



# VISION: 2045

zur klimaneutralen Produktion  
mit Digitalisierung

## Vorwort

# Warum klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung?

Wir haben eine digitale Lösung gefragt,  
und die Digitalisierung hat geantwortet \*

„Eine klimaneutrale Produktion ist aus mehreren Gründen wichtig:

- 1 Umweltschutz:** Der Klimawandel ist eine große ökologische Herausforderung, die den Planeten auf vielfältige Weise beeinflusst. Eine klimaneutrale Produktion trägt dazu bei, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Produktion zu reduzieren und die negativen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt zu mindern.
- 2 Erfüllung der Verbrauchernachfrage:** Verbraucher werden sich der Auswirkungen ihrer Kaufentscheidungen auf die Umwelt immer bewusster. Eine klimaneutrale Produktion hilft Unternehmen, der wachsenden Nachfrage nach nachhaltigen und umweltfreundlichen Produkten gerecht zu werden.
- 3 Kosteneinsparungen:** Die Umsetzung klimaneutraler Produktionsverfahren kann zu Kosteneinsparungen führen, da Unternehmen ihren Energieverbrauch senken, die Ressourcennutzung verbessern und Abfall minimieren können.
- 4 Wettbewerbsvorteil:** Unternehmen, die einen klimaneutralen Produktionsansatz verfolgen, können sich von ihren Wettbewerbern abheben und einen Wettbewerbsvorteil am Markt erlangen.
- 5 Erfüllung rechtlicher Verpflichtungen:** Regierungen auf der ganzen Welt erlassen Gesetze, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren und nachhaltige Praktiken zu fördern. Ein klimaneutraler Produktionsansatz hilft Unternehmen, diese gesetzlichen Verpflichtungen zu erfüllen und mögliche Strafen zu vermeiden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine klimaneutrale Produktion wichtig ist, um die Umwelt zu schützen, die Nachfrage der Verbraucher zu befriedigen, Kosten zu senken, einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen und gesetzliche Verpflichtungen einzuhalten.

**Die Umsetzung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung bietet dabei mehrere Vorteile:**

- 1 **Effizienzsteigerung:** Die Digitalisierung ermöglicht eine Echtzeitüberwachung und -analyse von Produktionsprozessen, was eine höhere Effizienz und Optimierung des Energie- und Ressourceneinsatzes ermöglicht.
- 2 **Verbesserte Transparenz:** Digitale Technologien können den Produktionsprozess transparenter machen und es Unternehmen ermöglichen, Verbesserungspotenziale in Bezug auf Nachhaltigkeit und Emissionsreduzierung zu identifizieren und anzugehen.
- 3 **Verbesserte Entscheidungsfindung:** Die Digitalisierung bietet Zugang zu einer Fülle von Daten und Erkenntnissen, die Entscheidungen über die Reduzierung von Emissionen und die Einführung nachhaltigerer Praktiken treffen können.
- 4 **Automatisierung und Optimierung:** Digitale Technologien können Produktionsprozesse automatisieren und optimieren, Energieverschwendung reduzieren und die Effizienz steigern.
- 5 **Skalierbarkeit:** Digitale Technologien lassen sich problemlos auf die Bedürfnisse von Unternehmen jeder Größe skalieren und erleichtern so kleinen und mittelständischen Unternehmen den Weg zu einer klimaneutralen Produktion.

Zusammenfassend kann die Umsetzung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung Effizienzsteigerung, verbesserte Transparenz, verbesserte Entscheidungsfindung, Automatisierung und Optimierung sowie Skalierbarkeit bieten und Unternehmen dabei helfen, ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu reduzieren und Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.“



*\* Dieser Text wurde von ChatGPT verfasst.*

## Statements der Sprecher

*„Die Produktion in Deutschland ist eines der wichtigsten Standbeine unseres Wohlstands. Gleichzeitig zeichnet sie auch für einen beträchtlichen Anteil der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Durch eine klimaneutrale Produktion können wir Wohlstand bewahren und das Klima für künftige Generationen schützen. Die vorliegende Roadmap zeigt, wie dies unter intensiver Nutzung der digitalen Möglichkeiten erreichbar ist. Ein Folgen der Roadmap wird also entscheidend für den Zukunftsstandort Deutschland sein.“*



**Prof. Dr.-Ing. Joachim Schenk,**  
wissenschaftlicher Sprecher der Themenplattform  
Digitalisierung im Energiebereich

*„Die Industrie der Zukunft wird vollständig mit regenerativen Energien versorgt, Speicher stellen gesicherte Leistung zur Verfügung. Durch digitale Techniken werden Produktionstechnik und Energieversorgung miteinander verzahnt, Verbrauch und Energieangebot aufeinander abgestimmt und Netze entlastet. Die Roadmap gibt hierfür wichtige Impulse.“*



**Dr.-Ing. Roland Hofer,**  
wirtschaftlicher Sprecher der Themenplattform  
Digitalisierung im Energiebereich

*„Es ist eines der dringendsten Themen unserer Zeit, dem wir uns annehmen müssen: der Einsatz von neuen Technologien, um eine klimaneutrale Produktion zu ermöglichen. Aber es ist auch ein herausforderndes, komplexes Thema. Verschiedenste Technologien und Akteure stehen in kontinuierlicher Wechselwirkung zueinander. Die Roadmap hilft, die Komplexität dieser Prozesse zu verdeutlichen und zu verstehen, und ermöglicht dem Ökosystem aus Energiewirtschaft, Industrie, Verbänden und Politik, strukturierte Lösungen zu entwerfen.“*



**Prof. Dr. Gordon Thomas Rohrmair,**  
wissenschaftlicher Sprecher der Themenplattform  
Digital Production & Engineering

*„Eine klimaneutrale Produktion bis 2045 zu erreichen ist eine äußerst komplexe und interdisziplinär zu bewältigende Aufgabe. Lange Planungsphasen, ein breiter Branchen-Mix sowie vielfältigste industrielle Produktionsprozesse sind zu berücksichtigen. Durch gezielten und vermehrten Einsatz von Digitalisierung, maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz lassen sich die notwendigen Prozesse hinsichtlich Klimaneutralität optimieren. Mit einem Digitalen Zwilling von Produkt und Produktion lässt sich eine nachhaltige Produktion frühzeitig und sicher planen. Aus der Sicht der Produktentwicklung und Produktion ist es daher essenziell, einen Leitfaden an die Hand zu bekommen, der das Handeln der beteiligten Stakeholder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zu koordinieren hilft.“*



**Florian Ganz,**  
wirtschaftlicher Sprecher der Themenplattform  
Digital Production & Engineering

## Executive Summary

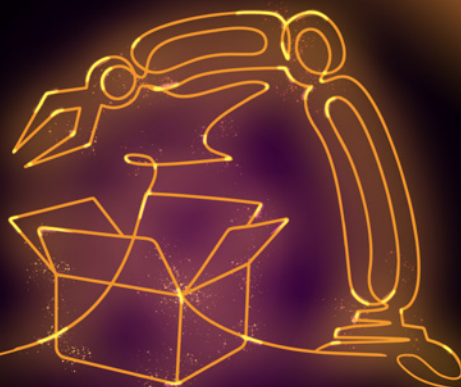
Deutschland soll bis zum Jahr 2045 klimaneutral werden. Für die Erreichung dieses Ziels legen Wissenschaft, Industrie und Politik große Erwartungen in die Möglichkeiten der Digitalisierung. Wie genau der Weg zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung für das Gesamtsystem aus Energiewirtschaft und Industrie aussehen kann, ist jedoch unklar. Die Strategieroadmap „Vision: 2045 – zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung“ zeigt einen strukturierten und ganzheitlichen Weg, um das genannte Ziel zu erreichen. Die Roadmap wurde im Rahmen mehrerer Workshops und Interviews mit Expertinnen und Experten erarbeitet. Die Ergebnisse dieser Befragungen wurden mit Praxisbeispielen und entsprechender Literatur ergänzt.

**Die Studie zeigt in den drei Teilen,**

> TREIBER UND TRENDS



> ANWENDUNGSFELDER



> RAHMENBEDINGUNGEN



wie der Weg zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung im Jahr 2045 aussehen kann. Konkret veranschaulicht die Roadmap, welche Faktoren sich auf die Erreichung der Vision auswirken, welche digitalen Anwendungen eingesetzt werden können, um die Vision zu erreichen, und welche Rahmenbedingungen geschaffen werden sollten, um die Erreichung der Vision zu ermöglichen. Die Einschätzung der Expertinnen und Experten ergänzt um die Praxisbeispiele gibt den Lesenden der Roadmap ein strategisches Planungstool an die Hand.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass viele digitale Anwendungen für eine klimaneutrale Produktion bereits heute vorhanden sind und vereinzelt sogar bereits klimaneutrale Produktionen in Bayern betrieben werden. Unternehmen bietet die Studie eine Übersicht darüber, welche dieser Anwendungen vorhanden sind, und ermöglicht so eine Auswahl passender Lösungen auf Basis der spezifischen Anforderungen und der Ausgangssituation. Die Roadmap verdeutlicht außerdem, dass eine enge Vernetzung von Energieerzeugern, Energienetzbetreibern und Produktionsunternehmen in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird, um die Versorgungssicherheit zu stärken und die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu sichern. Wissenschaft, Industrie und Politik erhalten in der Studie eine Übersicht, in welchen Bereichen, wie beispielsweise der Weiterentwicklung digitaler Technologien und dem Aufbau von Infrastruktur, ein positiver Beitrag zur Erreichung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung geleistet werden kann.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel der Roadmap</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Klimaneutrale Produktion – Status Quo</b>	<b>11</b>
2.1	Produktion in Deutschland	11
2.2	Der Weg zur klimaneutralen Produktion und die Rolle der Digitalisierung	12
<b>3</b>	<b>Klimaneutrale Produktion – Vision 2045</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Mit der Roadmap zur Vision</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Roadmap zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung 2045</b>	<b>19</b>
<b>5.1</b>	<b>Layer 1: Treiber &amp; Trends</b>	<b>19</b>
5.1.1	Soziokulturell	20
5.1.2	Technologisch	21
5.1.3	Ökonomisch	24
5.1.4	Ökologisch	27
5.1.5	Politisch	29
<b>5.2</b>	<b>Layer 2: Anwendungsfelder</b>	<b>33</b>
5.2.1	Standardisierung und Dateninfrastruktur	34
5.2.2	Simulationen und Prognosen	36
5.2.3	Planung und Prozesse	38
5.2.4	Produktdesign und Engineering	43
5.2.5	Energiesysteme und Energiemanagement	45
5.2.6	Speicheranwendungen	47
5.2.7	R-Strategien	48
5.2.8	Geschäftsmodelle	50

<b>5.3</b>	<b>LAYER 3: Rahmenbedingungen</b>	<b>53</b>
5.3.1	Nicht digitale Technologien	54
5.3.2	Digitale Technologien	58
5.3.3	Infrastruktur	66
5.3.4	Regulatorische Rahmenbedingungen	68
5.3.5	Awareness bei produzierenden Unternehmen und Transfer in eine breite Anwendung	69
5.3.6	Mindset bei Unternehmen und Konsumenten	70
5.3.7	Kompetenzen und Wissen bei Fachkräften	70
5.3.8	Betriebswirtschaftlicher Fortschritt	71
5.3.9	Volkswirtschaftlicher Fortschritt	72
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>75</b>
	Literaturverzeichnis	78
	Beteiligte Expertinnen und Experten	94
	Abbildungsverzeichnis	98
	Projektteam	99

