden und so die Effizienz und Lebensdauer von Systemen erhöhen.

Gleichzeitig ist zu beachten, dass viele dieser Anwendungen noch auf Pilot- oder Demonstrationsebene stehen. Der Sprung in die Serienfertigung erfordert kosteneffiziente Produktionsprozesse, Standardisierung und Recyclingstrategien. Der wirtschaftliche Durchbruch dürfte somit erst mit zunehmender industrieller Reife erfolgen.

Insgesamt zeigt sich: Metamaterialien sind mehr als ein Laborphänomen. Sie entwickeln sich zu einem potenziellen Wachstumstreiber, der neue Geschäftsmodelle wie „Materials-as-a-Service“, adaptive Systeme und multifunktionale Produktklassen ermöglicht.

SZENARIO 2040: Zwischen Kopie und Kontrolle



Im Jahr 2040 ist das digitale Selbst längst Realität. Menschen interagieren täglich mit ihren Avataren, neurotechnische Schnittstellen sind so selbstverständlich wie Smartphones einst. Doch wo endet Unterstützung – und wo beginnt Kontrolle? In einer Welt, in der Staaten und Konzerne um Datenhoheit ringen, wird Bewusstsein zur letzten umkämpften Ressource.

Ich bin Emma, 39, Professorin für Mensch-Maschine-Ethik an der Universität Stuttgart-Flex. Es ist Dienstag, 07:26 Uhr. Mein Avatar sitzt bereits am Frühstückstisch. „Du hast Brot vergessen“, sagt er – mit meinem Gesicht, aber perfekter Frisur. Ich ignoriere ihn. Er ist effizient, charmant, analytisch – und irgendwie unheimlich.

Ich aktiviere meinen NeuroLink Light. Der Kalender schiebt sich in mein Sichtfeld. Heute: Hybridseminar. Teilnehmende in Realzeit und im immersiven XR-Raum. Ich frühstücke allein – zumindest körperlich. Der Avatar meiner Schwester schaltet sich für einen kurzen Morgengruß zu. Sie ist mit den Kindern im EU-Ausland. Es fühlt sich fast wie Nähe an.

Seminarbeginn: „Ethik der digitalen Person“.

25 Studierende, 25 Avatare. Manche foto-realistisch, andere verspielt – ein Fuchs, ein Samurai, ein leuchtender Würfel. Ich trage meine XR-Brille. Neben mir: Luca, mein KI-Co-Dozent. Er analysiert in Echtzeit die neuronalen Reaktionen der Studierenden, passt meine Fragen an, schlägt Pausen vor, wenn mein Puls steigt. Ich frage mich, wer hier eigentlich wen unterrichtet.

Thema heute: Bewusstseinskopien. Zwei Studierende berichten, dass sie regelmäßig ein Gedächtnis-Backup in der staatlichen CoreState-Kette ablegen. Seit die EU-

Verteidigungsagentur die Kette überwacht, heißt Datenschutz vor allem: Vertrauen auf staatliche Algorithmen. „Falls ich sterbe“, sagt eine, „will ich nicht ganz weg sein.“ Ich frage: „Und was unterscheidet Sie dann noch von Ihrem digitalen Zwilling?“ Einer antwortet: „Der Zwilling macht keine Fehler.“ Ich lache. Niemand sonst.

Mittagessen mit meinem Vater im Allgäu. Er lebt außerhalb der NeuroCloud. Kein Interface, kein Avatar. Nur Stall, Thermoskanne, Zeitung.

„Emma“, sagt er, „die wollen jetzt Gedankenprofile speichern, um Arbeitsunfähigkeit vorherzusagen. Und du nennst das Ethik?“

Ich seufze. „Ich sage: Wir müssen es verhandeln. Sonst geschieht es ohne uns.“ Er reicht mir Apfelsaft. „Menschsein ist kein Upgrade“, sagt er. Ich nicke.

Abends. Zurück in meiner Wohnung. Mein digitaler Zwilling möchte Feedback zu meiner „Lehrperformance“. Ich schalte ihn stumm. Stattdessen lese ich einen alten Brief – aus Papier. Von Letizia. Sie starb vor drei Jahren. Ihr CoreState wurde reaktiviert. Sie lebt weiter – als kognitiv kohärenter, sozial abrufbarer Avatar. Ich habe sie nie besucht.

Denn ich weiß: Der digitale Zwilling kann alles – außer wirklich fehlen.

2040 – Der Mensch hat sich vervielfacht, um sich zu sichern und dabei fast verloren.

TREND #7: Künstliche Intelligenz

Definition: Was wir unter Künstlicher Intelligenz verstehen

Unter Künstlicher Intelligenz verstehen wir Systeme, die möglichst eigenständig Aufgaben lösen, indem sie in einer bestimmten Situation die beste mögliche Aktion wählen [59, p. 34]. Eine einheitliche Definition existiert bislang nicht [59, p. 1]. Welche Fähigkeiten ein solches System benötigt, das möglichst eigenständig Aufgaben lösen soll, hängt davon ab, in welchem Umfeld es sich befindet.

Da mittlerweile tausende von KI-Tools verfügbar sind, bieten wir im Folgenden eine Kategorisierung an, die hilft, unterschiedliche KI-Systeme einzuordnen und die Möglichkeiten von KI-Systemen einzuschätzen. Diese Klassifikation in vier Kategorien ergibt sich aus den beiden zentralen Eigenschaften von KI-Systemen, die polarisierend auf zwei Achsen gegeneinander aufgetragen werden (Abbildung 8): Dabei steht die Y-Achse für den Grad der Selbstständigkeit bei Entscheidungen – von Stufe 1 rein assistierend bis Stufe 5 vollautonom. Die X-Achse beschreibt die Anzahl der möglichen Umgebungen (Einsatzgebiete im Sinne von Komplexität und Dynamik des Einsatzkontextes), in denen das System operieren kann – von Stufe 1 „eine Umgebung“ bis hin zu „alle Umgebungen“ auf menschlichem Niveau (Stufe 5).

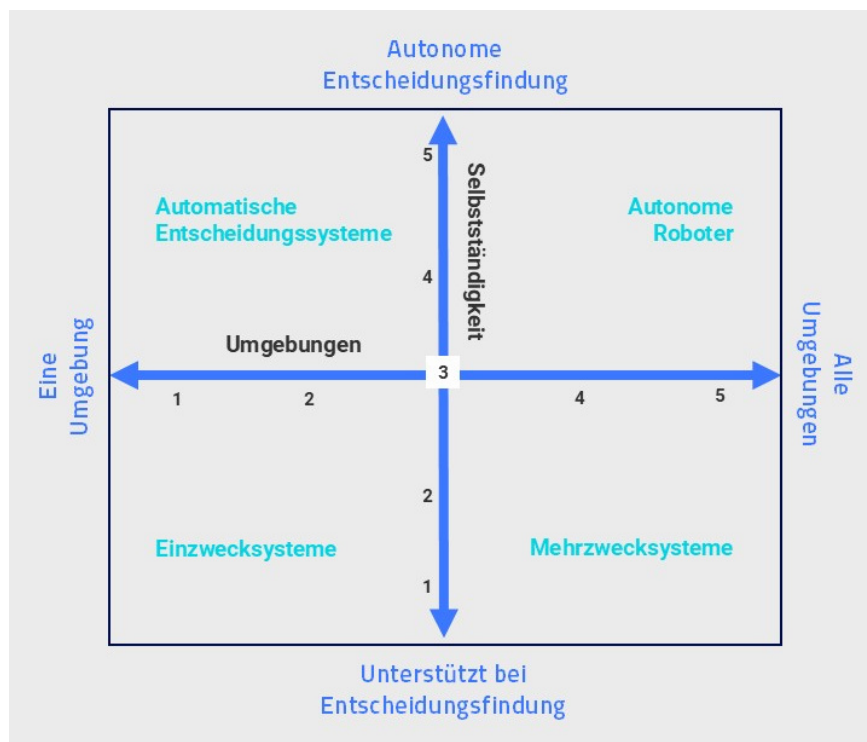


Abbildung 8: Kategorisierung von KI-Systemen auf der Basis von Umgebungen und Selbstständigkeit. [60, p. 33]

Daraus ergeben sich vier Kategorien: Einzwecksysteme, die auf eine Aufgabe spezialisiert sind und Menschen unterstützen, automatische Entscheidungssysteme, die Menschen Entscheidungen in spezifischen Situationen und Umgebungen abnehmen, Autonome Roboter, die selbstständig und in unterschiedlichen Umgebungen Entscheidungen treffen können sowie Mehrzwecksysteme, die Menschen unterstützen und für viele Zwecke eingesetzt werden.

Vor diesem Hintergrund betrachten wir nun genauer, welche Trends sich derzeit bei KI-Systemen abzeichnen, welche Anwendungen bereits Realität sind – und welche Auswirkungen diese Technologien auf Wirtschaft, Gesellschaft und Regulierung haben könnten.

Der Trend: Autonome und planende Künstliche Intelligenz

Heute dominieren spezialisierte Systeme aus den beiden linken Quadranten (siehe Abbildung 8). Doch die Entwicklung bewegt sich in Richtung größerer Vielseitigkeit und Autonomie, also von den beiden linken hin zu den beiden rechten Quadranten. Wir sehen vier zentrale Linien [60, p. 195]:

- eine weitere Zunahme spezialisierter Systeme mit hoher Effizienz in engen Aufgabenbereichen
- vielseitigere Systeme, die in unterschiedlichen Umgebungen nutzbar sind
- verkörperte KI-Systeme (Roboter) in unterschiedlichen Bereichen von Pflege bis Raumfahrt
- mehr Autonomie von KI-Systemen insbesondere bei Fahrzeugen und in Notfällen

Diese Entwicklungen eröffnen Chancen für Innovationen, bergen aber auch ethische und sicherheitspolitische Risiken – etwa bei autonomen Waffensystemen, die aktuell diskutiert werden [61].

Während Systeme der allgemeinen Künstliche Intelligenz (Artificial General Intelligence, AGI) auf menschlichem Niveau (Stufe 5 bei den Umgebungen) in den kommenden Jahren als unwahrscheinlich gelten, erscheinen weitere Annäherungen an AGI als realistisch [4]. Diese Entwicklung wird von fünf Schlüsseltechnologien geprägt:

- Large Action Models (LAMs): verbinden Sprachverstehen mit Handlungsfähigkeit [62]
- Multimodale KI: Verarbeitung von Sprache, Text und Bild, Einsatz in Echtzeitinteraktion, Medizin, Industrie oder Forschung [4]
- Edge AI: Ausführung direkt auf lokalen Geräten für Datenschutz, Latenz und Resilienz [12]
- Kausale KI: Ursache-Wirkung statt Korrelationen, derzeit noch experimentell [63]
- Agentische Modularität: Koordination spezialisierter Subagenten – analog zu Teamarbeit [4]

LAMs gelten als Treiber der Entwicklung: Die Fähigkeit von KI-Agenten, Aufgaben zu lösen, deren Bearbeitung durch einen Menschen mehrere Minuten oder Stunden in Anspruch nimmt, verdoppelt sich aktuell etwa alle sieben Monate. Dieser sogenannte „Time Horizon“ beschreibt den Zeitraum, über den ein Agent mit mindestens 50 % Erfolgswahrscheinlichkeit autonom planen und handeln kann [64]. Während KI-Agenten heute zuverlässig Aufgaben mit einer Komplexität von 30–60 Minuten lösen, dürfte ihr Planungshorizont bis 2029 auf Wochen- und bis Anfang der 2030er-Jahre auf Monatsprojekte anwachsen, sofern der aktuelle Entwicklungspfad anhält [65, 64]. Denn trotz aller Fortschritte erkennen heutige Agenten Korrelationen in Daten, aber sie verstehen nicht, warum etwas passiert – und wie eine Handlung eine andere beeinflusst. Sie simulieren also Intelligenz nur: Ihnen fehlt die Fähigkeit, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge explizit zu modellieren.

„Bis Maschinen lernen, kausal zu denken, wird es keine echte Intelligenz geben.“ [63] Doch genau diese Fähigkeit ist zentral, wenn Agenten verlässlich, adaptiv und erklärbar handeln sollen. Sie müssen verstehen können, was passiert, wenn sie eine bestimmte Entscheidung treffen [63, 66]. Denn eine 50 %-Erfolgsquote bedeutet: Jede zweite Aufgabe schlägt fehl [64]. Wir sehen in kausalen Modellen die entscheidende Voraussetzung für autonome, generalisierende und robuste KI-Agenten. Nach aktueller Einschätzung liegt die Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit robuster, kausaler Modelle bis 2030 bei etwa 50%, erst ab 2035 ist eine hohe Wahrscheinlichkeit (> 70 %) realistisch [67].

Der Fortschritt ist real, aber noch nicht ausreichend. Ob KI-Agenten wirklich autonom und verlässlich handeln können, hängt maßgeblich davon ab, ob – und wie schnell – robuste kausale Modelle entwickelt werden.

Erwarteter Business Impact: Große Produktivitätssteigerung

Autonome und planende KI-Systeme werden Arbeitsabläufe, Wertschöpfung und Geschäftsmodelle in vielen Branchen nachhaltig verändern. Besonders relevant sind Systeme mit mittlerem bis hohem Autonomiegrad (Stufen 3-4) und wachsender Umgebungsvielfalt – etwa adaptive Copiloten, autonome Subsysteme oder agentische Assistenzlösungen.

Die größten Effekte sind in wissensintensiven Bereichen zu erwarten. McKinsey prognostiziert Produktivitätssteigerungen von bis zu 40 % durch KI-gestützte Automatisierung in Bereichen wie Kundeninteraktion, Produktion oder Wissensarbeit [68]. Solche Gewinne ergeben sich durch automatisierte Entscheidungsprozesse, reduzierte Reibungsverluste und effizientere Abläufe.

Darüber hinaus entstehen neue Geschäftsmodelle wie „Robotics-as-a-Service“ oder autonome Infrastruktursteuerung. Dabei verändert sich auch die menschliche Rolle: Der Mensch wird zunehmend zum Piloten, der kontextuell steuert, während KI-Systeme als Copiloten operative Aufgaben übernehmen – ein Rollenwandel, den Gartner als „Shift from Operator to Orchestrator“ beschreibt [6].

In Bezug auf Governance steigen mit zunehmender Autonomie der KI-Systeme die Anforderungen an Transparenz, Eingreifbarkeit und Verantwortung. Besonders in sensiblen Bereichen (z. B. Gesundheit, Verwaltung) ist eine Human-in-the-loop-Strategie notwendig, um Entscheidungen nachvollziehbar und ethisch vertretbar zu halten [69].

Allgemeine Künstliche Intelligenz auf menschlichem Niveau bleibt in den nächsten zehn Jahren unrealistisch. Hindernisse sind das fehlende kausale Weltverständnis, mangelnde Robustheit in offenen Kontexten und ungelöste regulatorische Fragen [70, 4]. Realistisch dagegen ist der breite Einsatz hochentwickelter Copiloten und autonomer Agenten auf Stufe 4 (siehe Abbildung 8), die Unternehmensprozesse deutlich verändern.

TREND #8: Biotechnologie

Definition: Die programmierbare Basis des Lebens

Biotechnologie bezeichnet die gezielte Nutzung biologischer Systeme, Organismen oder ihrer Bestandteile zur Entwicklung neuer Produkte und Prozesse – von traditionellen Anwendungen wie der Brotherstellung bis hin zu modernen Innovationen in Medizin, Landwirtschaft, Industrie und Umwelt. Die moderne Biotechnologie ist eine eindrucksvolle Verschmelzung von Genetik, Molekularbiologie, Bioinformatik und Automatisierung, die es ermöglicht, biologische Funktionen präzise zu analysieren, zu verändern oder synthetisch neu zu gestalten. Zunehmend werden dabei biologische Systeme auch digital vernetzt – ein Trend, der als Internet of BioThings bezeichnet wird und die Verbindung biologischer Prozesse mit Daten- und Netztechnologien beschreibt. Wir stehen am Beginn einer Ära, in der das Leben selbst programmierbar wird.

Der Trend: Von der Entdeckung zur Steuerung biologischer Systeme

Die Biotechnologie befindet sich derzeit im Umbruch. Durch bahnbrechende Technologien werden biologische Systeme zunehmend systematisch steuerbar:

- CRISPR/Cas-Systeme erlauben präzise Genom-Editierung, um genetische Defekte zu korrigieren oder Pflanzenmerkmale gezielt zu optimieren. Die mRNA-Technologie – bekannt durch die COVID-19-Impfstoffe – bietet eine flexible Plattform zur schnellen Entwicklung von Impfstoffen und Therapeutika. Die synthetische Biologie ermöglicht es, biologische Funktionen neu zu entwerfen und genetisch kodierte Organismen maßgeschneidert zu erzeugen [71].
- Parallel dazu beschleunigt Künstliche Intelligenz (KI) diesen Wandel deutlich. KI-basierte Modelle wie AlphaFold erlauben hochpräzise Proteinstrukturvorhersagen, die für die Wirkstoffentwicklung essenziell sind. Darüber hinaus analysieren KI-Systeme Multi-Omics-Daten (Genomik, Proteomik, Metabolomik), simulieren molekulare Prozesse und optimieren Therapiestrategien. Dieser simulations- und datengetriebene Ansatz ergänzt klassische Laborarbeit und kann Entwicklungszeiten und -kosten drastisch senken.
- Außerdem schreitet die Industrialisierung von Biologie voran: Biofoundries und zellbasierte Produktionssysteme werden zu effizienten Fabriken für Enzyme, Bioplastik, Biokraftstoffe oder alternative Proteine. Genomische Diagnostik ermöglicht zunehmend personalisierte Therapien. Biotechnologie etabliert sich damit als zentrale Plattformtechnologie für nachhaltige, resiliente Wirtschaftsmodelle [72].

Aktuelle Schlüsseltrends

1. Gentherapie-Durchbrüche:

Gentherapien nutzen präzise Gen-Editierung, um bislang unheilbare Erbkrankheiten wie Beta-Thalassämie oder bestimmte Krebsarten zu behandeln – mit potenziellem einmaligem, kurativem Effekt. Erste klinische Studien zeigen bereits beeindruckende Ergebnisse [72].

2. Biomanufacturing-Innovationen:

Mikroorganismen dienen als Produktionsfabriken für Medikamente, Biomaterialien, alternative Proteine, Duftstoffe oder Biopestizide. Diese Ansätze ermöglichen klimafreundliche, ressourcenschonende Produktionsketten und verringern die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen [73].

3. Computational Biology & KI in der Therapeutikaentwicklung:

Die Kombination aus KI und computergestützter Biologie verändert die Arzneimittelforschung grundlegend. Multi-Omics-Daten werden genutzt, um Zielstrukturen zu identifizieren, Wirkstoffe „in silico“ zu testen und Therapien zu individualisieren. Unternehmen wie Recursion, Insitro oder Deep Genomics führen dies bereits erfolgreich durch und beschleunigen deutlich den Weg zur klinischen Anwendung [74].

4. Cell Communication und Internet of Biothings:

Die zelluläre Kommunikation ist die gezielte Steuerung von Signalprozessen zwischen Zellen. Sie ermöglicht neue Therapieansätze, z.B. in der Immunonkologie, wo Zellen programmiert werden, Tumoren präzise zu erkennen und zu bekämpfen [122]. Gleich-zeitig verknüpft das Internet of BioThings (IoB) biologische Systeme mit digitalen Netz-werken. Sensoren und KI-gestützte Plattformen überwachen und steuern biologische Prozesse in Echtzeit. Damit entsteht eine neue Form der vernetzten Biologie, in der Daten, Organismen und Geräte kontinuierlich interagieren.

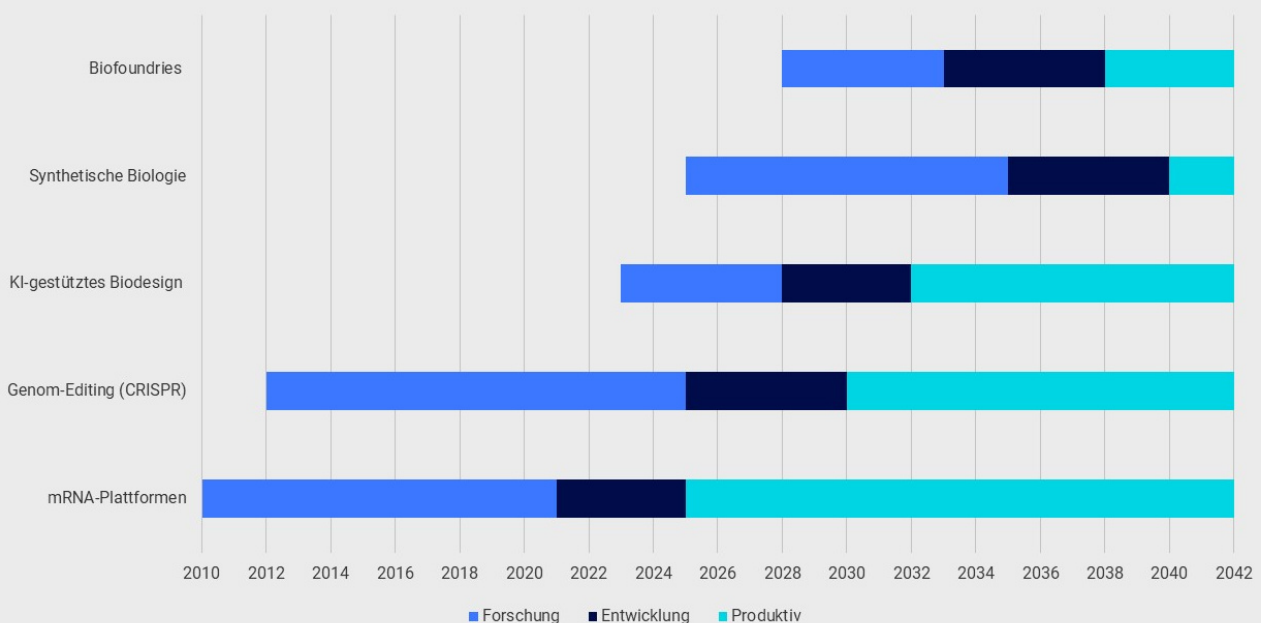


Abbildung 9: Technologische Entwicklungen in der Biotechnologie. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [72, 73, 74, 75])

Erwarteter Business Impact: Wie Biotechnologie Märkte und Modelle verändert

Die Biotechnologie wird zunehmend in nahezu allen Lebensbereichen relevant. In der Medizin ermöglichen personalisierte Immuntherapien, regenerative Methoden und Präzisionsdiagnostik neue Behandlungsoptionen. In der Landwirtschaft entstehen klimaresistente, nährstoffreiche Pflanzen, die den Einsatz von Pestiziden reduzieren. Die Industrie profitiert von CO₂-verwertenden Mikroorganismen und neuen biologischen Materialien. Umwelttechnische Ansätze, etwa Mikroben zur Boden- und Wasserreinigung oder Biosensoren zur Umweltüberwachung, werden zunehmend realisiert. Langfristig könnte Biotechnologie unsere Lebensweise nachhaltig beeinflussen: Von synthetischen Nahrungsmitteln über langlebige Bio-Materialien bis hin zu Enhancement-Technologien für Gesundheit und Leistung.

Biotechnologie wird als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts gesehen, mit hohem wirtschaftlichem Potenzial. McKinsey schätzt den direkten globalen wirtschaftlichen Nutzen zwischen 2 und 4 Billionen US-Dollar jährlich innerhalb der nächsten Dekade [72]. Wachstum wird vor allem in Bereichen wie Gesundheitswesen, Landwirtschaft, Verbrauchsgüter und Materialproduktion erwartet. Finanziert wird dieser Wandel durch:

- Öffentliche Fördermittel: EU-Initiativen wie Horizon Europe (2021–2027) [76] investieren Milliarden in Life Sciences und Biotech. Nationale Programme in Europa und international unterstützen Genetik, Bioinformatik und biobasierte Produktion.
- Private Finanzierung: Risikokapitalgeber und spezialisierte Biotech-Fonds treiben Start-ups wie Ginkgo Bioworks, Moderna oder Benchling voran. Pharmaunternehmen investieren zunehmend in Biofoundries und KI-basierte Pipelines zur Wirkstoffentwicklung.

Besonderes Interesse weckt die Integration mit KI, da sie Skaleneffekte ermöglicht und den Markteintritt beschleunigt – was Investoren und strategische Partner überzeugt.

Die wachsende Macht der Biotechnologie bringt auch ethische, soziale und sicherheitsrelevante Fragen mit sich. In *The Coming Wave* warnt Mustafa Suleyman eindringlich vor unkontrollierter Entwicklung:

- Dual-Use-Problematik: Technologien, die zur Heilung entwickelt wurden, könnten auch zur Entwicklung biologischer Waffen eingesetzt werden. Besonders bedenklich: die Demokratisierung solcher Werkzeuge [72].
- Biohacking und Biopiraterie: Dezentral nutzbare Technologie erhöht das Risiko unregulierter Experimente.
- Ethische Dilemmata: Eingriffe ins menschliche Erbgut, „Designerbabys“ oder Patente auf genetische Information stellen grundlegende moralische Fragen.
- Ungleichheit beim Zugang: Globale Disparitäten im Zugang könnten Ungleichheit verstärken.
- Regulatorische Herausforderungen: Der technologische Fortschritt verläuft oft schneller als die Gesetzgebung. Das Risiko: Innovationshemmung oder fehlende Kontrolle – was Suleyman eine mögliche „Biowelle“ ohne Governance nennt.

Biotechnologie entwickelt sich zur zentralen Gestaltungskraft des 21. Jahrhunderts – mit Potenzial zur Verbesserung von Gesundheit, Umwelt, Ernährung und Wirtschaft. Gleichzeitig ist diese Technologie mit tiefgreifenden Risiken verbunden, die verantwortungsvoll gesteuert werden müssen. Nur durch internationale Governance-Strukturen, ethische Standards, transparente Finanzierung und öffentlichen Diskurs kann sichergestellt werden, dass diese „programmierbare Welle des Lebens“ mehr Gutes als Gefahren bringt.

SZENARIO 2045: Ein gewöhnlicher Tag in der perfekten Zukunft

Zwei Jahrzehnte geopolitischer Spannungen haben zu einer Ära der Autarkie geführt. Energie, Daten und Sicherheit werden lokal erzeugt, global höchstens abgesichert. Technologien, die einst als Innovation galten, sind längst Infrastruktur. Der Alltag ist vernetzt, optimiert – und beinahe reibungslos. Nur selten stellen Menschen noch die Frage, ob Effizienz wirklich Fortschritt bedeutet.