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AAS</b>	Asset Administration Shell
<b>AI</b>	Artificial Intelligence
<b>AR</b>	Augmented Reality
<b>B2C</b>	Business to consumer
<b>BCG</b>	Boston Consulting Group
<b>BDEW</b>	Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft
<b>BDI</b>	Bundesverband der Industrie
<b>BEW</b>	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BMWK</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
<b>C2C</b>	Cradle-to-Cradle
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CBAM</b>	Carbon Border Adjustment Mechanism
<b>CCS</b>	Carbon capture and storage
<b>CCU</b>	Carbon capture and utilisation
<b>DDP</b>	Digitaler Produktpass
<b>DLT</b>	Distributed Ledger Technology
<b>EMAS</b>	Eco-Management and Audit scheme
<b>ERP</b>	Enterprise Resource Planning
<b>FTS</b>	Fahrerloses Transportsystem
<b>GHGP</b>	Greenhouse Gas Protocol
<b>IIoT</b>	Industrial Internet of Things



## | VISION: 2045

<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnik
<b>IML</b>	Institut für Materialfluss und Logistik
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>KMU</b>	Kleines und mittelständisches Unternehmen
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>MSB</b>	Messstellenbetreiber
<b>OPC UA</b>	Open platform communications unified architecture
<b>OT</b>	Operational technology
<b>PCF</b>	Product Carbon Footprint
<b>PCM</b>	Phasenwechselmaterialien
<b>PDM</b>	Produktdatenmanagement
<b>PIK</b>	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
<b>PLM</b>	Product-Lifecycle-Management
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>StMWK</b>	Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
<b>VDE</b>	Verband der Elektrotechnik
<b>VDMA</b>	Verband Deutscher Maschinen und Anlagebau
<b>VNB</b>	Verteilnetzbetreiber
<b>VR</b>	Virtual Reality
<b>WEF</b>	World Economic Forum
<b>XR</b>	Extended Reality

# 1 Ziel der Roadmap

Digitalisierung, ökologische Nachhaltigkeit und Produktion – drei große Themen und ein gemeinsames Ziel: Eine klimaneutrale Produktion durch Digitalisierung bis 2045. Und genau hier liegt der Startpunkt der vorliegenden Roadmap.

Deutschland soll bis 2045 klimaneutral werden (Bundesregierung, 2022 a) – mit dieser Vision vor Augen öffnen sich zahlreiche Chancen und Herausforderungen. Insbesondere die deutsche Industrie ist gefragt, eine erneute industrielle Revolution einzuleiten, um die Klimaneutralität sicherzustellen und Deutschland als Industrieland weiter voranzubringen. Digitale Technologien sollen hier einen erheblichen Beitrag leisten, sodass digitalen Lösungen und Innovationen eine hohe Bedeutung zugeschrieben wird.

Eine klimaneutrale Produktion mittels digitaler Technologien bezieht sich hierbei auf den Einsatz digitaler Technologien, um die Produktion in einer Weise zu gestalten, die keine negativen Auswirkungen auf das Klima hat. Dies beinhaltet die Verwendung von digitalen Tools, um die Emissionen von Treibhausgasen zu minimieren, den Einsatz erneuerbarer Energiequellen zu erhöhen und Ressourceneffizienz zu steigern.

Die Notwendigkeit der Klimaneutralität ist unbestritten und der Nutzen digitaler Lösungen ebenfalls, und dennoch steht die deutsche Industrie vor der Mammutaufgabe, die Produktion vollständig klimaneutral umzusetzen. Der genaue Weg zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung ist dabei unklar.

Die vorliegende Roadmap soll einzelnen Unternehmen und der Industrie als Ganzes übersichtliche Informationen und einen Fahrplan zur Nutzung digitaler Technologien für die Erreichung einer klimaneutralen Produktion bieten. Um die Vision zu erreichen und den Weg dahin aufzuzeigen, ist eine ganzheitliche Betrachtung von Energie- und Produktionsthemen notwendig. Damit ergeben sich auch offene Fragen:

- Welche Treiber wirken sich auf eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung aus?
- Welche Anwendungsfelder lassen sich erschließen?
- Welche Rolle spielen digitale Technologien?
- Welche Rahmenbedingungen müssen geschaffen sein?

Die vorliegende Roadmap bietet eine Übersicht konkreter Anwendungen digitaler Technologien, die Unternehmen für die Entwicklung zur klimaneutralen Produktion einsetzen können. Gleichzeitig werden Treiber und Rahmenbedingungen beleuchtet, die den Einsatz beeinflussen könnten. Für die realistischen Einsatzmöglichkeiten wird ebenfalls die zeitliche Einordnung hinsichtlich des Entwicklungsstands der Technologien und deren Anwendungen für spezifische Zwecke aufgezeigt.

## 2 Klimaneutrale Produktion – Status quo

### 2.1 Produktion in Deutschland

Das verarbeitende Gewerbe erwirtschaftet mit einem Gesamtumsatz von 1.984,5 Milliarden Euro rund 20 Prozent der Bruttowertschöpfung in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2022 a). Dabei bilden der (Straßen ) Fahrzeugbau, die chemische Industrie, der Maschinenbau und die Elektroindustrie die vier größten Industriezweige (ZVEI e. V., 2021). Interessanterweise ist die überwiegende Anzahl der Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe den sogenannten kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) zuzuordnen, da nur rund 1,65 Prozent der Unternehmen (das Baugewerbe nicht miteingerechnet) mehr als 250 Beschäftigte haben (Statistisches Bundesamt, o. D.). Damit bilden die KMU auch hier das Rückgrat der Wirtschaft, vor allem in Bezug auf die vielen hoch spezialisierten mittelständischen Unternehmen (Hidden Champions), die hier aktiv sind.

In Bezug auf den Energieverbrauch stellt sich die Lage wie folgt dar: Während die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2020 in Deutschland rund 605 Megatonnen CO<sub>2</sub> insgesamt betrugten, entfallen rund 119 Megatonnen CO<sub>2</sub> auf das verarbeitende Gewerbe (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020).

Zum heutigen Zeitpunkt ist der Digitalisierungsgrad in der Produktion bei KMU meist nicht so hoch wie bei Großunternehmen. Dies liegt an unterschiedlichsten Gründen:

- KMU sind oft hoch spezialisierte Unternehmen mit sehr spezifischen Bedarfen an IT-Systeme
- KMU lagern ihre IT häufig an externe Dienstleister aus
- Zum Teil sind hohe Investitionskosten in umfangreiche IT-Systeme notwendig
- Es liegt ein sehr vielfältiger Anbietermarkt vor
- In KMU liegen gewachsene Unternehmensstrukturen mit unterschiedlichsten Maschinen, Anlagen und Systemen vor, die nur sehr aufwendig zu vereinheitlichen/digitalisieren sind

## 2.2 Der Weg zur klimaneutralen Produktion und die Rolle der Digitalisierung

In den vergangenen Jahren sind zahlreiche Studien erschienen, die sich mit der Frage beschäftigen, wie die Entwicklung hin zu einer klimaneutralen Industrie aussehen kann. Hierzu zählt zum Beispiel die im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI) von der Boston Consulting Group (BCG) erarbeitete Studie „Klimapfade 2.0“ aus dem Jahr 2021 (Bundesverband der Deutschen Industrie, 2021 a). Die Studie schildert unter anderem die Klimapfade, auf denen sich die Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und Energiewirtschaft hin zu einer Klimaneutralität im Jahr 2045 entwickeln können, und beschreibt für die Industrie beispielsweise den Entwicklungsbedarf in der industriellen Wärmeproduktion sowie in den Prozessindustrien Stahlerzeugung, Aluminiumindustrie und Grundstoffchemie. Auch die im Jahr 2019 veröffentlichte Studie „Klimaneutrale Industrie“ der Agora Energiewende und des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie bietet einen umfangreichen Überblick, mit welchen Schlüsseltechnologien und Politikoptionen sich die Grundstoffindustrien Stahl, Chemie und Zement hin zur Klimaneutralität entwickeln können, und schildert dabei auch konkrete Strategien für beispielsweise eine Elektrifizierung, den Einsatz von grünem Wasserstoff sowie eine Erhöhung der Materialeffizienz (Agora Energiewende; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2020). Weitere umfangreiche Studien mit ähnlichem inhaltlichem Schwerpunkt sind „CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5°C-Grenze“ des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie aus dem Jahr 2020 (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2020), „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045: Szenarien und Pfade im Modellvergleich“ des Kopernikus-Projekts Ariadne am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) aus dem Jahr 2021 (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021) sowie „Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement“ von acatech, Leopoldina und Akademienunion aus dem Jahr 2023 (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Leopoldina, Akademienunion, 2023).

In Summe bilden diese Studien eine gute Ausgangslage für eine strukturierte Entwicklung zu einer klimaneutralen Industrie im Jahr 2045. Die Rolle, die digitale Technologien bei der Entwicklung zu einer klimaneutralen Industrie spielen können, wird in diesen Studien jedoch – wenn überhaupt – nur sehr abstrakt diskutiert. So nennt die Studie „Klimapfade 2.0“ zum Beispiel eine konsequente Vernetzung mittels Digitalisierung als eine Maßnahme für die Realisierung von Effizienzsteigerungen in der Industrie, beschreibt jedoch nicht näher, mit welchen digitalen Anwendungen dies realisiert werden kann.

Gleichzeitig sind in den vergangenen Jahren zahlreiche Studien erschienen, die dem Einsatz digitaler Technologien eine wichtige Rolle bei der Realisierung einer klimaneutralen Industrie zusprechen. Laut einer Studie des Branchenverbands der deutschen Informations- und Telekommunikationsbranche Bitkom (2021 b) bietet die Digitalisierung zum Beispiel ein enormes Einsparpotenzial im Hinblick auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß generell und im Speziellen in der Fertigung. So schätzt die Studie das Einsparpotenzial von CO<sub>2</sub> bei einer beschleunigten Digitalisierung bis 2030 in der Automatisierung der Produktion auf rund 31 Megatonnen, während sie bei der Anwendung des Digitalen Zwillings bei rund 33 Megatonnen CO<sub>2</sub> liegt. Die Werte halbieren sich in etwa, wenn von einer moderaten Digitalisierung gesprochen wird. Die Zahlen zeigen anschaulich, welches Potenzial in der Vernetzung von Anlagen und der virtuellen Abbildung von Prozessen und Zyklen liegt.