Ort: Kopenhagen, Smart District Nord

Protagonistin: Nora Lund, 38, Nachhaltigkeitsberaterin und Mutter einer achtjährigen Tochter

Kopenhagen, 1. Oktober 2045 – Ein gewöhnlicher Mittwochmorgen. Nora erwacht unter einem simulierten Sonnenaufgang – projiziert direkt auf ihre Netzhaut durch AR-Kontaktlinsen. Ihr digitaler Assistent analysiert Vitaldaten, Schlafqualität und Tagesplanung. Das Frühstück wird algorithmisch angepasst: proteinreich, klimafreundlich, effizient.

Der Arbeitsweg erfolgt per autonomem Shuttle, emissionsfrei und geteilt mit zwei Nachbarn. Während der Fahrt nutzt Nora ihr neuronales Interface, um sich auf das erste Meeting vorzubereiten. Die Zusammenfassungen der KI sparen Zeit – und filtern Inhalte, die als „kognitiv störend“ markiert sind.

Im „GreenHub“, einem energieautarken Co-Working-Space, wird sie von einem humanoiden Roboter empfangen. Nach den Energieblockaden der 2030er-Jahre ist Autarkie Pflicht geworden, jedes Gebäude produziert und speichert seinen eigenen Strom, Notfallroutinen werden bereitgehalten. Ihr Arbeitsplatz wird auf Basis ihrer mentalen Verfassung zugewiesen – gemessen durch ein Wearable, das Stresslevel und Konzentration permanent überwacht.

Die Projektarbeit findet in einer immersiven Mixed-Reality-Umgebung statt. Heute koordiniert Nora ein internationales Team zur Wiederaufforstung mithilfe von Drohnen und Bio-Sensorik. Die Kommunikation läuft reibungslos – aber fast ausschließlich über Avatare. Persönliche Begegnungen sind selten geworden.

Am Abend übernimmt der Küchenroboter die Essenszubereitung. Noras Tochter spielt mit ihrer KI-Lernbegleiterin ein interaktives Geschichtsspiel. Beim Abendessen diskutiert die Familie über die neue Bürgerplattform, auf der sie über lokale Projekte abstimmen können. Digitale Partizipation ersetzt zunehmend klassische Wahlen – effizient, aber entkoppelt.

Später blickt Nora aus dem Fenster. Die Stadt glüht leise – solarbetrieben, geräuschlos, geordnet. Sie denkt an früher: Stau, Hitze, Müll. Es war chaotisch, aber lebendig.

2045 – Wir haben die Zukunft perfektioniert und den Schutz durch Autonomie aufgebaut. Leider trennt sie.

TREND #9: Blockchain

Definition: Was ist unter Blockchain zu verstehen?

Die Blockchain-Technologie wurde ursprünglich als Peer-to-Peer (P2P) Netzwerk eingeführt, um den Geldhandel zu erleichtern. Die Neuheit besteht darin, das Problem der doppelten Ausgabe (engl. double spending) ohne die Notwendigkeit eines Vermittlers zu lösen [77]. Seit die erste Kryptowährung Bitcoin im Oktober 2008 eingeführt wurde, sind viele andere Anwendungen und Plattformen entstanden, wie zum Beispiel die Einführung des Ethereum-Netzwerks im Jahr 2015, das durch Vitalik Buterins Papier [78] initiiert wurde, oder das Hyperledger-Projekt im Jahr 2016 – ein Open-Source Distributed Ledger Framework, das die modulare Plattform Hyperledger Fabric implementierte [79, 80]. In diesem Zusammenhang prägte Gavin Wood 2014 den Begriff Web3 und beschrieb es als ein „dezentralisiertes Online-Ökosystem auf Basis der Blockchain“ [81].

In der bestehenden Literatur wird Blockchain als Distributed Ledger Technologie charakterisiert [82, p. 2], die eine einzige Wahrheit für Netzwerkteilnehmende bietet und dadurch Unsicherheit, Mehrdeutigkeit, Kosten und die Notwendigkeit vertrauenswürdiger Dritter bei Transaktionen reduziert [83, p. 1021, 84, p. 1390]. Darüber hinaus sind die Aufzeichnungen manipulationssicher, da sie dezentral gespeichert werden. Daher führt der Ausfall eines einzelnen Knotens nicht zu einem Informationsverlust [85, p. 3], noch hat ein einzelner Knoten „die erforderliche Rechenleistung, um Transaktionsaufzeichnungen zu fälschen“ [86, p. 501].

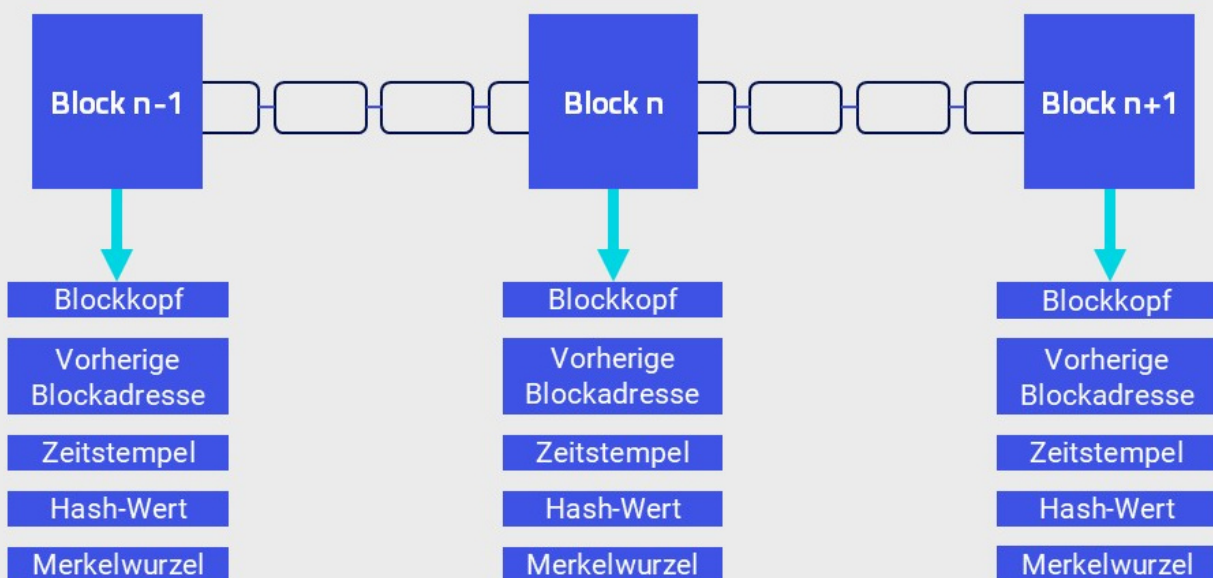


Abbildung 10: Aufbau einer Blockchain (Eigene Darstellung in Anlehnung an [87])

Die Blockchain-Technologie speichert Transaktionen in miteinander verknüpften Datenblöcken, die fälschungssicher und transparent sind (siehe Abbildung 10). Jeder Block enthält einen Blockkopf, der zentrale Metadaten wie den Zeitstempel der Transaktion, die Adresse des

vorherigen Blocks sowie den Hash-Wert umfasst – einen kryptografischen Fingerabdruck, der die Integrität des Blocks sicherstellt. Eine Merkwurzel fasst alle Transaktionen im Block effizient zusammen und ermöglicht deren schnelle Verifizierung.

Durch die Verknüpfung der Hash-Werte entsteht eine chronologisch geordnete, unveränderbare Kette. Jede Manipulation würde die gesamte Kette ungültig machen. Konsensalgorithmen wie Proof of Work oder Proof of Stake sorgen dafür, dass alle Teilnehmenden im Netzwerk neue Blöcke gemeinsam validieren. So entsteht ein sicheres, dezentrales Hauptbuch, das Vertrauen schafft und sich besonders für Anwendungen in Bereichen wie Finanzen, Lieferketten und Gesundheitswesen eignet. [88]

Der Trend: Branchenweit transparente Infrastruktur

Die Trendentwicklung für Blockchain-Lösungen basiert hauptsächlich auf den Grundpfeilern Vertrauen und Sicherheit, die durch den technologischen Ansatz verfolgt werden.

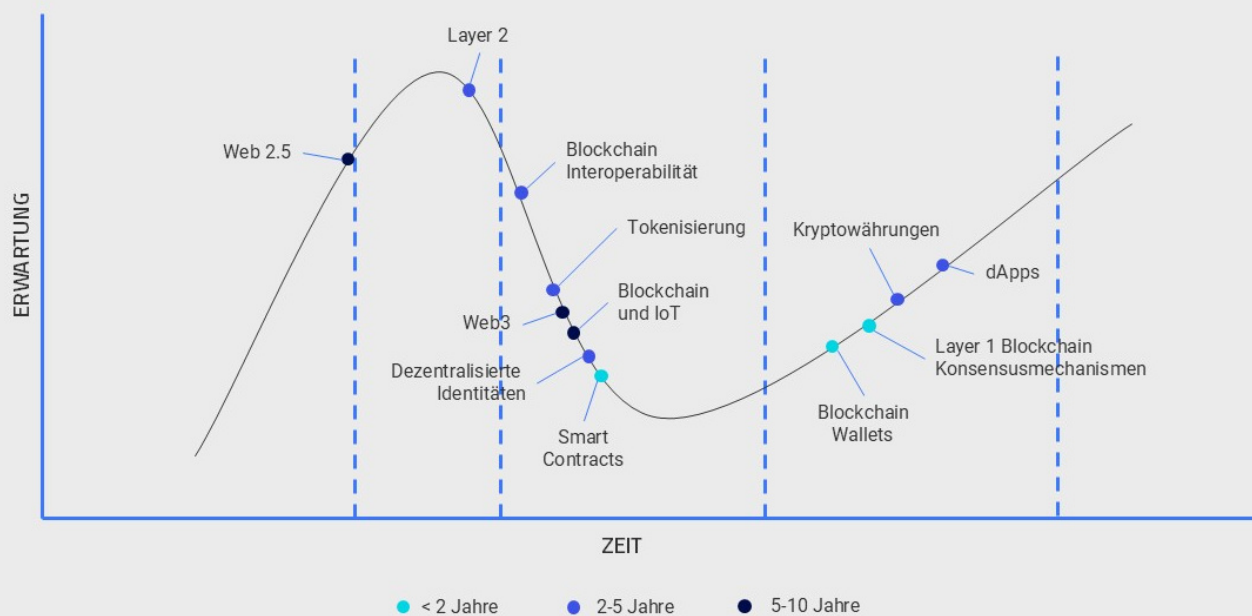


Abbildung 11: Hype Cycle für Blockchain und Web3. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [89])

Einige der in Abbildung 11 erkennbaren Entwicklungen werden hier in Kürze aufgegriffen:

- Um in Web3 weitreichende und langfristige Schritte zu gehen, sind Regulierungen ein hilfreiches Werkzeug. Die Regulierung von Web3 nimmt weltweit zu, da Regierungen Regeln für digitale Währungen und Vermögenswerte schaffen. Die Europäische Union hat 2023 die Verordnung über Märkte für Kryptowerte (MiCA) eingeführt, um einen umfassenden Rahmen für digitale Vermögenswerte zu schaffen. Südkorea führte im Juli 2024 neue Verbraucherschutzregeln ein, und das Vereinigte Königreich plant bis 2026 ein vollständiges Regulierungs-rahmenwerk für digitale Währungen zu etablieren. Etwa 70 % der großen Volkswirtschaften arbeiteten 2024 an neuen Vorschriften für digitale

Vermögenswerte, unterstützt durch Empfehlungen internationaler Organisationen wie dem G20-Finanzstabilitätsrat. Diese Vorschriften sollen das Vertrauen großer Institutionen in digitale Märkte stärken und alltägliche Nutzer*innen schützen, ohne jedoch Innovationen in der Finanztechnologie zu behindern. Dies sind einige Beispiele, die von Schritten Richtung der Regulierung berichten. Bis dato sind aber noch einige Dinge ungeklärt, weshalb hier die Zeit Neuerungen bringen wird.

- Die Entwicklung von decentralized Applications (dApps) ist auf dem Vormarsch. dApps sind Blockchain-basierte, kryptografisch verschlüsselte Verfahren, die über einen Tokenisierungsmechanismus agieren. Einige Beispiele sind bereits in größeren Industrien vorzufinden, die die Blockchain Anwendungen für ihr Kerngeschäft nutzen bzw. im Aufbau davon sind. Darunter ist Canton Network zu nennen, welches mehr als 30 führende Finanzinstitute (wie Deutsche Börse und HSBC) verbindet, um bei finanziellen Aktivitäten der Organisationen zu unterstützen. Dazu gehören beispielsweise das Abwickeln von Geschäften und die Optimierung der Kreditsicherheit. Des Weiteren sind große Technologiekonzerne wie SAP und Oracle in der Vorbereitung von Blockchain-Tools, die in bestehende Geschäftssoftware integriert werden können.
- Die Übergangsphase von Web2 zu Web3-Anwendungen, welche auch als Web2.5 definiert wird, umfasst erste Übernahmen dezentraler Technologien. Die Möglichkeit, im Bildungsbereich fälschungssichere digitale Zertifikate zu übergeben, haben das MIT, die Universität Toronto sowie weitere europäische Universitäten eingeführt. Im Unternehmensbereich wird diese Thematik ebenfalls eingeführt: Salesforce hat ein digitales Zertifizierungssystem entwickelt, in welchem Teilnehmende für bestimmte Lernschritte digitale Abzeichen erhalten. Weitere Entwicklungen im Web2.5-Bereich sind durch Self-Sovereign Identity (SSI) Lösungen zu erkennen, die in Trend #3 „Digitale Zwillinge“ erläutert werden.
- Die als „Power-duo“ [90] bezeichnete Kombination von KI- und Blockchain-Anwendungen bietet Raum für neue Geschäftsmodellentwicklungen wie z. B. verifizierte KI-generierte Inhalte oder dezentrale KI-Modelle.

Tabelle 3 fasst die erwartete Entwicklung der Blockchain-Technologie entlang zentraler Zeithorizonte zusammen. Sie zeigt, wie sich der Trend von effizienten Unternehmensanwendungen über vertrauenswürdige, interoperable Systeme hin zu einer weitgehend autonomen, dezentralen Wertschöpfung entwickelt.

Zeithorizont	Fokusbereiche	Einsatzperspektive	Schlagwort
Kurzfristig < 5 Jahre	Produktive Anwendungen & Layer-2-Integration	Skalierung & Effizienz	Enterprise Blockchain
Mittelfristig 5–10 Jahre	Vernetzte & vertrauenswürdige Systeme	Interoperabilität & Datenschutz	Trusted Interoperability
Langfristig > 10 Jahre	Autonome, dezentrale Wertschöpfung	Selbstorganisierte Ökonomien	Autonomous Web Economy

Tabelle 3: Erwartete Entwicklung der Blockchain-Technologie. (Eigene Darstellung)

Erwarteter Business Impact: Pilotprojekte und neue Geschäftsfelder

Blockchain-Lösungen gewähren erhöhte Transparenz und Compliance, indem einmal aufgezeichnete Daten nicht verändert werden können. Dies ist besonders wichtig für die Aufrechterhaltung genauer Aufzeichnungen in Branchen wie Finanzen, Lieferkettenmanagement und Gesundheitswesen. Smart Contracts automatisieren die Einhaltung von Vorschriften, indem sie vordefinierte Regeln und Bedingungen ausführen, was den Bedarf an manueller Überwachung reduziert und betriebliche Ineffizienzen minimiert. Gemeinschaftsgetriebene Innovation und Governance werden durch Dezentrale Autonome Organisationen (DAOs) gefördert, die es den Gemeinschaftsmitgliedern ermöglichen, an Entscheidungsprozessen teilzunehmen und Innovation durch kollektive Intelligenz zu fördern. Dies kann die Governance, Finanzierung und strategische Partnerschaften durch die Reduzierung bürokratischer Hürden vereinfachen. Web3 ermöglicht nahtlose Interoperabilität, wodurch sich digitale Vermögenswerte frei über verschiedene Plattformen bewegen können, was die Benutzererfahrung und das Engagement verbessert. In Branchen wie Gaming, Medien und Finanzen ist die Fähigkeit, digitale Vermögenswerte (z. B. Token, digitale Identitäten, virtuelle Güter) zu besitzen und zu übertragen, ein bedeutender Werttreiber, der Kundenbindung und Engagement fördert. Somit können neue Geschäftsfelder und Finanzströme identifiziert werden.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass sich Unternehmen in den nächsten Jahren in der Experimentierphase befinden: Unternehmen werden beginnen, erste Schritte im Bereich Web3 zu unternehmen, wobei sie sich vor allem auf Proof-of-Concept-Projekte und die Erkundung potenzieller Anwendungsfälle konzentrieren. Bereiche wie Lieferkettenverfolgung, digitales Identitätsmanagement und tokenisierte Treueprogramme werden zunächst eingeführt. Die ersten Anwender werden von der Aussicht auf mehr Effizienz und Transparenz angetrieben, die Einführung wird jedoch aufgrund regulatorischer Unsicherheiten und mangelnder technologischer Reife zurückhaltend erfolgen. [4]

TREND #10: SecureTech

Definition: Von IT-Security und SecureTech

Sicherheit (Security) im digitalen Kontext bezeichnet den Schutz von Systemen, Daten und Prozessen vor unbefugtem Zugriff, Manipulation oder Ausfall. Sie beruht auf den grundlegenden Schutzzielen der Informationssicherheit, die in der internationalen Norm ISO/IEC 27000:2023 definiert sind und die Basis moderner Sicherheitsarchitekturen bilden:

- Vertraulichkeit: Informationen dürfen nur von autorisierten Personen eingesehen werden
- Integrität: Daten und Systeme müssen unverändert und korrekt bleiben
- Verfügbarkeit: Dienste und Informationen müssen zuverlässig zugänglich sein
- Nicht-Abstreitbarkeit: Handlungen müssen nachvollziehbar und nachweisbar sein

Datenschutz (Privacy) unterscheidet sich hiervon in seinem Schutzziel: Er schützt nicht technische Systeme, sondern die Persönlichkeitsrechte und personenbezogenen Daten von Individuen. Während Datenschutz also den Missbrauch individueller Daten verhindern soll, fokussiert sich Informationssicherheit auf den Schutz der zugrunde liegenden Systeme und Prozesse. Mit zunehmender Vernetzung, Systemkomplexität und Automatisierung erweitert sich das klassische Sicherheitsverständnis über diese Schutzziele hinaus zu einem Konzept der digitalen Resilienz. SecureTech beschreibt diesen strukturellen Wandel: weg von punktuellen Abwehrmaßnahmen hin zu ganzheitlichen, adaptiven Resilienzarchitekturen, die Schutz, Anpassungs- und Wiederherstellungsfähigkeit in komplexen, vernetzten Systemen vereinen [91, 92]. Klassische Mechanismen wie Firewalls, zentrale Zugangskontrollen oder einmalige Authentifizierung verlieren in hochdynamischen IT-Landschaften an Wirksamkeit. Ihre Nachfolger sind kontextabhängige Schutzkonzepte wie Zero-Trust-Architekturen [92], Privacy-by-Design-Prinzipien, Trusted Execution Environments [93] und post-quantenresistente Verschlüsselung [94].

Ein besonderer Aspekt von SecureTech ist die Rolle der Künstlichen Intelligenz. Systeme wie Large Action Models (LAMs) eröffnen neue Möglichkeiten für automatisierte Angriffserkennung, prädiktive Schwachstellenanalyse und autonome Incident-Response-Mechanismen. Gleichzeitig entstehen neue Risiken – etwa unvorhersehbares Verhalten, eigenständige Eskalationslogiken oder missbräuchliche Nutzung durch Angreifer (siehe Trend #7 „Künstliche Intelligenz“). Regulatorische Rahmenbedingungen wie die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO), die NIS2-Richtlinie [95], der Cyber Resilience Act [96], sowie die EU-KI-Verordnung [97] verlangen, dass Schutzmaßnahmen künftig technisch, organisatorisch und rechtlich von Anfang an integriert werden.

Resilienz bedeutet in diesem Kontext mehr als Wiederherstellung: Systeme müssen trotz Sicherheitsvorfällen funktionsfähig bleiben, Angriffe eingrenzen, kritische Dienste aufrechterhalten und sich selbst stabilisieren. Dazu tragen nicht nur Technologien, sondern auch organisationale und kulturelle Faktoren wie Awareness, Redundanz, Governance und automatisierte Reaktionsprozesse bei.

SecureTech markiert damit den Übergang von reaktiver Sicherheit zu einem vorausschauenden, systemisch eingebetteten Sicherheitsverständnis, das technologische Innovation, Künstliche Intelligenz und Compliance in einer resilienten Vertrauensinfrastruktur vereint.

Der Trend: Von Cybersecurity zu aktiver digitaler Resilienz

SecureTech steht für den Übergang von klassischer Cybersecurity hin zu aktiver digitaler Resilienz. Während in der Vergangenheit reaktive Schutzmechanismen im Vordergrund standen, gewinnen heute adaptive Systeme, Kryptografie-Innovationen und regulatorische Vorgaben an Bedeutung. Ziel ist nicht nur Schutz, sondern die Fähigkeit, Störungen zu überstehen, sich anzupassen und gestärkt daraus hervorzugehen [98]. Drei Entwicklungslinien prägen diese Entwicklung:

1. Zero Trust und regulatorisch getriebene Sicherheit: Perimeterbasierte Modelle weichen dem Zero-Trust-Prinzip, das alle Zugriffe kontinuierlich und kontextbasiert überprüft. Dies erfordert dynamisches Identitätsmanagement, Echtzeit-Monitoring und automatisiertes Policy-Enforcement. Vorgaben wie NIS2 und der Cyber Resilience Act verlangen integrierte Sicherheits- und Wiederherstellungsprozesse [96, 92, 95].
2. Kryptografie für resiliente Systeme: Die wachsende Nutzung von Cloud-Diensten und der Fortschritt in der Quanteninformatik erfordern neue Sicherheitsmechanismen. So ersetzt Post-Quantum-Kryptografie (PQC) gefährdete Algorithmen (z. B. RSA), während homomorphe Verschlüsselung sichere Berechnungen ohne Entschlüsselung erlaubt. Quantenkommunikation schließlich schafft langfristig abhörsichere Übertragung. Der Cyber Resilience Act verpflichtet Unternehmen zu sicherheitsorientierter Produktgestaltung mit Kryptografie und Sicherheit „by design“ [99, 96].
3. Resilienz durch KI – Chance und Risiko: Resiliente Systeme müssen Angriffe erkennen, begrenzen, überstehen und sich erholen. Dabei gewinnen KI-Systeme wie Large Action Models – autonome KI-Agenten, die Bedrohungen eigenständig analysieren, priorisieren und Gegenmaßnahmen einleiten – an Bedeutung. Sie ermöglichen automatisierte Reaktion, Angriffserkennung und Schwachstellenanalyse. Gleichzeitig senken LAMs die Kosten und Hürden für gezielte Angriffe, da auch technisch wenig versierte Akteure komplexe Cyberoperationen ausführen können (siehe Trend #7 „Künstliche Intelligenz“). Die EU-KI-Verordnung adressiert diese Ambivalenz und verpflichtet zu Nachvollziehbarkeit, Risikoanalyse und menschlicher Kontrolle [100, 97].

Den Entwicklungspfad zur digitalen Resilienz skizzieren wir in Abbildung 12. Demnach entwickeln sich Sicherheitsstrategien in vier Stufen:

- Stufe 1 – Reaktive Sicherheit (2020–2025): Isolierte Tools, punktuelle Nachrüstung, regulatorisch getrieben (z. B. DSGVO).
- Stufe 2 – Integrierte Cybersecurity (2025–2030): Zero Trust, Cloud-Security, plattformbasierte Lösungen (SIEM, XDR), erste KI-gestützte Systeme.
- Stufe 3 – Adaptive Sicherheit durch KI (2030–2035): KI-gestützte Detection & Response, Self-Healing, PQC-Pilotierungen, homomorphe Verschlüsselung.
- Stufe 4 – Ganzheitliche Resilienz (2035–2040): Post-Quantum-Kryptografie, QKD, Recovery-by-Design, Governance, Compliance, Sicherheitskultur.

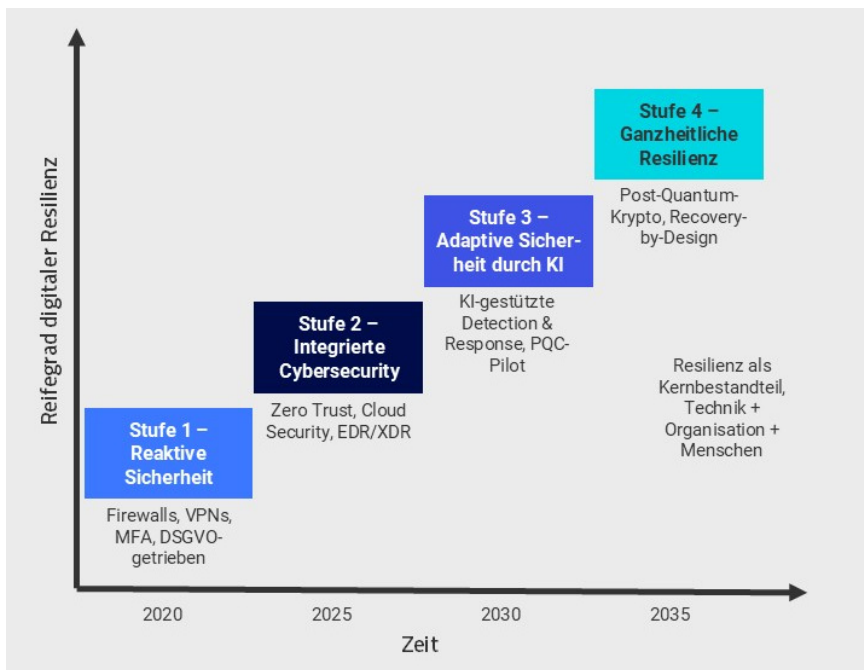


Abbildung 12: Entwicklungspfad zur digitalen Resilienz. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [98, 94])

Nicht alle Technologien, die den Trend zur aktiven digitalen Resilienz prägen, sind bereits marktreif. Während einige Sicherheitsansätze wie Zero Trust oder Security-by-Design heute schon breit eingesetzt werden, befinden sich andere noch in Pilotierung oder in frühen Entwicklungsphasen. Tabelle 4 verdeutlicht den Zeithorizont zentraler Technologien:

Technologie	Reifegrad	Zeithorizont
Zero Trust	Einsatzbereit	0–2 Jahre
Privacy-/Security-by-Design	Regulatorisch verankert	0–2 Jahre
Post-Quantum-Kryptografie (PQC)	In Pilotierung	3–5 Jahre
Homomorphe Verschlüsselung	Experimentell	4–7 Jahre
Quantenkommunikation (QKD)	Frühphase	7–10 Jahre

Tabelle 4: Zeithorizont zentraler Technologien zur digitalen Resilienz. (Eigene Darstellung)

Diese Einordnung zeigt, dass Unternehmen einerseits bereits heute verfügbare Lösungen umsetzen müssen, andererseits aber auch auf Technologien setzen sollten, die erst mittelfristig reif werden. Die technologische Entwicklung verläuft nicht linear. Offen bleibt insbesondere, wann Schlüsseltechnologien wie Post-Quantum-Kryptografie oder Quantenkommunikation tatsächlich in der Breite verfügbar sind. Ebenso bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Manipulationssicherheit von KI-Systemen sowie der organisatorischen Komplexität, die mit der Integration zahlreicher Sicherheitsanforderungen einhergeht. Schließlich gilt es zu berücksichtigen, dass Branchen und Regionen die Stufen des Entwicklungspfads unterschiedlich schnell durchlaufen.