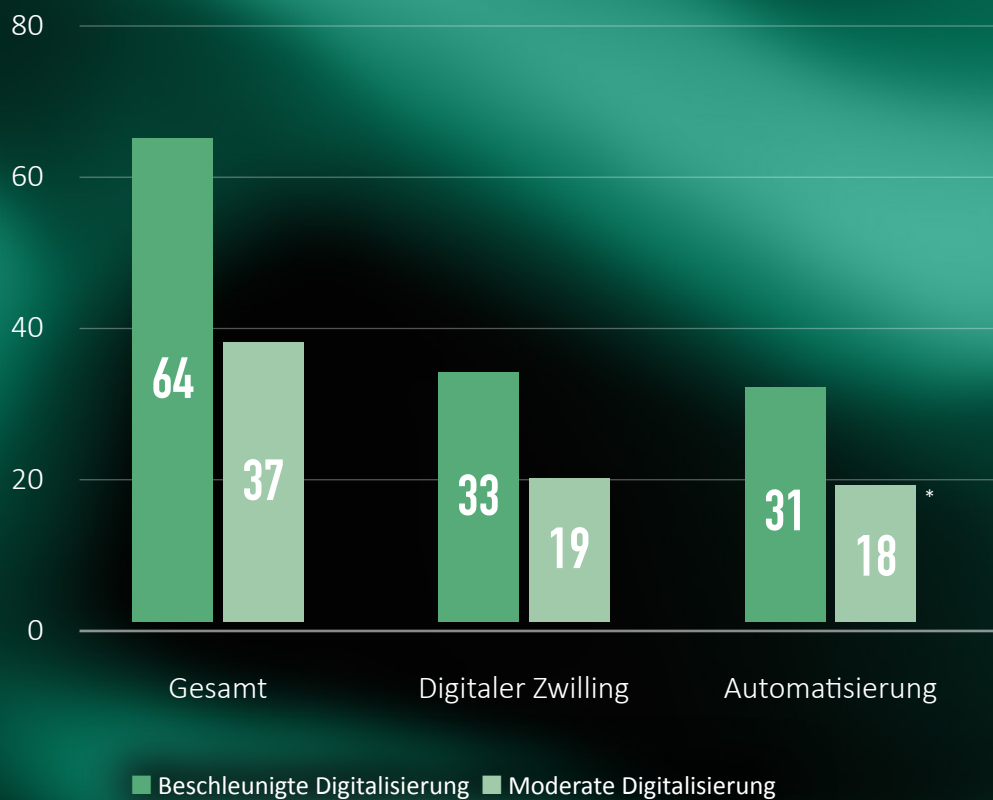
## Anwendungen

### Automatisierung in der Produktion

- Vernetzung von Anlagen und Maschinen, Werkstücke, der Bauteile und Prozesse unter möglichst geringem Material- und Energieeinsatz

### Digitaler Zwilling

- Virtuelles Abbild vom kompletten Produktions- und Betriebszyklen Verfahren zunächst digital statt am realen Objekt testen
- Einsparung von Material, Energie und Ressourcen



\* In Anlehnung an Bitkom (2021 b, S. 18)



Auch die Publikation „How Tech and Telecom Can Create a Triple Win in Green“ der Boston Consulting Group (BCG) schreibt dem Einsatz digitaler Technologien in der Produktion ein großes Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Emissionen zu (Boston Consulting Group, 2023). Bestärkt werden diese Prognosen durch die im Jahr 2021 veröffentlichte Studie „Unlocking Sustainability through Fourth Industrial Revolution Technologies“ des World Economic Forum (WEF) (2021), die zeigt, dass die im „Global Lighthouse Network“ zusammengestellten Industrie-4.0-Vorzeigefabriken nicht nur wirtschaftliche Zielstellungen erreichen, sondern die dort eingesetzten digitalen Technologien auch einen Beitrag zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit dieser Fabriken leisten. Welchen konkreten Beitrag digitale Technologien zu mehr ökologischer Nachhaltigkeit leisten können, zeigt die Publikation „Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten“ der Plattform Industrie 4.0 anhand von drei konkreten Anwendungsbereichen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020). Auch die Studien „Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz“ des VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2021) und „KI und Nachhaltigkeit“ der Plattform Lernende Systeme zeigen anhand von konkreten Beispielen, was digitale Technologien – in diesem Fall ganz konkret die Künstliche Intelligenz (KI) – zu einer ökologisch nachhaltigeren Industrie beitragen können (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2021). Einen Gesamtüberblick darüber, wie digitale Technologien konkret eingesetzt werden können, um das Ziel einer klimaneutralen Produktion zu erreichen, bietet jedoch keine der bisher veröffentlichten Studien.

In Summe kann festgehalten werden, dass die Erwartungen und Prognosen bezüglich des Anteils, den digitale Technologien an der Entwicklung hin zu einer klimaneutralen Industrie haben werden, groß sind. Gleichzeitig fehlt jedoch ein Gesamtüberblick darüber, wie dieser Anteil genau aussehen und realisiert werden kann. Damit insbesondere KMU die Potenziale der Digitalisierung für ihre ganz individuelle Entwicklung zu einer klimaneutralen Produktion bestmöglich erschließen können, scheint ein solcher Überblick jedoch ein wichtiger Baustein zu sein. Es gilt, die Herausforderungen des produzierenden Gewerbes zu meistern und mit digitalen Technologien in Einklang zu bringen, um das Potenzial auszuschöpfen, das die klimaneutrale Produktion für Mensch, Unternehmen und Natur bringt.

## 3 Klimaneutrale Produktion – Vision 2045

Mit der „Vision 2045 – zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung“ verfolgt die vorliegende Roadmap das Ziel, den Weg zu einer vollständig klimaneutralen Produktion ins Zieljahr aufzuzeigen. Die klimaneutrale Produktion mittels digitaler Technologien bezieht sich hierbei auf den Einsatz digitaler Technologien, um die Produktion so aufzustellen, dass negative Auswirkungen auf das Klima ausgeschlossen werden.

Diese positive Zukunftsvision stellt gleichzeitig ein komplexes Unterfangen dar. Es existieren bereits zahlreiche Technologien und Anwendungen, die Einsatz in der Produktion finden. Darüber hinaus wird im Rahmen dieser Studie die Annahme getroffen, dass im Jahr 2045 alle notwendigen technologischen Lösungen zur Erzeugung, Speicherung und Umwandlung von klimaneutraler Energie vorhanden sein werden, deren Einsatz jedoch nach wie vor mit (schwankenden) Kosten verbunden ist, sodass der effiziente Energieverbrauch und -einsatz auch 2045 noch ein wichtiges Ziel darstellen wird.

Insgesamt fehlt das sogenannte „big picture“, das große Bild, das aufzeigt, welche Rolle Digitalisierung auf dem Weg zu einer klimaneutralen Produktion 2045 spielen kann. Somit werden in dieser Vision Produktion und Energieerzeugung als Ganzes betrachtet. Die Akteure beider Seiten erreichen nur gemeinsam das Ziel. Da die Berechnung der Einsparpotenziale einzelner Anwendungsfelder sehr stark von dem jeweiligen Produktionsprozess und dem entstehenden Produkt abhängt, wird keine Berechnung der Einsparpotenziale einzelner Anwendungen vorgenommen.

### **Um dieses zu erreichen, wird der folgende Fokus gesetzt:**

- keine Erzeugung von „Scope 1 & Scope 2“-Emissionen (somit Fokus auf eigenen Handlungsspielraum des Unternehmens) ohne Kompensation<sup>1</sup>
- die Energiebereitstellung erfolgt in allen Bereichen klimaneutral
- Betrachtung des Gesamtsystems von Energieerzeugung und -verbrauch
- verarbeitendes Gewerbe, nicht zwingend auf energieintensiver Industrie

Die Vision kann nur erreicht werden,  
wenn dieses komplexe Thema anschaulich und ganzheitlich betrachtet wird.

---

<sup>1</sup> Bei der Betrachtung von Treibhausgasemissionen wird in der Regel in Emissionen des Scope 1, 2 und 3 unterschieden. Der Scope 1 bezieht sich auf Emissionen aus Quellen, die direkt im Besitz oder Geltungsbereich der betrachteten Organisation sind (z. B. Betrieb eines eigenen Heizkessels). Der Scope 2 bezieht sich auf Emissionen aus der Nutzung von Energie, die eine Organisation einkauft (z. B. Strom und Wärme). Der Scope 3 bezieht sich auf Emissionen, die aus Aktivitäten resultieren, die nicht direkt zur betrachteten Organisation gehören (z. B. aus Zukaufteilen oder Geschäftsreisen) (Stiftung Allianz für Entwicklung und Klima, o. D.).

## 4 Mit der Roadmap zur Vision

Zur Umsetzung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung bildet die Auseinandersetzung mit der derzeitigen Situation und den notwendigen Entwicklungsschritten die Basis. Damit dies gelingt, wird eine strategische Roadmap erarbeitet. Eine Roadmap ist ein Planungstool aus dem Strategiebereich, das in einem Zeitstrahl die Entwicklung (von Strategien, Produkten, Technologien etc.) vom Status quo zu einem zukünftigen Zeitpunkt aufzeigt (Bayern Innovativ, o. D. a). Um dieser umfassenden Betrachtung Rechnung zu tragen, werden die Beweggründe für Entwicklungen, die notwendigen Anwendungen, Produkte und Prozesse sowie dafür benötigte Ressourcen, Infrastruktur etc. in eine zeitliche Abfolge gesetzt. Die Inhalte werden als sogenannte Dimensionen auf der Roadmap dargelegt und in Verbindung sowie Abhängigkeiten zueinander gesetzt (Phaal, Simonse, & Den Ouden, 2008). Die so entstandene Roadmap stellt nun ein Abbild einer nachvollziehbaren und strategischen Entwicklung hin zu einer Vision dar. Für die Erstellung der Roadmap wurde ein qualitativer, partizipativer Ansatz gewählt, um eine möglichst detaillierte und anwendungsorientierte Roadmap zu erarbeiten. Im Vorfeld des eigentlichen Roadmappings wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, die den Grundstein für den Prozess legte sowie der Erarbeitung der Roadmap-Struktur diente. Eruiert wurde hierbei Literatur zu den Themengebieten Klimaneutralität, ökologische Nachhaltigkeit, Produktion und Digitalisierung.

Der eigentliche Roadmapping-Prozess wurde im Frühjahr 2022 durchgeführt und beinhaltete unter anderem Interviews mit 17 Expertinnen und Experten sowie einen Workshop mit 22 ausgewählten Expertinnen und Experten. Zusätzlich wurden im Rahmen des Roadmapping-Prozesses drei öffentliche Workshops durchgeführt, an denen insgesamt 23 Personen teilgenommen haben. Die so erarbeiteten Inhalte wurden in mehreren Iterationsschritten überarbeitet und im Hinblick auf Ganzheitlichkeit vervollständigt. Dieses Vorgehen ermöglichte eine ganzheitliche Auseinandersetzung mit der komplexen Thematik sowie die Einbindung unterschiedlicher Stakeholder.

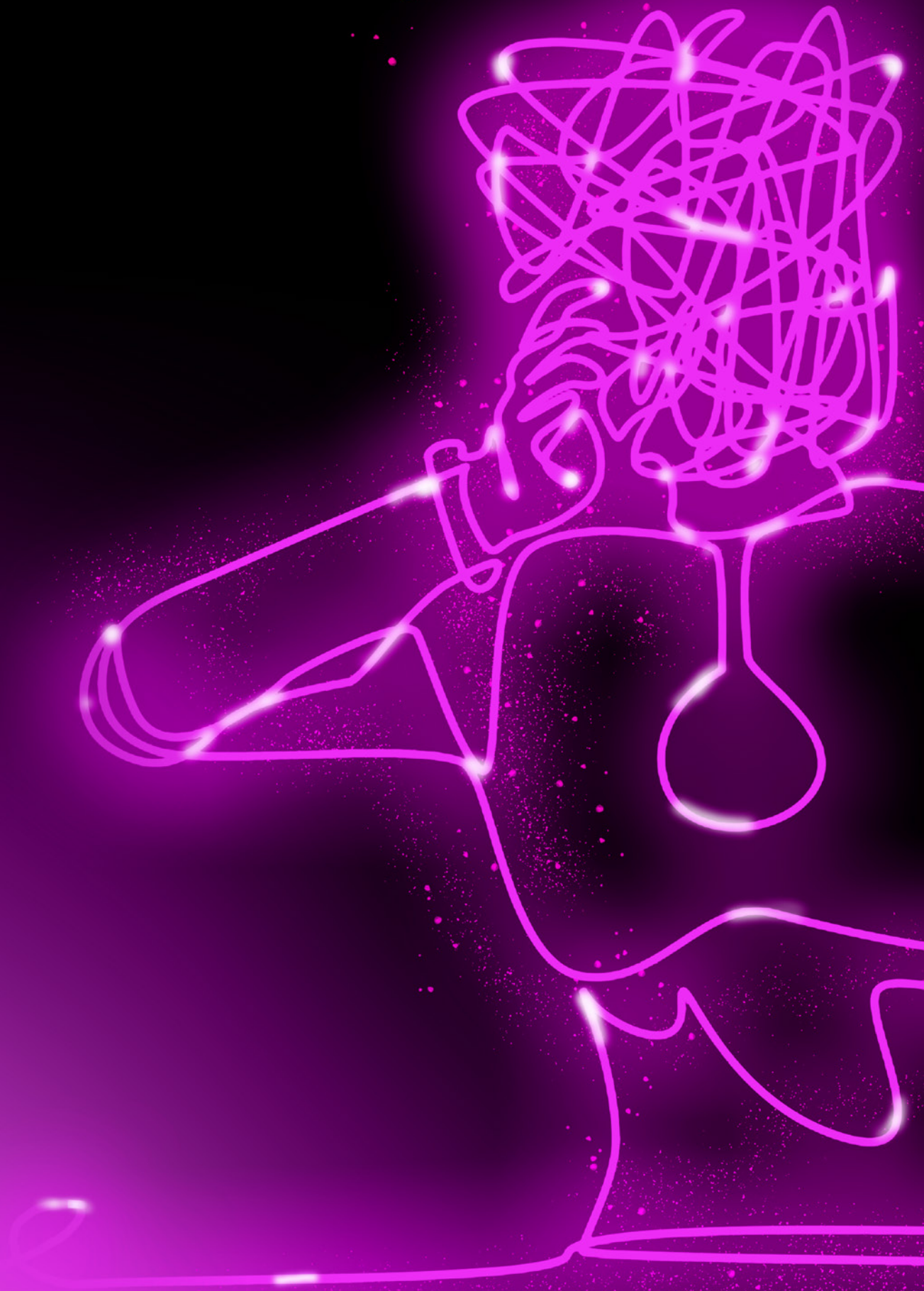
---

<sup>2</sup> Eine Liste der namentlich zu erwähnenden, an den Interviews und dem Workshop beteiligten Expertinnen und Experten ist dem Anhang zu entnehmen.