Erwarteter Business Impact: Resilienz, Effizienz und neue Kompetenzen

SecureTech verändert die Grundlagen digitaler Sicherheit – technologisch, organisatorisch und wirtschaftlich. Unternehmen, die den Trend frühzeitig integrieren, sichern sich nicht nur regulatorische Konformität, sondern auch Resilienz, Vertrauen und strategische Handlungsfähigkeit in einem zunehmend riskanten digitalen Umfeld. Die folgenden fünf Themen stehen im Fokus:

1. Investitionsfokus auf systemische Sicherheitsarchitekturen:
Statt in punktuelle Abwehrlösungen investieren Unternehmen zunehmend in Zero-Trust-Modelle, Privacy-by-Design, verschlüsseltes Rechnen und automatisierte Reaktionssysteme. Regulatorien wie NIS2, der Cyber Resilience Act (CRA) und die EU-KI-Verordnung verpflichten Organisationen, Sicherheitsmechanismen tief in Produkte und Prozesse einzubetten.
2. Wettbewerbsvorteile durch Sicherheit und Vertrauen:
Unternehmen, die Sicherheit und Datenschutz als Kernwerte etablieren, können sich differenzieren – etwa durch sichere KI-Produkte, resiliente Infrastrukturen und transparente Datenverarbeitung. In regulierten Branchen wie Finanzen, Gesundheit, Energie, kritischer Infrastruktur und Cloud-Diensten wird Resilienz zur Voraussetzung für den Marktzugang [101].
3. Neue Rollen und Kompetenzen:
Sicherheitsmanagement entwickelt sich zur Querschnittsaufgabe. Neue Funktionen wie „AI Security Analyst“, „Resilience Architect“ oder „Digital Risk Officer“ entstehen. Besonders für KMU entsteht dabei ein Spannungsfeld zwischen Compliance-Pflicht und Ressourcenknappheit – Secure-by-Design wird für sie zur strategischen und personellen Herausforderung [102].
4. KI als Verstärker von Chancen und Risiken:
Large Action Models verschieben das Kräfteverhältnis zwischen Angreifern und Verteidigern. Einerseits ermöglichen sie hochautomatisierte Sicherheitsanalysen und schnelle Reaktionen. Andererseits senken sie die Eintrittsbarrieren für Angriffe erheblich: LAMs können dazu führen, dass komplexe Cyberattacken mit minimalem Budget und geringen Fachkenntnissen orchestriert werden – ein massiver Risikofaktor insbesondere für KMU und digitale Zulieferketten.
5. Wirtschaftlicher Effekt:
Studien zeigen, dass Unternehmen mit resilienten Sicherheitsarchitekturen ihre Vorfallkosten deutlich senken und die Wiederherstellungszeiten substanziell verkürzen können [103]. SecureTech bedeutet daher nicht nur Schutz, sondern auch wirtschaftliche Stabilität, Marktzugang und Innovationsspielraum unter digitalen Extrembedingungen.

Der Trendradar: Die Trends im Überblick

Der Trendradar bietet einen Gesamtüberblick über die wichtigsten technologischen Entwicklungen der kommenden Dekade und darüber hinaus. Er zeigt, wie sich unterschiedliche Innovationsfelder zeitlich, thematisch und wirtschaftlich zueinander verhalten, und ordnet sie den zehn übergeordneten Trends zu, die wir im Whitepaper beschreiben. Ziel ist es, sichtbar zu machen, welche Technologien bereits heute marktreif sind, welche sich in der Entwicklung befinden und welche langfristig das Potenzial haben, ganze Branchen grundlegend zu verändern.

Die Zuordnung der Technologien zu den jeweiligen Trends erfolgte im Rahmen mehrerer interdisziplinärer Workshops. Dabei wurden Erkenntnisse aus Forschung, Industrie und Technologieanalysen (u. a. [4, 12, 55]) zusammengeführt, diskutiert und bewertet. Das Ergebnis ist eine konsensbasierte Einschätzung, die sowohl den aktuellen Stand der Entwicklung als auch deren erwartete Dynamik berücksichtigt. Der Trendradar spiegelt somit die kollektive Einschätzung der beteiligten Expertinnen und Experten wider.

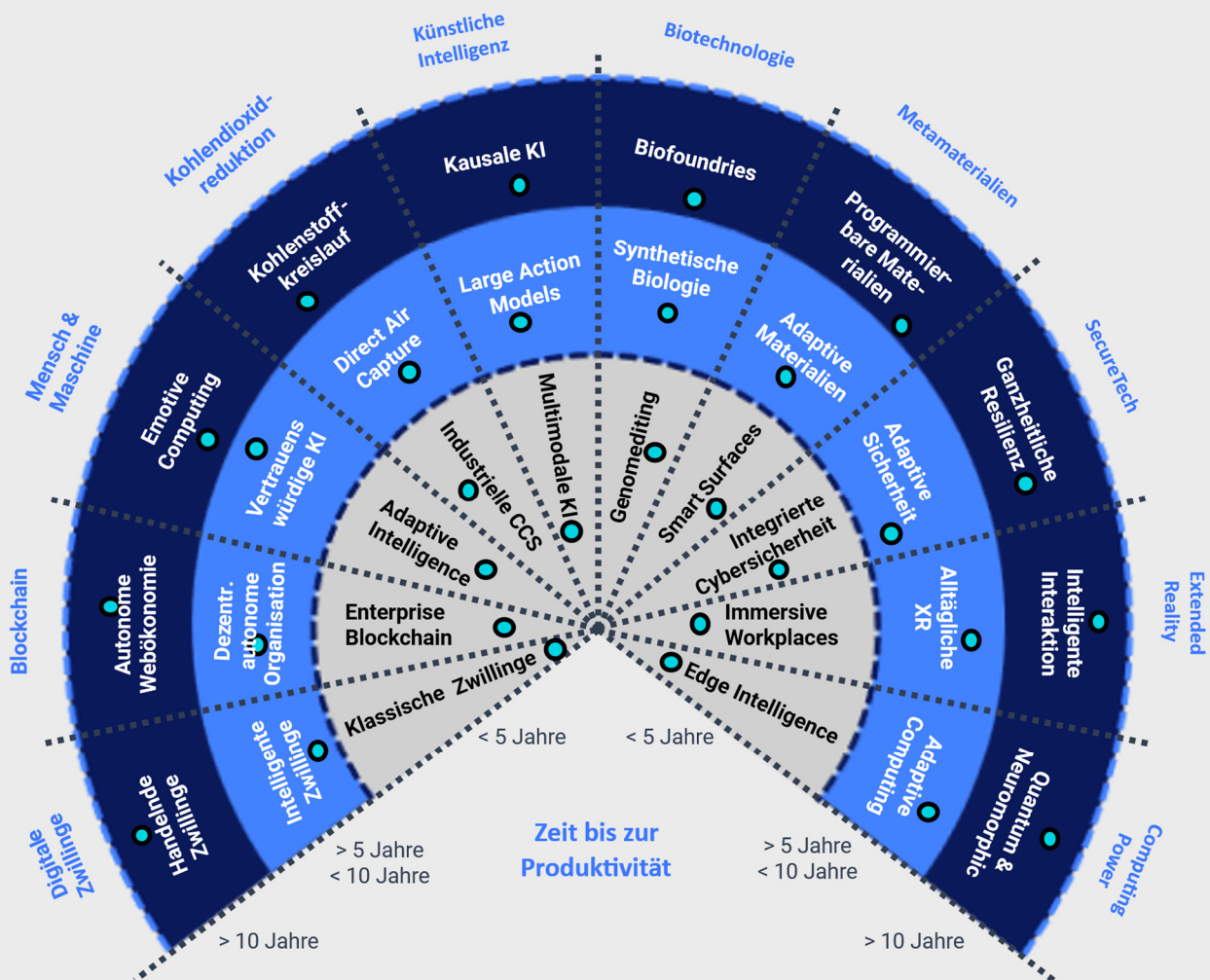


Abbildung 13: Technologischer Trendradar 2026 bis 2035+. (Eigene Darstellung)

Der Trendradar gliedert sich in drei konzentrische Segmente, die den erwarteten Zeithorizont bis zur breiten Produktivität abbilden:

Im inneren Segment (grau, < 5 Jahre) sind Technologien dargestellt, die sich bereits in der Umsetzung befinden oder kurzfristig in den breiten Markt übergehen. Dazu gehören Edge Intelligence (die Ausführung von KI-Anwendungen direkt auf lokalen Geräten), Adaptive Intelligence (lernfähige, kontextabhängige Entscheidungsunterstützung), Enterprise Blockchain (verteilte, sichere Datenarchitekturen für Unternehmen) sowie klassische Digitale Zwillinge (virtuelle Abbilder physischer Systeme). Diese Technologien treiben die aktuelle Digitalisierungswelle in Industrie, Energie, Mobilität und Gesundheit maßgeblich voran, indem sie Prozesse automatisieren, Datenflüsse integrieren und Entscheidungsqualität verbessern.

Das mittlere Segment (blau, 5–10 Jahre) umfasst Technologien, die derzeit in Entwicklung, Pilotierung oder industrieller Skalierung stehen. Dazu zählen Large Action Models (LAMs), die Sprachverstehen mit Handlungsfähigkeit kombinieren, Adaptive Materialien, die ihre Eigenschaften aktiv anpassen, Vertrauenswürdige KI (Trustworthy AI) als Voraussetzung für verantwortliche Automatisierung, Direct Air Capture als Schlüsseltechnologie zur CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre und die Synthetische Biologie, die biologische Systeme gezielt gestaltet und neu kombiniert. Diese Entwicklungen markieren die nächste Innovationswelle – sie verbinden Künstliche Intelligenz mit Biotechnologie, Materialwissenschaft und Klimaschutz, und schaffen damit die Grundlage für eine nachhaltige, datengetriebene Wirtschaft.

Im äußeren Segment (dunkelblau, > 10 Jahre) finden sich Technologien, deren Marktreife erst langfristig erwartet wird, deren transformative Wirkung aber bereits absehbar ist. Hierzu gehören Intelligente Interaktionen im Bereich der Erweiterten Realität (Extended Reality), bei denen KI und Sensorik eine natürliche Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ermöglichen; Kausale KI, die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge anstelle bloßer Korrelationen erkennt; Autonome Webökonomien, die auf dezentralen Organisationsformen wie Blockchain und Smart Contracts basieren; sowie Programmierbare Materialien, die sich dynamisch an Umweltbedingungen anpassen können. Diese Technologien markieren den Übergang in eine neue Stufe technologischer Selbstorganisation, in der Systeme eigenständig lernen, sich anpassen und miteinander kooperieren können.

Der Trendradar verdeutlicht zudem die systemischen Verbindungen zwischen Technologiefeldern. Fortschritte in Rechenleistung, Dateninfrastruktur und Künstlicher Intelligenz wirken als Enabler für Innovationen in Biotechnologie, Materialwissenschaft, Energie und Interaktionsdesign. Gleichzeitig schaffen neue Materialien, biologische Produktionssysteme und klimaneutrale Infrastrukturen die Voraussetzungen für eine nachhaltige und resiliente Digitalisierung. So entsteht ein vernetztes Innovationsökosystem, in dem Fortschritt in einem Bereich unmittelbar Entwicklungen in anderen Feldern ermöglicht oder beschleunigt.

Ziel des Trendradars ist es, technologische Innovationen nicht isoliert zu betrachten, sondern als Teil eines zusammenhängenden, sich gegenseitig verstärkenden Systems. Er zeigt, wie sich Rechenleistung, Intelligenz, Energie und Materie in den kommenden Jahren zunehmend miteinander verschränken – und damit die Grundlage für eine adaptive, intelligente und nachhaltige Wirtschaft schaffen.

Branchenanalyse:

Kurzfristiger Business Impact der Trends

Technologische Entwicklungen entfalten ihre Wirkung selten isoliert – ihr tatsächlicher Wert zeigt sich erst in der Anwendung. Die im Trendradar identifizierten Technologien wirken bereits heute tief in die Wertschöpfungsketten zentraler Branchen hinein. Der Zeithorizont von weniger als fünf Jahren verdeutlicht: Der Wandel ist nicht länger hypothetisch, sondern bereits im Gange.