**Die hier vorgestellte Roadmap widmet sich den folgenden Entwicklungen, die für die Erreichung der Vision zu berücksichtigen sind:**

- **Treiber & Trends**, die die Umsetzung einer klimaneutralen Produktion mittels Digitalisierung bis ins Jahr 2045 treiben oder auch hindern können. Für die bessere Einordnung wird hier auf das Modell STEEP zurückgegriffen (Soziokulturelle, Technologische, Ökonomische, Ökologische und Politische Trends). Hierbei werden explizit Zeiträume hervorgehoben, in denen die „Hype“-Momente beziehungsweise ihre treibende Wirkung dominant sind.
- **Anwendungsfelder**, die angegangen werden müssen, um zum einen eine Antwort auf die treibenden Faktoren zu bieten und zum anderen die Vision zu erreichen. Die Anwendungsfelder werden unterteilt in Standardisierung und Dateninfrastruktur, Simulationen und Vorhersagen, Planung und Prozesse, Produktdesign und Engineering, Energiesysteme und Energiemanagement, Speicheranwendungen, R-Strategien und Geschäftsmodelle.
- **Rahmenbedingungen**, die angegangen werden müssen, um zum einen eine Antwort auf die treibenden Faktoren zu bieten und zum anderen die Vision zu erreichen. Die Anwendungsfelder werden unterteilt in Standardisierung und Dateninfrastruktur, Simulationen und Vorhersagen, Planung und Prozesse, Produktdesign und Engineering, Energiesysteme und Energiemanagement, Speicheranwendungen, R-Strategien und Geschäftsmodelle.

Die Roadmap „Vision 2045 – zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung“ veranschaulicht eine ganzheitliche Entwicklung inklusive der betreffenden Entwicklungsstufen für die Ausrichtung produzierender Unternehmen im Hinblick auf eine CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion.





# 5 Roadmap zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung 2045

## LAYER 1 TREIBER & TRENDS

Der zunehmende soziokulturelle Druck von Konsumentenden und Politik zu mehr ökologischem Handeln und Wirtschaften von Unternehmen ist einer der prägnantesten Treiber für die klimaneutrale Produktion. Aus technologischer Sicht stellen die Sektorenkopplung, durch die Strom-, Wärme- und Gasnetze sowie der Mobilitätssektor miteinander verbunden werden, und die zunehmenden Möglichkeiten des Einsatzes von Künstlicher Intelligenz (KI) zwei zentrale Trends dar. Aus ökonomischer Sicht sind Fachkräfte sowie die Entstehung einer Plattformökonomie bedeutende Trends für die Entwicklung zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung. Ein Großteil der Treiber und Trends wirkt sich bereits heute auf die Entwicklung zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung aus. Layer 1 bietet demnach produzierenden Unternehmen, Akteuren der Energiewirtschaft, Verbänden und Politik eine Übersicht aller externer Faktoren, die sich positiv oder negativ auf den individuellen Weg zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung auswirken können. Diese Übersicht kann Organisationen als Ausgangspunkt dienen, um zu beurteilen, welche Treiber und Trends für die individuelle Ausgangssituation und Entwicklung besonders relevant sind und vertieft betrachtet und adressiert werden sollten.

## 5.1 Layer 1: Treiber & Trends

Im ersten Layer der „Treiber & Trends“ werden all jene betrachtet, die die Umsetzung einer klimaneutralen Produktion mittels Digitalisierung bis ins Jahr 2045 treiben oder auch hindern können. Dabei werden sie für die bessere Übersicht in die STEEP-Kategorien, also Soziokulturelle, Technologische, Ökonomische, Ökologische und Politische Trends, eingeordnet. Weiterhin werden explizit die Zeiträume hervorgehoben, in denen „Hype“-Momente beziehungsweise treibende Wirkungen dominant sind. Zusätzlich werden besonders relevante Bezüge zu [Rahmenbedingungen in Layer 3](#) hervorgehoben.

### 5.1.1 Soziokulturell

**Nachhaltigkeit** ist über die nächsten Jahrzehnte hinweg ein wichtiger Trend für die klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung. Nachhaltigkeit lässt sich konzeptionell in einer Dreidimensionalität beschreiben, bestehend aus der ökologischen, der ökonomischen und der sozialen Nachhaltigkeit (Pufé, 2017). In diesem Zusammenhang stellt **Green Pressure** einen Trend dar, bei welchem seitens der Politik, aber auch durch Konsumierende ein Druck zu mehr ökologischem Handeln und Wirtschaften auf Unternehmen ausgeübt wird (zukunftsInstitut, o. D. c). Dieser Trend zieht sich über die gesamte Laufzeit der Roadmap (2022 – 2045) und stellt das Pendant zur Wahrnehmung der Bepreisung beziehungsweise Notwendigkeit von ökologischen Produkten und Dienstleistungen dar.

◀ S. 43

◀ S. 43

Dies spiegelt sich auch in der **Wahrnehmung der Bepreisung von ökologischen Produkten & Dienstleistungen** (bis circa 2025) wider, welche in eine verstärkte **Wahrnehmung der Notwendigkeit von ökologischen Produkten & Dienstleistungen** (bis 2045) übergeht. In den nächsten Jahren wird es von den Kunden zunächst als finanzielle Bürde angesehen, dass Unternehmen eine höhere Bepreisung von ökologischen Produkten im Vergleich zu konventionell hergestellten Gütern vornehmen, bis sich aufseiten der Unternehmen, aber auch der Kunden die Akzeptanz gegenüber nachhaltig produzierten Produkten und Dienstleistungen etabliert und deren Notwendigkeit und Nachfrage verstetigt hat. Während in der Coronakrise die Nachfrage nach Bioprodukten gestiegen ist, nimmt zur Mitte des Jahres 2022 der Verkauf von Bioprodukten unter anderem aufgrund steigender Preise, bedingt durch die hohe Inflation, ab. Dennoch lässt sich weiterhin ein Trend zu Bioprodukten wahrnehmen, da aktuelle Umsatzeinbußen im Bioproduktbereich nicht so stark ausfallen wie bei den gesamten Konsumgütern. Demnach kaufen Kunden aktuell eher Produkte der Bio-Eigenmarken der Handelsketten anstelle von Produkten der Bio-Markenhersteller (Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2022).

Weiterhin wird sich eine zunehmende **Regionalität** bezüglich der Herstellung und des Konsums von Gütern über die nächsten zwei Jahrzehnte hinweg beobachten lassen. Immer mehr Konsumenten möchten einen engeren Bezug zur Herstellung der konsumierten Lebensmittel und zum Kauf von Produkten, die nicht erst weite Transportstrecken zurücklegen mussten (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2022). Damit wird zukünftig auch für die Industrie der Produktionsstandort als Vermarktungsfaktor relevanter.

Ein weiterer Trend, der sich in diesem Kontext abzeichnet, sind **globale Protestbewegungen**, die über die nächsten zwei Jahrzehnte hinweg die deutsche Industrie auf dem Weg zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung beeinflussen werden. Protestbewegungen werden heutzutage digital organisiert und finden weltweit vernetzt statt (zukunftsInstitut, o. D. a). Dadurch kann sich deren Einfluss auf politische und unternehmerische Entscheidungen durch eine höhere Beteiligung und eine breitere Sichtbarkeit verstärken.

Die oben beschriebenen Treiber & Trends Wahrnehmung der Bepreisung & Notwendigkeit von ökologischen Produkten und Dienstleistungen, Green Pressure, globale Protestbewegungen, Regionalität und Nachhaltigkeit haben einen Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.6, Mindset bei Unternehmen und Konsumenten.

◀ S. 70

◀ S. 35 **5.1.2 Technologisch**

Die **dezentrale Energieerzeugung** ist eine weitreichende Veränderung im Energiesystem, um die Energiewende zu realisieren. Erneuerbare Energien, die durch Windkraft, Solaranlagen etc. erzeugt werden, bringen eine deutlich verteilte Struktur mit sich als andere Energieversorgungen. Die aktuell stattfindende Transformation von fossilen und nuklearen Energieträgern zu erneuerbaren Energien bedeutet auch, dass im direkten Vergleich geringere Energiedichten vorherrschen werden. Schwankungen in der Verfügbarkeit von Sonne und Wind sind die Ursachen. Wenige Hundert Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke sorgten in den letzten Jahrzehnten für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung. Im Vergleich dazu speisen mehr als 1,5 Millionen Solaranlagen, 27.000 Windenergie- und 9.000 biogasbetriebene Klein-kraftwerke in das öffentliche Stromnetz ein – Tendenz steigend (Agora Energiewende, 2017). Als Folge dessen wird es zumindest vorübergehend zu einer schwankenden Stromverfügbarkeit und -bepreisung kommen, auf die sich Unternehmen – zum Beispiel durch den Einsatz geeigneter digitaler Anwendungen – einstellen müssen. Der Trend zur dezentralen Energieerzeugung bleibt auch laut den Expertinnen und Experten über die gesamte Laufzeit der Roadmap bestehen (2022 – 2045).

In diesem Zusammenhang ist die **Sektorenkopplung** eine der zentralen Herausforderungen für die Energiewende und immens wichtig, um eine angestrebte Klimaneutralität zu erreichen. Dabei sollen Strom-, Wärme- und Gasnetze sowie der Mobilitätssektor miteinander verbunden werden. Dadurch sollen Synergien effizient genutzt und Energie soll zur richtigen Zeit am richtigen Ort eingesetzt werden. Ziel ist es dabei, Schwankungen, die in der Erzeugung erneuerbarer Energien vorherrschen, auszugleichen (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, o. D.). Die Expertinnen und Experten gaben an, dass die technologische Entwicklung der Sektorenkopplung bis zum Jahr 2040 abgeschlossen und anschließend eine hohe Durchgängigkeit zwischen Verkehrs-, Wärme- und Stromsektor gegeben sein wird.