Die folgende Impact-Matrix zeigt, in welchen Branchen die untersuchten Trends kurzfristig (< 5 Jahre) den größten Einfluss entfalten. Sie beruht auf einer gemeinsamen Bewertung des Projektteams in mehreren Workshops und Experteninterviews. Bewertet wurden der Beitrag jeder Technologie zu Effizienz, Innovation, Nachhaltigkeit und neuen Geschäftsmodellen in den Branchen Gesundheit, Mobilität, Energie sowie Industrie und Produktion.

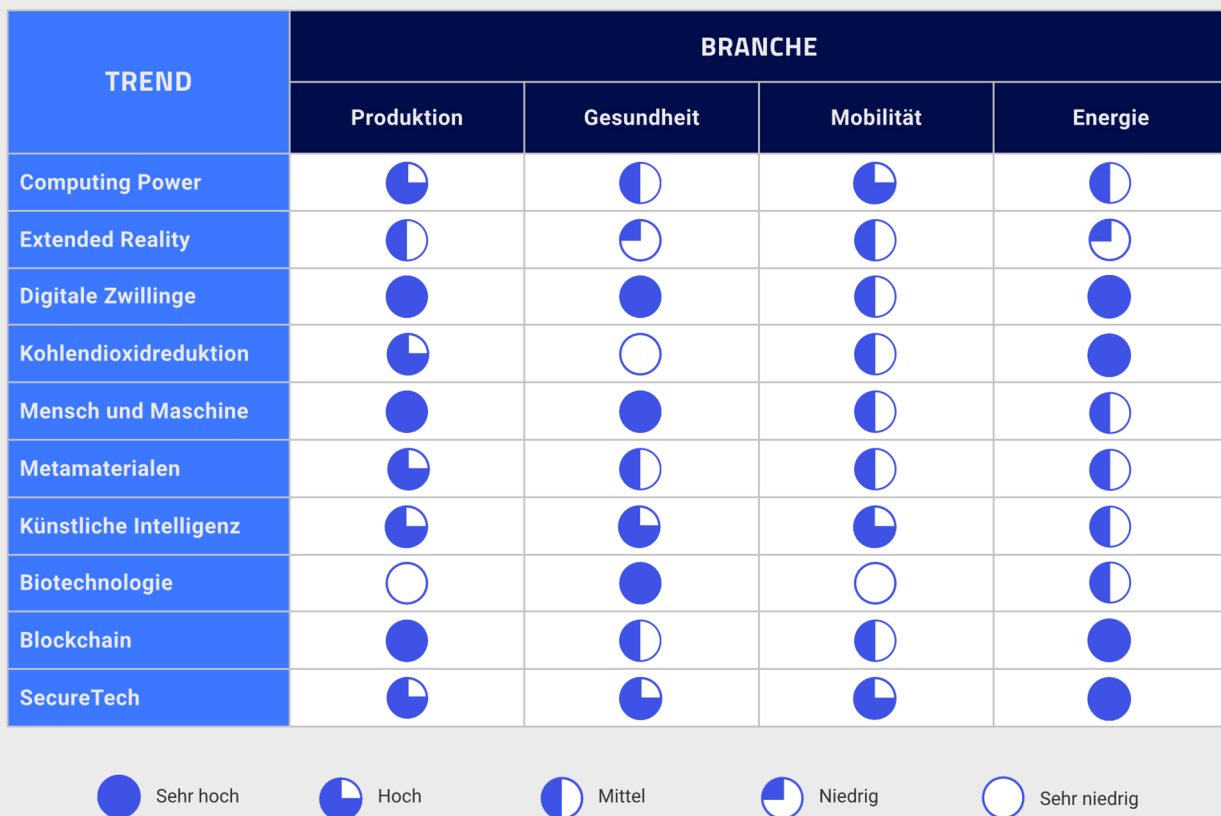


Abbildung 14: Impact-Matrix der Technologietrends nach Branchen (Zeithorizont < 5 Jahre).
(Eigene Darstellung, basierend auf Team-Workshops und Branchenanalysen).

Die Analyse zeigt, dass sich der Einfluss technologischer Innovationen branchenübergreifend, aber mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Reifegraden entfaltet.

- **Industrie und Produktion:** In der industriellen Wertschöpfung steht die Integration digitaler und physischer Systeme im Mittelpunkt. Digitale Zwillinge, Künstliche Intelligenz und SecureTech ermöglichen datengetriebene Prozesssteuerung, vorausschauende Wartung und Qualitätsmanagement in Echtzeit. Metamaterialien eröffnen neue Wege für nachhaltige Werkstoffe und effizientere Produktionsverfahren. (Enterprise-) Blockchain erhöht Transparenz und Nachweisbarkeit in globalen Lieferketten – ein zentraler Faktor für Resilienz und Compliance in zunehmend vernetzten Industrien. Kurzfristig führt dies zu messbaren Produktivitätssteigerungen, geringeren Ausfallraten und höherer Ressourceneffizienz. Langfristig bilden diese Technologien die Grundlage für autonome Produktionssysteme, in denen Maschinen, Materialien und Daten nahtlos interagieren.

- **Gesundheit:** Die Gesundheitsbranche steht an der Spitze einer datengetriebenen Transformation. Künstliche Intelligenz verbessert Diagnostik, Bildanalyse und Therapieplanung, während Biotechnologie personalisierte Behandlungsstrategien ermöglichen. Digitale Zwillinge werden zunehmend in der Medizintechnik und in klinischen Simulationen eingesetzt, um Behandlungsverläufe zu optimieren und Risiken zu minimieren. Ergänzend schaffen Extended-Reality-Lösungen immersive Trainingsumgebungen für Chirurgie, Pflege und Ausbildung. Die größten Herausforderungen liegen nicht in der technologischen Machbarkeit, sondern in Fragen von Datenschutz, Interoperabilität und gesellschaftlicher Akzeptanz. Entscheidend für den Erfolg ist die Fähigkeit, Innovation mit Vertrauen, Transparenz und ethischer Verantwortung zu verbinden.

- **Mobilität:** Die Mobilität der Zukunft entsteht an der Schnittstelle von Edge Intelligence, Künstlicher Intelligenz und SecureTech. Fahrzeuge, Produktionssysteme und Verkehrsinfrastrukturen kommunizieren in Echtzeit, analysieren Datenströme lokal und reagieren adaptiv auf Veränderungen. Digitale Zwillinge ermöglichen die Simulation und Optimierung von Fahrzeugflotten, Fertigungsprozessen und Verkehrsflüssen. Blockchain-basierte Anwendungen sorgen für Rückverfolgbarkeit und Transparenz entlang komplexer Lieferketten – insbesondere in der Batteriefertigung und im Recycling kritischer Rohstoffe. Der kurzfristige Business Impact ist hoch: KI und sichere Datenarchitekturen werden zu Schlüsseltechnologien für nachhaltige und autonome Mobilitätssysteme, während Cyberresilienz und Datensicherheit zunehmend zu Wettbewerbsfaktoren werden.

- **Energie:** Der Energiesektor erlebt eine doppelte Transformation – Dekarbonisierung und Digitalisierung. Computing Power und Künstliche Intelligenz sind entscheidend, um die Komplexität dezentraler Netze zu steuern, Lastmanagement zu optimieren und Erzeugung sowie Verbrauch in Echtzeit auszubalancieren. SecureTech stärkt die Cyberresilienz kritischer Infrastrukturen, während Kohlendioxidreduktion an strategischer Relevanz gewinnt: als Übergangstechnologie auf dem Weg zu Netto-Null-Emissionen und als Baustein künftiger Kohlenstoffkreisläufe. Unternehmen investieren zunehmend in digitale Zwillinge von Energieanlagen, um Betrieb, Wartung und Emissionen zu optimieren. Damit entstehen neue Synergien zwischen Effizienz, Klimaschutz und Versorgungssicherheit.

Über alle Branchen hinweg zeigt sich ein wiederkehrendes Muster:

- Künstliche Intelligenz, Digitale Zwillinge und Sicherheitstechnologien bilden das Fundament nahezu aller kurz- und mittelfristigen Innovationen.
- Digitale Zwillinge fungieren als Brückentechnologie zwischen physischer und digitaler Welt – sie verbinden Daten, Prozesse und Entscheidungen über Domänengrenzen hinweg.
- Nachhaltigkeit und Resilienz entwickeln sich zu zentralen Parametern technologischer Strategien – nicht als Zusatznutzen, sondern als Wettbewerbsvorteil.

Zusammengefasst ist der kurz- bis mittelfristige Business Impact der untersuchten Trends deutlich: Unternehmen, die Rechenleistung, KI, Simulation und Sicherheit gezielt einsetzen, schaffen nicht nur Effizienzgewinne, sondern gestalten aktiv die nächste Generation industrieller, energetischer und gesellschaftlicher Wertschöpfung.

Entscheidend wird sein, technologische Leistungsfähigkeit mit sozialer Verantwortung, Governance und nachhaltiger Wirkung zu verbinden – denn nur so wird aus technologischem Fortschritt auch langfristiger gesellschaftlicher Nutzen.

Fazit und Ausblick:

Die Zukunft gestalten – zwischen Konvergenz und Beschleunigung

Die beschriebenen Trends markieren eine tiefgreifende Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft, die bis 2045 die Grundlagen unseres Lebens verändern wird. Rechenleistung, Künstliche Intelligenz, Biotechnologie, digitale Zwillinge und SecureTech sind keine isolierten Phänomene, sondern Teil eines vernetzten Evolutionsprozesses, in dem sich Technologien gegenseitig verstärken.

Konvergenz der Technologien: Der neue Innovationsmodus

Der kommende Innovationszyklus ist durch Konvergenz geprägt: Computing Power ermöglicht skalierbare KI-Systeme; KI beschleunigt Forschung in Materialwissenschaften und Biotechnologie; Blockchain und SecureTech schaffen Vertrauen in globalen Wertschöpfungsketten. Diese Entwicklung steht für einen Wandel im Innovationsverständnis – Fortschritt entsteht durch das Zusammenspiel von Technologien, Daten und Kontexten [104]. Für (mittelständische) Unternehmen bedeutet das: Digitalisierung des Maschinenparks, Aufbau von Datenkompetenz, Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und KI-gestützte Prozessanalysen sind heute zentrale Erfolgsfaktoren. Die technologische Konvergenz eröffnet neue Chancen – von automatisierter Qualitätssicherung über energieeffiziente Fertigung bis zu datenbasierten Geschäftsmodellen.

Koevolution von Technologie und Gesellschaft

Technologie und Gesellschaft entwickeln sich gemeinsam. Jede Innovation verändert unser Verhalten, und unser Verhalten beeinflusst wiederum, welche Technologien sich durchsetzen [105]. Gerade in Baden-Württemberg, Deutschland und Europa zeigt sich, dass technologische Exzellenz und gesellschaftliche Verantwortung sich gegenseitig stärken. Schwäbischer Erfindergeist, deutsche Ingenieurskunst und europäisches Systemdenken bilden ein Innovations-ökosystem, das regionale Verwurzelung mit globaler Vernetzung verbindet [106]. Baden-Württemberg kann so Modellraum für die digitale und nachhaltige Transformation werden.

Wettbewerb und Werte: Schwäbische Tüftler und europäische Resilienz

Im internationalen Wettbewerb wird sich zeigen, ob Deutschland und Europa technologische Leistungsfähigkeit mit gesellschaftlichem Fortschritt verbinden können. Die Transformation schafft Wachstum, Effizienz und neue Geschäftsmodelle [107]. Entscheidend ist die Geschwindigkeit der Anpassung [108]: Agilität und Innovationskraft müssen mit Qualität und Verantwortung vereinbar bleiben. Die schwäbische Wirtschaft – vom mittelständischen Maschinenbauer bis zum Hightech-Labor – steht exemplarisch für diesen Ansatz. Sie verbindet technische Tiefe mit handwerklicher Präzision und einer Haltung, die Innovation als Verpflichtung gegenüber der Gesellschaft begreift.

Schumpeters Vermächtnis: Schöpferische Zerstörung neu denken

Joseph A. Schumpeter beschrieb den Kapitalismus als System schöpferischer Zerstörung [109]. In einer Welt exponentieller Entwicklung beschleunigt sich dieser Prozess. Doch Disruption kann zur bewussten Erneuerung werden, wenn Gesellschaft, Wirtschaft und Politik sie gestalten, statt sich von ihr treiben zu lassen.

Die Logik der Beschleunigung

Der Zukunftsforscher Ray Kurzweil sieht die 2040er-Jahre als Wendepunkt, an dem menschliche und maschinelle Intelligenz zusammenwachsen [9]. Seine These, dass sich der Fortschritt selbst beschleunigt, mahnt: Unsere ethischen und institutionellen Systeme müssen Schritt halten, wenn Technologie zu einem Teil der Evolution wird.

Leitgedanken

Die große Aufgabe der kommenden Jahrzehnte wird sein, Tempo mit Tiefe, Effizienz mit Sinn und Innovation mit Verantwortung zu verbinden. Drei Leitgedanken können Orientierung geben:

1. Digitalisierung ist ein Ökosystem aus Menschen, Daten und Maschinen.
2. Zukunftssicherung bedeutet Investition in Kompetenzen, Nachhaltigkeit und Geschwindigkeit.
3. Fortschritt ist die Fortsetzung von Tradition mit neuen Mitteln.

Ein Appell

„Die beste Art, die Zukunft vorherzusagen, ist, sie zu erfinden.“ (Alan Kay)

Zukunft ist kein Naturereignis, sondern das Ergebnis menschlicher Entscheidungen. Gerade aus Baden-Württemberg kann dieser Wandel seinen Ausgang nehmen – bodenständig im Denken, exzellent im Machen und offen für Neues. Wenn Deutschland und Europa diesen Geist bewahren und zugleich die Dynamik der globalen Innovation aufnehmen, dann wird aus technologischem Wandel gesellschaftlicher Fortschritt.

Zukunft entsteht dort, wo Verantwortung auf Kreativität trifft – im Labor, in der Werkhalle, im Klassenzimmer, im Netzwerk. Die Aufgabe unserer Zeit ist es nicht nur, die Zukunft zu erleben, sondern sie bewusst zu entwerfen.

„Verantwortung übernehmen heißt: für die Welt sorgen.“ (Hannah Arendt)

Die Autor*innen

Dieses Whitepaper wurde gemeinsam von Expert*innen aus den Bereichen Digitalisierung und Unternehmensstrategie verfasst.

Amelie Beutel ist als Forscherin im Bereich digitale und nachhaltige Transformation an der Schnittstelle von Technologie und Geschäftsstrategie bei bwcon research tätig. Über Landes-, Bundes- und EU-Projekte ist sie in Konsortien als Projektvertretung- bzw. -leitung vertreten. Dadurch gewinnt sie Einblicke in technologische Reifegrade bestimmter Entwicklungen sowie der Akzeptanztoleranz dieser Entwicklungen in bestehende Unternehmen. Sie verfügt über einen Double-Degree Master of Arts in Global Studies on Management and Information Science von der Universität Hildesheim und Chungbuk National University, Korea sowie einen Bachelor of Arts in Internationalem Informationsmanagement der Universität Hildesheim.

Urmi Bose ist als Projektleiterin bei bwcon research tätig und verantwortet EU-Forschungs- und Innovationsprojekte mit Schwerpunkt auf den Bereichen Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft, Künstliche Intelligenz und Landwirtschaft. Ihr Fokus liegt darauf, diese Themen miteinander zu verknüpfen, um die grüne Transformation voranzutreiben und zukunftsfähige Lösungen zu entwickeln. Sie verfügt über einen Master of Arts in English-Speaking Cultures von der Universität Bremen sowie einen Master of Arts in Englischer Literatur von der Universität Kalkutta, Indien.

Dr. Jürgen Jähnert ist Geschäftsführer von bwcon und bwcon research. Er verfügt über einen Abschluss in Elektrotechnik zum Dipl.-Ing bzw. Dr.-Ing. von der Universität Stuttgart, einen Abschluss zum Dipl.-Wirtsch.-Ing.(FH) für Marketing und Unternehmensführung von der HTW Berlin und einen Abschluss als Systemischer Manager von der TU Kaiserslautern. Er hat mehr als 25 Jahre Erfahrung in verschiedenen Innovations- und Technologieprojekten mit Fokus auf Mobilität, Produktion, Energie und digitale Gesundheit und ist regelmäßig für die EU-Kommission als Gutachter in diesem Bereich tätig.

Melisa Özkan ist als Business Development Consultant bei bwcon tätig. In dieser Rolle treibt sie strategische Business Development Initiativen für Startups im Technologiesektor und KMUs voran und entwickelt und implementiert innovative Strategien zur Verbesserung der Wettbewerbsposition und operativen Effizienz. Sie orchestriert Partnerschaften, Kooperationen und Finanzierungsmöglichkeiten zur Geschäftsexpansion und berät Unternehmer*innen zu Markttrends und Skalierbarkeitsstrategien. Sie besitzt einen Master of Arts in Service Marketing sowie einen Bachelor of Science in Betriebswirtschaftslehre von der Hochschule Pforzheim.

Joachim Reinhart studierte Wirtschafts- und Sozialwissenschaften an der Universität Augsburg und verfügt über umfassende Erfahrung in Innovation, Digitalisierung und Künstliche Intelligenz. Aktuell leitet er ein Forschungsprojekt bei HQ-Dielectrics im Rahmen der Semiconductor-X-Initiative und verantwortet er bei bwcon research Forschungsprojekte an der Schnittstelle von Wirtschaft und Wissenschaft. Zuvor war er in leitenden Funktionen bei der Deutschen Telekom sowie in mittelständischen Unternehmen (Beratung und Softwareentwicklung) tätig. Er ist Co-Autor des Fachbuchs „Künstliche Intelligenz entfesselt“ (Vogel Fachbuchverlag, 2025) und engagiert sich als Juror bei den Bayerischen Businessplan-Wettbewerben (BayStartUp) und Co-Leiter des Arbeitskreises für Innovationsmanagement.

Über bwcon research – Forschung im Netzwerk

Die Ergebnisse und Bewertungen dieses Whitepapers entstanden im engen Austausch mit Expert*innen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung – getragen durch die Forschungsarbeit der bwcon research gGmbH, der gemeinnützigen Forschungseinrichtung der bwcon Gruppe.

Die bwcon research gGmbH versteht sich als Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Sie widmet sich der angewandten Forschung in den Bereichen Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion und untersucht, wie technologische Entwicklungen zu neuen Wertschöpfungsmechanismen führen. Ihr Schwerpunkt liegt auf Technologietransfer, systemischer Innovationsforschung und der Transformation von Inventionen in marktfähige Anwendungen. Forschungsergebnisse werden grundsätzlich offen publiziert und der Allgemeinheit zugänglich gemacht, um eine kooperative und nachhaltige Innovationslandschaft zu fördern.

Als Teil der bwcon Gruppe ist die bwcon research in ein großes Technologie- und Innovationsnetzwerk eingebettet. Die Mutterorganisation Baden-Württemberg: Connected e.V. (bwcon) vernetzt rund 700 Unternehmen und Forschungseinrichtungen mit über 6.000 Expert*innen aus Wirtschaft und Wissenschaft. Sie fördert Innovationskraft sowie Technologietransfer in Baden-Württemberg und begleitet Organisationen bei der Entwicklung neuer Geschäftsfelder und dem Aufbau einer innovationsfreundlichen Unternehmenskultur.

Die bwcon research gGmbH steht damit exemplarisch für ein modernes Forschungsverständnis: offen, vernetzt und anwendungsorientiert. Sie verbindet wissenschaftliche Exzellenz mit unternehmerischer Praxis und trägt dazu bei, dass Forschungsergebnisse rasch in marktwirksame Innovationen überführt werden können.

Weitere Informationen:

www.bwcon.de

www.bwcon-research.org

Impressum

Herausgeber:

bwcon research gGmbH

Seyfferstraße 34 | 70197 Stuttgart

Telefon: +49 711 18421-600 | info@bwcon.de

Verantwortlich für den Inhalt gemäß § 55 Abs. 2 RStV: Dr. Jürgen Jähnert

Urheberrecht:

Alle Inhalte dieses Whitepapers sind urheberrechtlich geschützt. Jede Vervielfältigung, Verbreitung oder öffentliche Wiedergabe bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Herausgebers.

Haftungsausschluss:

Die Inhalte wurden sorgfältig recherchiert und zusammengestellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt bwcon research keine Gewähr.

Literaturverzeichnis

- [1] W. B. Arthur, *The Nature of Technology: What It Is and How It Evolves*, New York: Free Press, 2009.
- [2] R. Phaal, C. Farrukh und D. R. Probert, „Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution,” *Technological Forecasting and Social Change*, Bd. 71, pp. 5-26, 2004.
- [3] OECD, „OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2021: Times of Crisis and Opportunity,” OECD Publishing, Paris, 2021.
- [4] Future Today Strategy Group, „2025 Tech Trends Report,” 2025.
- [5] Zukunftsinstitut, „The Megatrends,” 2023. [Online]. Available: <https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/dossier/megatrends-en> . [Zugriff am 17 09 2025].
- [6] Gartner, „Hypecycle für neue Technologien 2025,” 2025. [Online]. Available: <https://www.gartner.de/de/artikel/hype-cycle-fuer-neue-technologien> . [Zugriff am 19 08 2025].
- [7] G. E. Moore, „Cramming more components onto integrated circuits,” *Electronics*, Nr. 38(8), 1965.
- [8] E. Commission, „A Competitiveness Compass for the EU,” 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/document/download/10017eb1-4722-4333-add2-e0ed18105a34_en?filename=Communication_1.pdf. [Zugriff am 15 09 2025].
- [9] R. Kurzweil, *Die nächste Stufe der Evolution*, Piper Verlag, 2024, pp. 335-361.
- [10] IBM Research, „The Quantum Decade: Scaling Real-World Impact,” [Online]. Available: <https://www.ibm.com/downloads/documents/us-en/107a02e97dc8fd16> . [Zugriff am 15 09 2025].
- [11] K. Rogdakis, G. Psaltakis und G. Fagas, „Hybrid chips to enable a sustainable internet of things technology: opportunities and challenges,” *Discover Materials*, 21 02 2024.
- [12] Gartner, Inc., „Die 10 wichtigsten strategischen Technologie-Trends von Gartner für 2025,” Gartner, Inc., 2024. [Online]. Available: <https://www.gartner.de/de/artikel/top-technologie-trends-2025>. [Zugriff am 17 09 2025].
- [13] SK Ventures, „Society’s Technical Debt and Software’s Zero Cost Future,” 2024. [Online]. Available: <https://skventures.substack.com>. [Zugriff am 18 09 2025].
- [14] McKinsey & Company, „The Future of Extended Reality,” 2024. [Online].
- [15] Gartner, „Hype Cycle for Extended Reality,” 2023. [Online].
- [16] P. Milgram und F. Kishino, „A taxonomy of mixed reality visual displays,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, Bde. %1 von %2E77-D(12), p. 1321–1329, 1994.
- [17] Bitkom, „Industrie digitalisiert – XR, KI und 5G im Mittelstand,” 2023. [Online].
- [18] PwC, „XR in Industry 4.0 – Trends and Opportunities,” 2022. [Online].
- [19] XR Hub Bavaria, „XR-Barometer für kleine und mittlere Unternehmen,” 2023. [Online].
- [20] M. Grieves, „Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. University of Michigan,” 2002. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication.
- [21] J. Reinhart, B. Hoisl und J. Baumgartl, „Digital Twin – Grundlagen, Anwendungsfelder und Umsetzungsstrategien. Whitepaper,” 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/334697408_Whitepaper_Digital_Twin_Grundlagen_Anwendungsfelder_und_Umsetzungsstrategien.
- [22] Heise, „Airbags defekt: Volkswagen ruft tausende Fahrzeuge zurück,” 2025. [Online]. Available: <https://www.heise.de/news/Airbags-defekt-Volkswagen-ruft-tausende-Fahrzeuge-zurueck-10463600.html> . [Zugriff am 12 08 2025].

- [23] Gaia-X, „Policy Rules and Architecture of Standards.“ 2024. [Online].
- [24] Catena-X, „Semantic Submodel for Product Carbon Footprint (PCF).“ 2024. [Online].
- [25] J. Anke, D. Richter und M. Seiffert, „Grundlagen, Entwicklungslinien und Perspektiven Digitaler Identitäten und Nachweise.“ in Digitale Identitäten und Nachweise., 2025.
- [26] F. Kirstein, M. Polzhofer und K.-P. Eckert, „Digitale Identitäten in der Blockchain – Erfahrungen aus der Entwicklung.“ Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme FOKUS.
- [27] IPCC, „AR6 Synthesis Report: Climate Change 2022.“ 2022. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch>.
- [28] IEA, „CO₂ Capture, Utilisation and Storage – Tracking Report.“ 2024.
- [29] IEA, „CO₂ Capture, Utilisation and Storage – Tracking Clean Energy Progress.“ 2023.
- [30] D. Archer, The Global Carbon Cycle., Princeton University Press., 2010.
- [31] Project Vesta, „The Project.“ Project Vesta , [Online]. Available: <https://www.projectvesta.org/the-project>. [Zugriff am 31 10 2025].
- [32] European Commission, „LEILAC2: Low Emissions Intensity Lime and Cement 2 (Project ID 884170) [Project factsheet]. CORDIS – EU Research Results.“ European Commission, 07 07 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/884170>.
- [33] „Permafrost and Climate Change: Carbon Cycle Feedbacks From the Warming Arctic.“ Annual Review of Environment and Resources, Bd. 47, pp. 343-371, 2022.
- [34] McKinsey, „Carbon Capture: The Next Frontier in Decarbonization.“ 2022. [Online].
- [35] IDTechEx, „Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Markets 2026-2036: Technologies, Market Forecasts, and Players.“ 2025. [Online]. Available: <https://www.idtechex.com/en/research-report/carbon-capture-utilization-and-storage-ccus-markets-2026-2036-technologies-market-forecasts-and-players/1122>.
- [36] European Commission, „Net-Zero Industry Act & Net-Zero Pollution Framework.“ 2023. [Online].
- [37] BloombergNEF, „Carbon Capture Investment Outlook.“ 2024. [Online].
- [38] E. Hanson, C. Nwakile und V. Hammed, „Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technologies: Evaluating the Effectiveness of Advanced CCUS Solutions for Reducing CO₂ Emissions.“ 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/387064532_Carbon_Capture_Utilization_and_Storage_CCUS_Technologies_Evaluating_the_Effectiveness_of_Advanced_CCUS_Solutions_for_Reducing_CO2_Emissions.
- [39] OGCI, „Pathways to a Circular Carbon Economy.“ 2024. [Online].
- [40] L. Dempsey, C. Hein und L. Münter, „The Mitigation Hierarchy.“ 2023. [Online]. Available: <https://tethys.pnnl.gov/summaries/short-science-summary-mitigation-hierarchy>.
- [41] McKinsey, „Carbon Capture: A Key Pillar of the Net-Zero Transition.“ 2023. [Online].
- [42] Gartner, „Emerging Technologies Impact Radar: Energy and Sustainability.“ 2024. [Online].
- [43] E. A. C. Bittner, S. Oeste-Reiß, P. A. Ebel und M. Söllner , „Mensch-Maschine-Kollaboration: Grundlagen, Gestaltungsherausforderungen und Potenziale für verschiedene Anwendungsdomänen.“ HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Bd. 56, pp. 34-49, 01 06 2019.
- [44] R. Hamdani und I. Chihi, „Adaptive human-computer interaction for industry 5.0: A novel concept, with comprehensive review and empirical validation.“ Computers in Industry, Bd. 168, 2025.
- [45] S. Gulati , J. McDonagh, S. Sousa und D. Lamas, „Trust models and theories in human–computer interaction: A systematic literature review.“ Computers in Human Behavior Reports, Bd. 16, 2024.
- [46] D. Protschky, M. Schüll und N. Urbach, „Governance von künstlicher Intelligenz – Eine Methode zur Transformation vorhandener Governance-Mechanismen in Unternehmen.“ Wirtschaftsinformatik & Management, Bd. 16, pp. 194-201, 2024.