Dabei ist die **Elektromobilität** ein wichtiger Trend zur Erreichung einer klimaneutralen Produktion, der bereits heute sichtbar ist. Laut Expertinnen und Experten wird sich Elektromobilität bis zum Jahr 2035 im industriellen Kontext als fester Bestandteil etabliert haben (2022 – 2035). Elektromobilität ist ein Schlüssel für umweltfreundliche Mobilitätssysteme und Innovation. Elektrofahrzeuge wie E-Autos oder E-Bikes können durch regenerativ erzeugten Strom betrieben werden und emittieren damit während ihrer Nutzung deutlich weniger CO<sub>2</sub>. Zukünftig kann man sich vorstellen, sie als mobile Speicher zu nutzen und so wetterbedingte Schwankungen in der Energieerzeugung auszugleichen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022 a). In der Industrie wird dieser Trend sowohl die Logistik betreffen als auch die Nutzung von Elektrofahrzeugen als mobile Zwischenspeicher für die Energieversorgung.

Ebenso rechnen die Workshopteilnehmenden in den nächsten zwei Jahrzehnten mit einer **verstärkten Elektrifizierung des Wärmesektors** (2022 – 2045). Durch eine Elektrifizierung wird sich die Nachfrage nach Strom bis zum Jahr 2060 verdoppeln. Um den Bedarf an Strom für industrielle Wärme langfristig bereitzustellen, braucht es innovative Lösungen, denn den gesamten Wärmesektor zu elektrifizieren bedeutet, dem bestehenden Bedarf ein weiteres Stromsystem hinzuzufügen (Deutsche Energie-Agentur, o. D.).

- ◀ S. 46 Außerdem sehen die Expertinnen und Experten den **Energieträger Wasserstoff** aktuell als stark ausgeprägten Trend, der sich aber ab dem Jahr 2030 im Energieportfolio etabliert hat (2022 – 2030). Der Hype und die Weiterentwicklung von Technologien um Wasserstoff werden dann nicht weiter ausgebaut, und Wasserstoff stellt einen Energieträger im Portfolio dar. Dabei wird Wasserstoff andere, insbesondere fossile Energieträger teils substituieren. Wasserstoff wird durch die Elektrolyse von Wasser hergestellt. Durch den Einsatz von erneuerbarem Strom wird das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Mithilfe der Wasserstofftechnologie können die deutsche Industrie sowie auch der Lkw-, Schiff- und Flugverkehr klimaschonend umgestaltet werden, und es lässt sich eine Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern anstreben (Bundesregierung, 2022 b). Durch die Herstellung von Wasserstoff kann erneuerbarer Strom effizient und langfristig gespeichert werden.

## | VISION: 2045

Wichtig werden auch Trends im Kontext der Digitalisierung. Um **Konnektivität** sicherzustellen, sind vernetzte Kommunikationstechnologien auf Basis digitaler Infrastrukturen unerlässlich. Durch eine gestiegene Konnektivität werden auch das Level an Komplexität und die Möglichkeiten erhöht, die Informations- und Kommunikationstechnologien bieten (zukunftsInstitut, o. D. d). In Unternehmen können so flexible, automatisierte und effiziente Anlagen, Infrastrukturen und Wertschöpfungsketten aufgebaut werden, die widerstandsfähiger sind. Voraussetzung dafür sind Daten- und Informationsflüsse in Echtzeit (Konnanath, 2022). Unternehmen adaptieren diesen Trend bereits heute. Die Expertinnen und Experten gehen davon aus, dass Konnektivität über die gesamte Dauer der Roadmap ein wichtiger Trend sein wird (2022 – 2045). [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.3, Kommunikationsnetze mit ausreichender](#)

◀ S. 66 [Netzabdeckung.](#)

Die **Künstliche Intelligenz** (KI) oder auch Artificial Intelligence (engl.) imitiert menschliche kognitive Kompetenzen. Durch eine Datenanreicherung werden diese Systeme präziser und sind in der Lage, selbst zu lernen. Schwache KI löst konkrete Anwendungsprobleme in einem vorgegebenen Umfeld. Einsatzfelder sind unter anderem Sprach-, Muster- und Bilderkennung (Mittelstand-Digital Zentrum Augsburg, o. D.). Schwache KI hält bereits heute im industriellen Umfeld als ein Trend Einzug und wird sich über die gesamte Zeit der Roadmap immer weiter etablieren (2022 – 2045). Im Fall der starken KI arbeiten Computersysteme auf Augenhöhe mit dem Menschen zusammen und lösen schwierige Aufgaben (Mittelstand-Digital Zentrum Augsburg, o. D.). Starke KIs können selbstständig Probleme und Aufgaben erkennen, sie analysieren und das Problem durch gezielten Aufbau von Wissen lösen (Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, o. D.). Die Anwendung starker KI wird von den Expertinnen und Experten im industriellen Kontext auf das Jahr 2040 bis 2045 datiert (2040 – 2045).

Der Einsatz von KI ist die Grundlage der **Automatisierung** (2022 – 2036), die bis zum Jahr 2036 als Trend im industriellen Kontext gesehen wird. Anschließend wird sie durch einen höheren Automatisierungsgrad in die **Autonomisierung** übergehen. Der Trend der Autonomisierung bleibt bis 2045 bestehen (2036 – 2045). Beide Begriffe bezeichnen zielgerichtetes Agieren, das aber ohne menschliche Weisung ausgeführt wird. Von Automatisierung wird gesprochen, wenn Systemen kausale Beziehungen einprogrammiert werden, die im Vorfeld logisch durchdacht wurden. Bei autonomen Systemen werden diese kausalen Zusammenhänge vor der Ausführung nicht vollständig erfasst. Hier nutzt das System KI-Ansätze, um Handlungen auszuführen. Dabei wird der KI vorab nur indirekt mitgeteilt, wie sie sich in einer bestimmten Situation verhalten soll. Bei den verschiedenen Stufen gilt: Je höher der Automatisierungsgrad, desto weniger muss der Mensch eingreifen oder unterstützen (Fraunhofer IESE, 2019). Die Automatisierung und Autonomisierung kann einerseits dem Fachkräftemangel entgegenwirken. [Bezug zu Layer 3, Kapitel](#)

◀ S. 70 [5.3.7, Kompetenzen und Wissen bei Fachkräften.](#) Sie verspricht andererseits eine weitere Effizienzsteigerung in der Produktion und bildet somit eine wichtige technische Grundlage für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung.

Im Kontext der zunehmenden Digitalisierung gewinnt der Trend **Green IT** deutlich an Bedeutung. Dabei werden bestehende IT-Systeme klimaneutral gestaltet. Laut den befragten Expertinnen und Experten bleibt der Trend über die gesamte Laufzeit der Roadmap bestehen (2022 – 2045). Green IT bezeichnet einerseits umweltverträgliche Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) selbst, aber auch die Nutzung von IKT zur Umweltschonung. Betrachtet werden dabei der gesamte Lebenszyklus von IKT und alle umweltbezogenen Auswirkungen, die die Herstellung, Nutzung und Entsorgung mit sich bringt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2020).



**Distributed-Ledger-Technologien** (DLT) werden laut den Expertinnen und Experten über die gesamte Laufzeit der Roadmap eine bedeutende Entwicklung darstellen (2022 – 2045). [Bezug zu Layer 3, Kapitel](#)

- ◀ S. 65 [5.3.1, Schaffung von Transparenz und Nachprüfbarkeit von Daten](#). Die Distributed-Ledger-Technologie (DLT) ermöglicht Transaktionen auf einer dezentralen, auf mehrere Knoten verteilten Datenbasis ohne zentralen Intermediär. Gegenüber einem zentralisierten System erfordert DLT keinen Vermittler für die Verarbeitung von Transaktionen, keine zentrale Autorität und ebenso keine zentrale Authentifizierung von Transaktionen sowie keine zentrale Validierung. Vorteile von DLT sind, dass Datenbestände dezentral und unveränderlich abgespeichert werden und so auch vor Cyberkriminellen geschützt sind. Alle Daten sind jedoch gleichzeitig transparent einsehbar und dadurch verfügbar. Durch DLT können oftmals Ineffizienzen in Prozessen unter anderem durch Automatisierung in Form von Smart Contracts verringert werden (iMi Blockchain, 2020).

Unter **Virtual oder Digital Engineering** versteht man die Nutzung von digitalen und virtuellen Systemen im Ingenieurwesen. Die Produktentwicklung findet vollständig im Digitalen statt (Aleger, o. D.). **Virtual/Digital Engineering** hält ab dem Jahr 2022 als Trend verstärkt Einzug in den industriellen Kontext und bleibt über die gesamte Laufzeit der Roadmap bestehen (2022 – 2045). Dabei können Digitale Zwillinge Produkte dieser Disziplin sein. Als ein **Digitaler Zwilling** (Digital Twin) wird eine virtuelle Repräsentanz eines physischen Produkts oder Prozesses bezeichnet, die digitale Simulationen ausführt. [Bezug zu](#)

- ◀ S. 61 [Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung](#). So kann vorhergesagt werden, wie sich ein Prozess oder Produkt in der Realität verhält, bevor das reale Produkt erzeugt wird (Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung, o. D.). Ein **Sustainable Twin**, also ein nachhaltiger Zwilling, basiert auf dem Digitalen Zwilling und wird durch Nachhaltigkeitsaspekte erweitert. [Bezug zu Layer 3, Kapitel](#)
- ◀ S. 61 [5.3.2, Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung](#). Der Digitale wie der Nachhaltige Zwilling liefern wertvolle Nutzungsinformationen und Daten, die als Entscheidungshilfen zur Anpassung des physischen Produkts oder Prozesses dienen können (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020). Digital und Sustainable Twins werden ab dem Jahr 2025 verstärkt im industriellen Kontext auftreten und sich über die gesamte Laufzeit der Roadmap halten (2025 – 2045).

Die zunehmende Digitalisierung macht leistungsfähigere Systeme zur Datenverarbeitung notwendig. Aufgrund ihrer erweiterten Recheneffizienz und ihres Einsatzgebiets gelten **Quantencomputer** als neue Generation von Computern, die sich aktuell noch in der Entwicklungsphase befinden. Die „Game Changer“ können in Medizin, Materialforschung und Energiewirtschaft Einsatz finden und bei Simulationen, Optimierungsaufgaben sowie in der Anwendung von Künstlicher Intelligenz neue Maßstäbe setzen (Bundesregierung, 2021). [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenmanagement und -austausch innerhalb eines](#)

- ◀ S. 58 [Unternehmens](#). Diese Zukunftstechnologie wird erstmals im Jahr 2040 als wichtiger Trend hin zur klimaneutralen Produktion wahrgenommen und bleibt bis zum Ende der Roadmap und darüber hinaus bestehen (2040 – 2045).

**Additive Fertigung im industriellen Maßstab** findet bereits heute großen Anklang und wird bis zum Ende der Laufzeit der Roadmap als Trend bestehen bleiben (2022 – 2045). [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2,](#)

- ◀ S. 61 [Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung](#). Bei der Additiven Fertigung werden dreidimensionale Objekte Schicht für Schicht gedruckt, was die Herstellung von hochkomplexen Geometrien ermöglicht. Ausgangsbasis hierfür ist eine digitale Datei des Objekts. Diese Art der Fertigung revolutioniert den Entwurf und die Herstellung von Produkten, reduziert Materialverschwendung und ermöglicht kundenspezifische Fertigungen sowie eine Vor-Ort-Produktion. Raketentriebwerke, Brücken und Lebensmittel lassen sich bereits drucken. Rund 44 Prozent der deutschen Industrieunternehmen mit einer Beschäftigtenzahl über 100 haben 3D-Druck bereits im Einsatz (Bitkom, 2021 a).



### 5.1.3 Ökonomisch

Die **Plattformökonomie** ist über die nächsten zwei Jahrzehnte hinweg (2022 – 2045) ein bedeutender Trend für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung. Die Bedeutung der Plattformökonomie hat in den letzten Jahren stark zugenommen, insbesondere auch durch die Coronapandemie. Vermehrt werden Leistungen wie Programmier- und Designaufträge oder auch Fahrdienste auf digitalen Plattformen angeboten und nachgefragt. Dabei sind digitale Plattformen eine charakteristische Erscheinung der digitalen Transformation, die sowohl für Betreiber dieser Plattformen als auch deren Verbraucherinnen und Verbraucher große Potenziale eröffnet (Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2021; Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2020). Neben der Entwicklung digitaler Geschäftsmodelle unter Nutzung solcher Plattformen bietet der Austausch von Daten für Unternehmen darüber hinaus neue Erkenntnisse und Entwicklungspotenziale, zum Beispiel für eine ressourcenoptimierte Entscheidungsfindung.

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Plattformökonomie werden sich **Cloudsysteme** weitreichend in vielen Unternehmensprozessen bis zum Jahr 2030 etabliert haben, was wiederum eine **erhöhte Datenverfügbarkeit** im eigenen Unternehmen zur Folge hat. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenmanagement und -austausch über Unternehmen hinweg](#). Laut dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist Cloud Computing eine der wichtigsten Technologien im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien. Durch Cloudlösungen werden Unternehmen die Möglichkeiten bereitgestellt, kundenspezifisch zum Beispiel auf Rechenleistung oder Speicherkapazitäten zuzugreifen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. D. b).

◀ S. 64

Daher ist es nicht verwunderlich, dass die **Datensouveränität** in den nächsten Jahrzehnten zunehmen wird und der **Wert von Daten**, insbesondere die Nutzung und Monetarisierung von Daten, ab dem Jahr 2030 einen wichtigen Trend für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung darstellt. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenmanagement und -austausch über Unternehmen hinweg](#). Daten werden in der Zukunft ein immer wichtiger werdender Rohstoff für Unternehmen werden. In diesem Zusammenhang wird Datensouveränität ein bedeutender Erfolgsfaktor beim Kauf, Verkauf und Teilen von Daten sein (Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT, o. D.). Die Datensouveränität kann dabei einen wichtigen Treiber für die Bereitschaft zum Datenaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg darstellen.

◀ S. 64

Außerdem begleitet uns die **digitale Reputation** über die nächsten zwei Jahrzehnte (2022 – 2045) hinweg. Der Ruf eines Unternehmens oder einer einzelnen Person wird heutzutage immer stärker durch soziale Netzwerke und Informationen im Internet geprägt (zukunftsInstitut, o. D. b).

Die zunehmende **Standardisierung und Normung** von analogen und digitalen Schnittstellen im Energiebereich und Produktionsumfeld wird ebenfalls bis ins Jahr 2045 (2022 – 2045) ein wichtiger Trend sein, sodass Produktionen klimaneutral, effizient und automatisiert stattfinden können. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenmanagement und -austausch innerhalb eines Unternehmens](#). Standards sind bedeutend, um Interoperabilität gewährleisten zu können. In der Energiebranche stellen sie ein wichtiges Element dar, sodass unterschiedliche Komponenten eines Systems zusammenspielen und unterschiedlichste Akteure miteinander agieren können (Deutsche Energie-Agentur, 2018).

◀ S. 58

Eine zunehmende Digitalisierung und Automatisierung des Energiesystems führt etwa ab dem Jahr 2028 zu einer verstärkten **Energietransparenz**. Diese Energietransparenz unterstützt dabei, die richtigen Stellschrauben für mehr Energieeffizienz zu identifizieren, zu priorisieren und entsprechende Maßnahmen einzuleiten (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, o. D.).

Die **Neuorientierung beziehungsweise Weiterentwicklung des Emissionszertifikatehandels** setzt klare Verhaltensanreize, sodass Unternehmen ihre Schadstoffemissionen weiter reduzieren (2022 – 2045). Der europäische Emissionshandel wurde 2005 als zentrales Klimaschutzinstrument der europäischen Union eingeführt, um die Ziele des internationalen Klimaschutzabkommens von Kyoto umzusetzen (Umweltbundesamt, 2022 b).

Die Weiterentwicklung und der zunehmende Einsatz von unterschiedlichsten **Speichertechnologien** sowie die steigende Anzahl von **Flexumern** (2022 – 2045) wurden als künftige Entwicklungen im Energiesystem von den Expertinnen und Experten herausgearbeitet. In diesem Zusammenhang lässt sich etwa bis zur Hälfte des betrachteten Zeitraums eine deutliche **Preisdegression bei Speichertechnologien** feststellen. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.1, Technologien zur Energiespeicherung.](#) Der Stromkunde hat sich in den letzten Jahren oftmals vom Consumer, der lediglich Strom von Energieversorgungsunternehmen bezieht, zu einem Prosumer weiterentwickelt, der sowohl Strom verbraucht als auch selbst produziert. Im Zuge der Energiewende wandelt sich die Rolle der Kunden noch weiter – die Prosumer werden zu Flexumern. Das digitale Energiesystem ermöglicht dem Flexumer, aktiv Stromerzeugung, -verbrauch und -speicherung anzupassen (Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2019 b).

Aufgrund aktueller Krisen in den Jahren 2025 – 2030 führen Unternehmen ein verstärktes **Backsourcing** innerhalb ihrer Lieferketten durch, was dem übergeordneten Trend einer **globalen Wertschöpfungskette** (2022 – 2045) aber keinen Abbruch tut. In einer globalen Wertschöpfungskette globalisieren Unternehmen ihre Produktionsprozesse, indem sie ihre Wertschöpfungsprozesse in kleinere Elemente auf weltweit ansässige Anbieter aufgliedern (Eurostat, o. D.). In Kombination führt das Backsourcing bei gleichbleibend hoher Wichtigkeit der Globalisierung zu flexibleren und idealerweise resilienteren Wertschöpfungsketten.

Ab dem Jahr 2035 wird vermehrt der **Cradle-to-Cradle-Ansatz** in Industrieunternehmen eingesetzt. Das Konzept Cradle-to-Cradle (C2C) beschreibt die Vision einer abfallfreien Wirtschaft, in der weder gesundheits- noch umweltschädliche Materialien verwendet sowie diese in natürlichen oder technisch geschlossenen Kreisläufen eingesetzt werden (Lexikon der Nachhaltigkeit, 2015). Für produzierende Unternehmen, die dem Cradle-to-Cradle-Ansatz folgen wollen, bedeutet das eine starke Vernetzung von Unternehmen und Daten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg.

**Greenwashing** ist bis etwa 2035 noch ein hemmender Faktor auf dem Weg zu einer klimaneutralen Produktion. Unter Greenwashing wird das Vorhaben von Organisationen verstanden, sich über Marketing und Kommunikationsmaßnahmen ein grüneres Image zu geben, ohne dementsprechende Aktivitäten wirklich systematisch umzusetzen (Umweltbundesamt, 2022 c). Zur Erreichung der Vision sollte Greenwashing in den Jahren ab 2035 größtenteils durch regulatorische Rahmenbedingungen und sozialen Druck überwunden sein. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.6, Mindset bei Unternehmen und Konsumenten.](#)

Die **Wasserstoffherzeugung und Infrastruktur** stellen bis zum Jahr 2030 einen wichtigen Trend für eine klimaneutrale Produktion dar. Ab dem Jahr 2030 sind die notwendige Infrastruktur sowie die Anlagen für Wasserstoffherzeugung und -transport aufgebaut und etabliert. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.3,](#)

- ◀ S. 67 [Energienetze.](#) Wasserstoff ist als alternativer Energieträger ein Schlüsselement für den Erfolg der Energiewende. Insbesondere grüner Wasserstoff wird per Elektrolyse klimaneutral mithilfe regenerativer Energieerzeugungsanlagen hergestellt und stellt damit einen wichtigen Baustein der Sektorenkopplung und eines nachhaltigen, weltweiten Energiesystems dar. Dementsprechend sind Technologien rund um grünen Wasserstoff entscheidend für die Zukunftsfähigkeit des Industriestandorts Deutschland (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. D. f; Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2023).

Ebenso ist **Sustainable Finance** im betrachteten Zeitkorridor ein wichtiger Trend hin zur klimaneutralen Produktion. Sustainable Finance bezieht sich auf den Prozess, die ESG-Kriterien (environmental, social und governance) bei Investitionsentscheidungen in Finanzinstrumente zu berücksichtigen und so zu langfristigen Investitionen in nachhaltige und wohltätige Projekte zu führen (European Commission, o. D. b; Bitkom Akademie, o. D.). [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.4, Regulatorische Rahmenbedingungen.](#)

- ◀ S. 68

Weiterhin sollte die **Wirtschaftlichkeit von klimaneutralen Investitionen** bis zum Jahr 2045 zunehmen, um die Roadmap-Vision zu erreichen. Bei Investitionsentscheidungen der Industrie spielen neben den Kapitalkosten auch höhere Betriebskosten von klimafreundlichen Technologien eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass klimafreundlichere Herstellungsverfahren und Energieträger wettbewerbsfähig gegenüber fossilen Energieträgern und existierenden Produktionsprozessen gemacht werden (Bundesverband der Deutschen Industrie, 2021 b).

- ◀ S. 42 Betrachtet man den Arbeitsmarkt, so wird der **Fachkräftemangel** über die folgenden Jahrzehnte hinweg (> 2045) ein hemmender Faktor auf dem Weg zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung sein. Unter Fachkräftemangel versteht man die Nachfrage nach Fachkräften, die über einen längeren Zeitraum nicht bedient werden kann. Dabei kann sich ein Fachkräftemangel auch auf eine gesamte Wirtschaft beziehen. Im Vergleich zu einem Arbeitskräftemangel berücksichtigt der Fachkräftemangel die Qualifikation der Arbeitskräfte (Bundeszentrale für politische Bildung, 2014). Während in Deutschland kein flächendeckender Fachkräftemangel herrscht, ergibt sich in bestimmten Regionen und Berufsgruppen die Schwierigkeit, passende Fachkräfte für offene Stellen zu finden, insbesondere die MINT-Berufsfelder sind hiervon betroffen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. D. c). Durch den demografischen Wandel wird sich der Fachkräftemangel in den kommenden Jahren weiter verstärken.
- ◀ S. 70 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.7, Kompetenzen und Wissen bei Fachkräften.](#)

### 5.1.4 Ökologisch

Der **Klimawandel** ist eine weltweite Veränderung des Klimas. Dabei gibt es natürliche Ursachen, wie eine Veränderung der einfallenden Sonnenstrahlung, des Anteils der reflektierten Sonnenstrahlung und der Wärmestrahlung, die von der Erde ausgeht (Bundeszentrale für politische Bildung, 2013). Darüber hinaus existiert der anthropogene Treibhauseffekt, also die Veränderung der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, der zum menschengemachten Klimawandel führt. Anthropogene Treibhausgase wie Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxide (N<sub>2</sub>O) oder Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) werden häufig in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ausgedrückt, um sie vergleichbar zu machen. Ursachen für die Emission der Treibhausgase sind unter anderem die Gewinnung und Verbrennung von fossilen Energieträgern, das Betreiben von Land- und Viehwirtschaft oder die stetig zunehmende industrielle Produktion (Umweltbundesamt, 2021). Damit ist dies einer der wichtigsten Trends in dieser Roadmap, und er zieht sich über die gesamte Laufzeit (2022 – 2045).