- [47] D. P. Kleine Jäger, D. C. Bader und M. Multani, „GRC der nächsten Generation: KI als strategischer Enabler,“ COREtransform GmbH, 2025.
- [48] ISACA Germany Chapter, „Implementierung eines ISMS nach ISO/IEC 27001:2022,“ 2022.
- [49] Karlsruhe Institute of Technology (KIT), „Metamaterials: Highly twisted rods store large amounts of energy. KIT Press Release,“ KIT, 2025. [Online]. Available: https://www.kit.edu/kit/english/pi_2025_024_metamaterials-highly-twisted-rods-store-large-amounts-of-energy.php. [Zugriff am 06 10 2025].
- [50] University of Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), „Nachhaltige Forschung: Materialien und adaptive Strukturen,“ [Online]. Available: <https://www.f02.unistuttgart.de/nachhaltigkeit/nachhaltige-forschung/ilek/>. [Zugriff am 30 09 2025].
- [51] European Commission, „Horizon Europe – Advanced Materials for a Green and Digital Future,“ Publications Office of the EU, Brussels, 2023.
- [52] V. G. Veselago, „The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . Physics-Uspekhi,“ SOVIET PHYSICS USPEKHI, Bd. 10, Nr. 4, pp. 509-514, 1968.
- [53] D. Smith, J. Pendry und M. Wiltshire, „Metamaterials and negative refractive index,“ Science, p. 788–792, 2004.
- [54] KIT, „Metamaterials: Highly twisted rods store large amounts of energy. KIT Press Release,“ Karlsruhe Institute of Technolog, 2025. [Online]. Available: https://www.kit.edu/kit/english/pi_2025_024_metamaterials-highly-twisted-rods-store-large-amounts-of-energy.php.
- [55] L. Yee, M. Chui, R. Roberts und S. Smit, „Technology Trends Outlook 2025. McKinsey Digital,“ McKinsey & Company, 2025. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/the-top-trends-in-tech>.
- [56] F. Mir, D. Mandal und S. Banerjee, „Metamaterials for Acoustic Noise Filtering and Energy Harvesting,“ Sensors, 2023.
- [57] European Commission, „Strategic Research and Innovation Agenda for Advanced Materials 2030,“ European Materials Modelling Council, Brussels, 2024.
- [58] Fortune Business Insights, „Metamaterials Market Size, Share, Trends,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/metamaterials-market-113857>.
- [59] S. Russell und P. Norvig, Artificial Intelligence. A modern Approach, Bd. 4, New Jersey: Pearson, 2020.
- [60] J. Reinhart, O. Mayer und C. Greiner, Künstliche Intelligenz entfesselt, Bd. 2, Vogel Verlag, 2025.
- [61] United Nations, „Lethal Autonomous Weapon Systems (LAWS). Report of the Secretary-General,“ 2024.
- [62] PromptHub, „OpenAI DevDay 2025 Roundup: Apps, Agents, and the New AI Stack,“ 2025. [Online].
- [63] J. Pearl und D. Mackenzie, The Book of Why: The New Science of Cause and Effect, Basic Books, 2018.
- [64] METR, „Measuring AI ability to complete long tasks. Model Evaluation & Threat Research,“ 2025. [Online]. Available: <https://metr.org/blog/2025-03-19-measuring-ai-ability-to-complete-long-tasks>.
- [65] A. Anup, „AI agents are getting twice as capable every few months,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.anup.io/ai-agents-are-getting-twice-as-capable/>.
- [66] J. Peters, D. Janzing und B. Schölkopf, Elements of Causal Inference: Foundations and Learning Algorithms, MIT Press, 2017.
- [67] B. Schölkopf, „Causality for Machine Learning,“ in Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2022, p. 765–804.

- [68] McKinsey & Company, „The economic potential of generative AI: The next productivity frontier,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-economic-potential-of-generative-ai-the-next-productivity-frontier>.
- [69] OECD, „OECD AI Principles,“ 2021. [Online]. Available: <https://oecd.ai/en/ai-principles>.
- [70] J. Pearl, Causality: Models, Reasoning, and Inference, Bd. 2, Cambridge University Press, 2019.
- [71] R. Chari, P. Mali, M. Moosburner und G. M. Church, „Unraveling CRISPR-Cas9 genome engineering parameters via a library-on-library approach,“ Nat Methods, Bd. 12, pp. 823-826, 2015.
- [72] McKinsey & Company, „The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives,“ 2020.
- [73] OECD, Biotechnology Outlook 2024, OECD Publishing., 2024.
- [74] J. Jumper, R. Evans, A. Pritzel und et al., „Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold,“ Nature, Bd. 596, p. 583–589, 2021.
- [75] Nature Biotechnology, „Emerging technologies in synthetic biology and biomanufacturing,“ Nature Biotechnology, Bd. 41, p. 1253–1260.
- [76] EU, „Horizon Europe Programme 2021–2027: Research and Innovation Framework,“ 2021.
- [77] S. Nakamoto, „Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system,“ 2008.
- [78] V. Buterin, „Ethereum white paper: a next generation smart contract & decentralized application platform,“ 2013.
- [79] C. Cachin, „Architecture of the hyperledger blockchain fabric,“ IBM Research.
- [80] Hyperledger, „About – hyperledger foundation,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.hyperledger.org/about>.
- [81] G. Edelman, „The father of web3 wants you to trust less,“ 11 2021. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20220210233332/https://www.wired.com/story/web3-gavin-wood-interview/>.
- [82] R. Renwick und R. Gleasure, „Those who control the code control the rules: How different perspectives of privacy are being written into the code of blockchain systems,“ Journal of Information Technology, pp. 16-38, 2021.
- [83] R. Beck, C. Müller-Bloch und J. L. King, „Governance in the blockchain economy: A framework and research agenda,“ Journal of the Association for Information Systems, p. 1020–1034, 2018.
- [84] M. Rossi, C. Mueller-Bloch, J. B. Thatcher und R. Beck, „Blockchain research in information systems: Current trends and an inclusive future research agenda,“ Journal of the Association for Information Systems, p. 1388–1403, 2019.
- [85] V. Babich und G. Hilary, „Om forum—distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology,“ Manufacturing & Service Operations Management, p. 223–240, 2020.
- [86] W. & S. Lumineau, „Blockchain Governance - A New Qay of Organizing Collaborations?,“ Organization Science, Bd. 32, Nr. 2, pp. 500-521, 2021.
- [87] S. Akter und S. Reno, „Achieving scalable and decentralized blockchain systems: a filecoin-based solution to the blockchain trilemma,“ Journal of King Saud University Computer and Information Sciences, Bd. 37, Nr. 159, 2025.
- [88] S. Susnjara und L. Smalley, „Was ist Blockchain?,“ IBM Think, [Online]. Available: <https://www.ibm.com/de-de/think/topics/blockchain>. [Zugriff am 06 10 2025].
- [89] Gartner Research, „Hype Cycle for Web3 and Blockchain, 2024,“ 29 07 2024. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/documents/5623191>. [Zugriff am 08 10 2025].
- [90] L. Beckenbauer und T. Haverland, „Synergien von Blockchain und KI,“ Konrad Adenauer Stiftung, 2024.

- [91] ENISA, „Best Practices for Cyber Crisis Management,” European Union Agency for Cybersecurity, 2024. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/best-practices-for-cyber-crisis-management>.
- [92] NIST, „Special Publication 800-207: Zero Trust Architecture. National Institute of Standards and Technology,” 2020. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/specialpublications/NIST.SP.800-207.pdf>.
- [93] ETSI, „NFV-SEC 013: Trusted Execution Environment (TEE),” European Telecommunications Standards Institute, 2021. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/nfv-sec/001_099/013/03.01.01_60/gs_nfv-sec013v030101p.pdf.
- [94] NIST, „Post-Quantum Cryptography Standardization Project,” 2024. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>.
- [95] Europäische Kommission, „NIS2 Richtlinie,” 2022. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022L2555>.
- [96] Europäische Kommission, „Cyber Resilience Act,” 2024. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202402847.
- [97] Europäische Kommission, „EU AI Act,” 2024. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401689.
- [98] ENISA, „Best Practices for Cyber Crisis Management,” European Union Agency for Cybersecurity, 2024. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/best-practices-for-cyber-crisis-management>.
- [99] NIST, „Post-Quantum Cryptography Standardization Project,” 2024. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>.
- [100] R. Sommer, V. Paxson und A. Chattopadhyay, „AI for Cybersecurity: Threats and Opportunities,” Communications of the ACM, Bd. 64, Nr. 6, pp. 22-24, 2021.
- [101] ENISA, „ENISA Threat Landscape 2022,” European Union Agency for Cybersecurity, 2024. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2022>.
- [102] ENISA, „Report on the state of cybersecurity in the union,” European Union Agency for Cybersecurity, 2024. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/2024-11/2024%20Report%20on%20the%20State%20of%20the%20Cybersecurity%20in%20the%20Union.pdf>.
- [103] IBM Security & Ponemon Institute, „Cost of a Data Breach Report 2024,” 2024.
- [104] World Economic Forum, „Future of Jobs Report,” 2024. [Online]. Available: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_Report_2025.pdf.
- [105] Y. N. Harari, 21 Lessons for the 21st Century, London: Vintage, 2018.
- [106] Europäische Kommission, „2030 Digital Decade. Report on the state of the digital decade,” 2023. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_de.
- [107] E. Brynjolfsson und A. McAfee, The Second Machine Age – Wie die nächste digitale Revolution unser aller Leben verändern wird, München: Plassen Verlag, 2014.
- [108] J. Rifkin, Der globale Green New Deal, Frankfurt am Main: Campus Verlag, 2019.
- [109] J. A. Schumpeter, Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie, Stuttgart: UTB, 1942/2005.
- [110] J. L. Hennessy und D. A. Patterson, Computer Architecture: A Quantitative Approach, 6th ed., San Francisco, CA, United States: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2019.
- [111] Y. Huang und J. Lee, „The Emerging Role of FPGAs in AI Workloads,” IEEE Micro, Bd. 41(5), 2021.
- [112] Deloitte, „XR in the Enterprise – Adoption and Impact,” 2024. [Online].
- [113] Harvard Business Review, „How XR is Transforming Business and Society,” 2023. [Online].

- [114] European Commission, „About the initiative - EU Digital Identity Wallet,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/spaces/EUDIGITALIDENTITYWALLET/pages/694487832/About+the+initiative>.
- [115] Heidelberg Materials, „Carbon Capture and Storage and Utilisation Projects,“ 2024. [Online].
- [116] OECD, „Circular Carbon Economy – Integrating Capture, Utilisation and Storage,“ 2023. [Online].
- [117] European Commission, „LEILAC 2 Project – Low Emissions Intensity Lime and Cement,“ 2024. [Online].
- [118] Clean Energy Wire, „Germany slightly reduced rare earth reliance on China in 2024, export controls loom,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.cleanenergywire.org/news/germany-slightly-reduced-rare-earth-reliance-china-2024-export-controls-loom?>
- [119] University of Leeds, „Breakthrough magnet produced from sustainable materials. University of Leeds,“ 2020. [Online]. Available: <https://eps.leeds.ac.uk/faculty-engineering-physical-sciences/news/article/5624/breakthrough-magnet-produced-from-sustainable-materials>.
- [120] University of Cambridge, „Scientists develop scalable production method for rare-earth-free magnetic alloy Tetrataenite,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.cam.ac.uk/research/news/new-approach-to-cosmic-magnet-manufacturing-could-reduce-reliance-on-rare-earths-in-low-carbon>.
- [121] Association, SIA – Semiconductor Industry, „State of the U.S. Semiconductor Industry,“ 2022. [Online]. Available: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2022/11/SIA_State-of-Industry-Report_Nov-2022.pdf. [Zugriff am 15 09 2025].
- [122] J. Zhang et al., „Designing synthetic genomes: An overview of principles and progress,“ Cell, pp. 611-623, 2020.
- [123] T. Bauer et al., „Thermochemical Energy Storage Based on the CaO/CaCO₃ Cycle – Review and Outlook,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021.
- [124] I. Dullaert, K. Weitzberg, E. Schoemaker und A. Martin, „The European Digital Identity Wallet: Why It Matters and to Whom,“ Caribou Digital Publishing, Farnham, Surrey, United Kingdom, 2024.