Um dem Klimawandel zu begegnen, stellt **umfassender Umweltschutz** (Klima, Arten, Natur) ebenfalls über die gesamte Dauer der Roadmap einen wichtigen Trend dar (2022 – 2045). Nicht nur Klimaneutralität ist im Umweltschutz wichtig, auch wenn sie in dieser Studie im Fokus steht, sondern alle anderen ökologischen Aspekte werden ebenso als wichtig erachtet. Unter Umweltschutz werden das Erkennen von Umweltgefahren sowie das Ergreifen geeigneter Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung verstanden. Bereits entstandene Umweltschäden werden durch Umweltschutzmaßnahmen wieder behoben. Durch Umweltschutz sollen der dauerhafte Fortbestand aller Lebewesen sowie ein menschenwürdiges Leben angestrebt werden (Spektrum, 1999). Produzierende Unternehmen werden im betrachteten Zeitraum neben der Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks auch erweiterte Umweltschutzmaßnahmen ergreifen müssen.

Im Kontext der Nachhaltigkeit ist die **Rohstoffverfügbarkeit (Lithium, Wasser, Kupfer etc.)** ein wichtiger Aspekt, der bei der Erreichung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung über die gesamte Dauer der Roadmap Berücksichtigung finden muss (2022 – 2045). Die Rohstoffverfügbarkeit wird nicht nur durch wirtschaftliche und (geo)politische Faktoren beeinflusst und hat so Auswirkungen auf globale Rohstoffmärkte. Sie bedingen sich auch gegenseitig. So hat beispielsweise die Verfügbarkeit von Wasser, Energie und Land ebenso einen Einfluss auf andere Ressourcen. Auch die gesellschaftliche Akzeptanz von hohen Umweltbelastungen wird tendenziell geringer. Werden Rohstoffe knapper, die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber umweltschädlichen Praktiken geringer und Umweltschutzmaßnahmen wie beispielsweise Standards mehr, so wird ein Trade-off zwischen Gewinnung und Unterlassung einer Förderung aufgrund von unwirtschaftlichen Bedingungen vorgenommen, und eine Ressource steht nicht weiter oder nicht in vergleichbarer Menge zur Verfügung wie zuvor (Umweltbundesamt, 2017).

## | VISION: 2045

Eine tatsächliche **Zero-Waste-Produktion** mit ihren Prinzipien wird laut den Expertinnen und Experten erst im Jahr 2033 von Unternehmen als Alternative zur herkömmlichen Produktion betrachtet und hält sich bis 2045 als Trend in der Roadmap (2033 – 2045). Dabei kann ein Bezug zu Reduktionsstrategien hergestellt werden. Das Grundprinzip bei Zero Waste ist, Abfälle nicht wieder- oder weiterzuverwenden, sondern sie gar nicht erst entstehen zu lassen. Die Ansätze Recycling, Upcycling und Cradle-to-Cradle stellen Vorstufen des Zero-Waste-Ansatzes dar. Dabei gibt es auch Ansätze, die stärker in Richtung Modularität von Produkten gehen. Hintergrund ist dabei, defekte Bauteile zu reduzieren und zu ersetzen, anstatt das gesamte Produkt zu entsorgen (zukunftsInstitut, 2015). Durch die Vermeidung von Abfällen können Produktionen und deren Prozesse noch effizienter gestaltet werden und ressourcenschonendere Produkte hervorbringen. Die Folgen sind eine Reduktion der Emissionen und ein weiterer Schritt in Richtung Klimaneutralität.

**Dekarbonisierung** sowie die **Emissionsreduktion** wurden als wichtige Zielsetzungen und Bestrebungen für den gesamten Zeithorizont der Roadmap erarbeitet (2022 – 2045). Darunter wird die Treibhausgas-minderung bis hin zur -neutralität verstanden. Die Treibhausgasemissionen können in drei Gruppen, die sogenannten Scopes, unterteilt werden. Dabei werden für die unterschiedlichen Emissionsarten in der Regel auch unterschiedliche Reduktionsmaßnahmen erforderlich (Umweltbundesamt, 2020).

Ein weiteres Ziel ist die Steigerung der **Energieeffizienz**, die das Verhältnis zwischen Energieertrag und Energieeinsatz beschreibt. Nicht nur die Energieeffizienz von Produkten, Prozessen etc. spielt hier eine große Rolle, sondern auch die Verringerung des absoluten Bedarfs an Energie (Umweltbundesamt, 2013). Auf dem Weg zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung sind sich die Expertinnen und Experten einig, dass Energieeffizienz über die gesamte Dauer der Roadmap kontinuierlich wichtig bleibt (2022 – 2045).

Neben der Energieeffizienz ist auch der ressourcenschonende und effiziente Einsatz von Materialien essenziell. Die **Materialeffizienz** wird bis zum Jahr 2035 als wesentlicher Trend wahrgenommen (2022 – 2035). Unter Materialeffizienz versteht man, wie effizient ein Material eingesetzt wird. Also Produkt-Output im Verhältnis zu Material-Input. Das hat positive wirtschaftliche Folgen, aber auch aus Umweltsicht ist eine erhöhte Materialeffizienz wünschenswert (Bayerisches Landesamt für Umwelt, o. D. a). Ressourcen werden geschont und Umweltbelastungen reduziert. Das wiederum birgt enorme wirtschaftliche Einsparpotenziale. Abzugrenzen ist die Materialeffizienz von der Rohstoffeffizienz, die die effiziente Nutzung von Rohstoffen wiedergibt (Bayerisches Landesamt für Umwelt, o. D. b).



### 5.1.5 Politisch

Expertinnen und Experten sehen die **politische Weltordnung (multipolare Weltordnung)** über die nächsten Jahrzehnte (2022 – 2045) als bedeutenden Trend, der das politische Geschehen beeinflussen wird. Der Begriff der Multipolarität wird oftmals als eine Art Wunschvorstellung für die Weltordnung des 21. Jahrhunderts angesehen (Bundesakademie für Sicherheitspolitik, 2021). Multipolarität wird durch eine Veränderung der weltweiten Machtverhältnisse gekennzeichnet. Innerhalb der Staatengemeinschaft sowie zwischen nicht staatlichen Akteuren beziehungsweise Netzwerken und Staaten verschiebt sich das Machtgefüge, sodass neue Akteure über Einflussmöglichkeiten und Mitspracherecht im Weltgeschehen verfügen. Insbesondere ist hier auf Schlüsselnationen in Asien, Lateinamerika und Afrika hinzuweisen. Deren Entwicklung wird einen deutlichen Einfluss auf die multipolare Weltordnung haben (Bundesministerium der Verteidigung, 2016).

Auch die **Versorgungssicherheit** wird in den nächsten Jahrzehnten (2022 – 2045) eine bedeutende Rolle für die Vision der vorliegenden Roadmap einnehmen. Besonders im Rahmen der angestrebten Energiewende wird der Begriff Versorgungssicherheit häufig thematisiert. Das Kernziel dieses Trends liegt in der Gewährleistung einer sicheren Stromversorgung für die deutsche Bevölkerung. Insgesamt setzt sich die Versorgungssicherheit aus drei Teilaspekten zusammen. Die Versorgungssicherheit in der Stromerzeugung strebt eine Anpassung der Stromerzeugung an die Nachfrage an. Daneben stellt die Versorgungssicherheit im Stromnetz einen weiteren Aspekt dar. Durch die zukünftige Umstellung auf erneuerbare Energien soll die hohe Zuverlässigkeit des deutschen Stromnetzes nicht beeinträchtigt werden. Dies erfordert neben dem schnellen Ausbau auch eine technologische Verbesserung des Stromnetzes. Zuletzt erweist sich die ausreichende Versorgung mit Brennstoffen als wichtiges Ziel (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2019 b). Für die produzierende Industrie ist die Versorgungssicherheit ebenfalls ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor und entscheidend bei der Standortwahl. **Bezug zu Diversifizierung der Energieimporte, die im folgenden Absatz erläutert wird.**

**Die Diversifizierung der Energieimporte** wird laut Expertinnen und Experten bis zum Jahr 2035 eine weitreichende Veränderung im Energiesystem darstellen (2022 – 2035). Deutschland gehört zu denjenigen Ländern, die eine hohe Abhängigkeit von Energieimporten aufweisen. Dieselloststoff und Rohöl stellen dabei einen hohen Anteil der Einfuhr dar. Da der Großteil der Importe bisher aus einer geringen Anzahl an Ländern bezogen wird, ist eine Diversifizierung der Energieimporte eine Möglichkeit, die deutsche Energieversorgung nachhaltig sicherzustellen. Besonders erneuerbare Energien sind hier als geeignete Energiequelle anzusehen. Deren globale Erzeugung und Beschaffung tragen maßgeblich zu einer angestrebten Diversifizierung bei (VDA, o. D.).

Weiterhin wird die **Transformation des regulatorischen Rahmens für Netzbetreiber** einen Einfluss auf die Ausgestaltung einer klimaneutralen Produktion ausüben (2022 – 2045). Bereits heute ist die Bedeutung des Verteilnetzes in Deutschland vor dem Hintergrund der Energiewende deutlich erkennbar. Neben dem Großteil der erneuerbaren Energieanlagen werden auch immer mehr thermische Kraftwerke im Verteilnetz angeschlossen. Zudem ist eine bereits heute ansteigende Stromnachfrage im regionalen Verteilnetz erkennbar, nicht zuletzt aufgrund von Elektromobilität und damit zusammenhängenden Entwicklungen. Diese Tendenzen werden auch in Zukunft weiter voranschreiten. Dadurch ergeben sich für Verteilnetzbetreiber (VNB) neue Verantwortlichkeiten im Hinblick auf Gesamtsystemstabilität und eine höhere Komplexität und Anzahl an Aufgaben. Zum Beispiel wird der Übertragungsnetzbetreiber auf vorhandene Ressourcen im Verteilnetz zurückgreifen müssen, um eine stetige Versorgungssicherheit und Gesamtstabilität weiterhin aufrechterhalten zu können (E-Bridge Consulting; MITNETZ Strom, 2017).

Der **Green Deal 2030** und die damit einhergehenden Entwicklungen sind wichtige Rahmenbedingungen, die über die gesamte Dauer der Roadmap zu berücksichtigen sind (2022 – 2035). Der Klimawandel gehört mit Abstand zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Um diesem wirksam und nachhaltig entgegenzutreten, hat sich die EU ein bedeutsames Ziel gesetzt: als erster Kontinent Klimaneutralität erreichen. Der Green Deal 2030 beschreibt die dafür notwendigen Voraussetzungen. Im ersten Schritt soll die EU bis 2030 eine Verringerung der Emissionen von mindestens 55 Prozent (verglichen mit dem Jahr 1990) erreichen und ab 2050 als klimaneutral gelten. Durch diese Maßnahmen sollen auch viele weitere Lebensbereiche wie beispielsweise die Innovationsfähigkeit, die Schaffung von Arbeitsplätzen und die Verbesserung von Gesundheit und allgemeinen Lebensbedingungen der Menschen positiv beeinflusst werden (Europäische Kommission, o. D.). Auch die Industrie wird in hohem Maße von den Regularien aus dem Green Deal betroffen sein.

◀ S. 51 Ebenso wird die EU-Taxonomie für Nachhaltigkeit von Expertinnen und Experten bis zum Jahr 2045 als eine bedeutende Entwicklung hinsichtlich der **Nachhaltigkeitsklassifizierung** von Wirtschaftstätigkeiten eingeschätzt (2022 – 2045). Im Rahmen der EU-Verordnung wird eine Reihe an Kriterien vorgestellt, anhand welcher verschiedenste wirtschaftliche Aktivitäten im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit eingeordnet werden können. Insbesondere der Beitrag zu den Klimaschutzzielen der Europäischen Union sowie die Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten und Dienstleistungen stehen im Vordergrund der Kriterien. Die EU-Taxonomie gehört zum European Green Deal 2030 und trägt somit maßgeblich zum Kampf gegen den Klimawandel bei (Deutsche Industrie- und Handelskammer, 2022).

Einen weiteren Trend, der eine wichtige Stütze für den Umbau der Industrie hin zu einer klimaneutralen Produktion darstellen könnte, bilden unterschiedliche **Politikinstrumente zur Klimaneutralität**. Sie werden bis zum Jahr 2045 einen wichtigen Beitrag zum politischen Geschehen leisten (2022 – 2045). Mögliche Instrumente können unter anderem nachfolgende Beispiele sein: Preisbestandteile wie Umlagen, Abgaben oder die CO<sub>2</sub>-Bepreisung sollten so ausgestaltet werden, dass Anreize für Unternehmen gesetzt werden, vermehrt auf umweltfreundliche Technologien auf- beziehungsweise umzurüsten. Weiterhin kann der Markthochlauf von Wasserstoff, insbesondere in energieintensiven Industrien wie zum Beispiel der Stahl-, Zement- und Chemieindustrie ein wichtiger Faktor sein. Daneben stellt die Stärkung der Prosumer durch Vereinfachung der regulatorischen Rahmenbedingungen ein bedeutendes Instrument für ein klimaneutrales Deutschland dar. Digitale Kennzeichnungen von Nachhaltigkeitskriterien zahlen auf die Transparenz und Vergleichbarkeit von Produkten wie auch Materialien ein. Weiterhin stellen Kriterien für das Produktdesign sowie die Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit von Produkten wichtige Wegbereiter dar, um Emissionen und Downcycling zu reduzieren (Die Energieintensiven Industrien in Deutschland, o. D.; Stiftung Klimaneutralität; Agora Energiewende; Agora Verkehrswende, 2021).

## | VISION: 2045

Die für die Umrüstung auf eine klimaneutrale Produktion notwendigen staatlichen **Förderprogramme** werden über die gesamte Dauer der Roadmap als wichtiger politischer Trend aufgefasst (2022 – 2045). Die geplante staatliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung mit 13 bis 14 Milliarden Euro pro Jahr stellt ein derartiges Beispiel dar. Ziel dieser Umbaumaßnahmen ist es, Gebäudeelemente mit hohem Energieverbrauch (alte Fenster, Gasheizungen ...) zu ersetzen (Tagesschau, 2022). Eine weitere Fördermöglichkeit ist im Rahmen der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) vorhanden. Durch diese sollen Wärmenetzbetreiber zur Investition in den Neubau von Wärmenetzen, die über einen erhöhten Anteil an erneuerbaren Energien verfügen, mobilisiert werden. Dies könnte einen wesentlichen Beitrag zur Klimaneutralität in der Wärmeversorgung leisten, um schlussendlich den Kampf gegen den Klimawandel anzugehen (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, o. D.). Die obigen Trends CO2-Steuer, EU-Taxonomie für Nachhaltigkeit (Sustainable Finance) sowie nationale und regionale

◀ S. 68 Investitionsförderung haben alle [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.4, Regulatorische Rahmenbedingungen.](#)

Mit dem Themenbereich Daten einhergehend ist der Trend **Plattformautonomie**, der die Bestrebungen einer von Privatkonzernen unabhängigen Datenplattform bezeichnet, welche über die gesamte Roadmap-Dauer bestehen werden (2022 – 2045). Das Projekt Gaia-X stellt hier beispielsweise eine Initiative dar, die unter anderem ein sicheres europaweites Ökosystem zur Datenteilung etablieren soll (Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL, o. D.). Im Kontext produzierender Unternehmen arbeiten eine Vielzahl an Akteuren und Initiativen bereits heute an der Etablierung eines sogenannten „Datenraum Industrie 4.0“, der Unternehmen einen sicheren und souveränen multilateralen Datenaustausch ermöglichen soll (Bayern Innovativ, o. D. b). Damit sei auch eine Autonomie von monopolistischen privaten Anbietern angedacht.


Die rasch voranschreitende Digitalisierung führt dazu, dass **Cybersecurity** zum Schutz vor beispielsweise Cyberangriffen und Datenklau zunehmend erforderlich wird (2022 – 2045). Heutzutage nimmt Digitalisierung eine bedeutende Rolle in nahezu allen Lebensbereichen ein. Dadurch steigt auch das Bedürfnis nach Informations- und Cybersicherheit spürbar an. Diese ist nicht nur im Alltag, sondern auch im Hinblick auf politische Entwicklungen als wesentlich anzusehen. So können zum Beispiel Cyberangriffe und IT-Ausfälle weitreichende Auswirkungen auf die Sicherheit Deutschlands haben oder im Rahmen von geopolitischen Auseinandersetzungen missbraucht werden. Cybersicherheit nimmt somit ebenfalls einen hohen Stellenwert im politischen Geschehen ein und muss in den nächsten Jahrzehnten stets sichergestellt werden (Bundesministerium des Innern und für Heimat, o. D.).

◀ S. 58 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenmanagement und -austausch innerhalb eines Unternehmens.](#)









## LAYER 2: ANWENDUNGS- FELDER

Ein Großteil der für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung notwendigen digitalen Anwendungen sind bereits verfügbar. Beispielsweise digitale Lösungen, die es ermöglichen, den Energieverbrauch einer Produktion datenbasiert zu ermitteln und transparent zu machen – und so die energieadaptive Produktionsplanung und -steuerung ermöglicht. Die große Herausforderung liegt demnach eher weniger in der technologischen Weiterentwicklung als in einem breiten Einsatz der vorhandenen Lösungen in allen Branchen und bei Unternehmen jeder Größe.

Produzierende Unternehmen und Akteure der Energiewirtschaft finden in Layer 2 Anwendungen für den gesamten Produktlebenszyklus vom Engineering bis zum Recycling und auf allen Ebenen des Gesamtsystems, von der einzelnen Maschine über Produktionsprozesse und -standorte bis zum Industriepark. Unabhängig von der Ausgangssituation findet so jede Organisation in Layer 2 eine passende digitale Anwendung, die als erster Schritt zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung dienen kann.



## 5.2 Layer 2: Anwendungsfelder

Dieser Layer bildet die Anwendungsfelder ab, die angegangen werden müssen, um zum einen eine Antwort auf die treibenden Faktoren geben zu können und zum anderen die anzustrebende Vision zu erreichen. Die Anwendungsfelder werden unterteilt in Standardisierung und Dateninfrastruktur, Simulationen und Prognosen, Planung und Prozesse, Produktdesign und Engineering, Energiesysteme und Energiemanagement, Speicheranwendungen, R-Strategien sowie Geschäftsmodelle. Entlang dieser Themenfelder werden im Folgenden konkrete Anwendungen geschildert, die Unternehmen einsetzen können, um sich in Richtung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung zu entwickeln. Für jede dieser Anwendungen wird zudem der aktuelle Entwicklungsstand aufgezeigt und – falls vorhanden – auf aktuelle Entwicklungen verwiesen. Die Anwendungen stehen dabei sowohl untereinander in Abhängigkeit als auch zu den [Rahmenbedingungen in Layer 3](#), da unter Umständen gewisse Voraussetzungen gegeben sein müssen, um eine Anwendung erfolgreich in der breiten Industrie umzusetzen. Zusätzlich können [Treiber und Trends aus Layer 1](#) die Umsetzung und Etablierung potenzieller Anwendungen beschleunigen oder verzögern.

### 5.2.1 Standardisierung und Dateninfrastruktur

Die Implementierung einer Dateninfrastruktur und die Nutzung standardisierter Lösungen bilden die Basis, um digitale Systeme umfangreich und sinnvoll für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung einzusetzen. Insbesondere im unternehmensübergreifenden Kontext können so fundierte Entscheidungen zugunsten der ökologischen Nachhaltigkeit getroffen werden. Konkrete Anwendungen sind in diesem Kontext das Retrofitting, die Messung und Erfassung von Ergebnis- und Einflussgrößen sowie von Produktfunktionalitäten, Smart Data, digitale Material- und Produktpässe sowie eine Datenintegration über den gesamten Produktlebenszyklus und die gesamte Wertschöpfungskette.

Viele Industriemaschinen haben eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten. Dadurch kann auch der Digitalisierungsstand der Anlagen innerhalb eines Produktionsstandorts sehr unterschiedlich ausfallen. Über ein sogenanntes Retrofitting werden alte Maschinen durch die Nachrüstung von Hardware, wie beispielsweise Sensorik und Softwarekomponenten, digitalisiert und auf einen zentralen Standard innerhalb des Unternehmens gehoben. Dadurch können Anwendungen wie der Einsatz von KI und die Anbindung an ein Industrial-Internet-of-Things (IIoT)-System ermöglicht werden. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Industrial-Internet-of-Things \(IIoT\)-Plattformen](#). Je nach Anlage und Fertigungsprozess kommen dabei unterschiedliche Systeme infrage. [Der VDMA beschreibt in einem Leitfaden, wie der Retrofit funktionieren kann](#) (VDMA: Forum Industrie 4.0; Fraunhofer IOSB-INA, 2020). Da aktuell viel Entwicklungsarbeit in diesem Bereich passiert, gehen die Expertinnen und Experten davon aus, dass nahezu alle Anlagen bis 2027 zumindest grundsätzlich digitalisiert und nachgerüstet sein werden – und hier ebenfalls die Notwendigkeit besteht, dies umzusetzen.



◀ S. 58

Durch die Digitalisierung aller Anlagen- und Maschinenteile können **Ergebnis- und Einflussgrößen gemessen und systemseitig erfasst** werden. Bei komplexen Produktionsprozessen sind die wissenschaftlichen und physikalischen Wirkprinzipien, wie beispielsweise der Zusammenhang von Materialeigenschaften und Prozessparametern, nicht immer eindeutig mathematisch durch Formeln oder Algorithmen beschrieben. So sind die optimalen Prozessparameter oft empirisch auf Basis von mehreren Versuchsreihen ermittelt und nicht über physikalische Gleichungen errechnet worden. Dies erschwert die Umsetzung von Simulationen und die Einführung von KI-Systemen, die in der Regel jene mathematische Beschreibung als Basis benötigen. Um einen Zusammenhang zwischen Prozess- und Anlagenparametern sowie Produktqualität herzustellen, müssen auch **Produktfunktionalitäten** nicht nur qualitativ beschrieben, sondern auch nachgemessen werden können. Die Produktfunktionalitäten beschreiben dabei, welche Funktionen das hergestellte Produkt beim Kunden erfüllen soll, unabhängig von im Prozess

festgelegten Toleranzen und Qualitätskriterien. Hierfür und für die Erfassung der Einflussgrößen müssen neue Messsysteme entwickelt sowie bestehende Lösungen weiterentwickelt werden. Nicht bei allen Produkten ist die Funktion eindeutig durch messbare Kennwerte beschrieben.

Oftmals wird auch die ökologische Nachhaltigkeit von IT-Systemen und digitalen Lösungen an sich stark diskutiert. Unter dem Begriff Green IT wird an der Effizienzsteigerung der IT-Systeme gearbeitet.

- ◀ S. 21 [Bezug zu Layer 1, Kapitel 5.1.2, Technologisch.](#) Auch auf Anwenderseite gibt es Möglichkeiten, den Energie- und Rechenbedarf der eingesetzten Lösungen zu verringern. Unter dem Begriff Big Data werden alle verfügbaren und erfassbaren Daten einer Produktion gesammelt, um über Mustererkennung und Data Analytics Optimierungspotenziale zu erschließen. Diese großen Datenmengen liegen in der Regel unstrukturiert und komplex vor. Unter dem Begriff **Smart Data** versteht man die intelligente und spezifische Analyse und Auswertung der Datenmengen, um verwertbare Informationen zu erhalten. Je früher der Smart-Data-Ansatz in der Datensammlung eingesetzt wird, desto weniger Daten müssen insgesamt übertragen und gespeichert werden. Dadurch reduziert sich der Rechenaufwand und folglich der Energiebedarf der Systeme. Die Universität Bayreuth hat beispielsweise mit Unterstützung des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst (StMWK) einen Zertifikatskurs „Smart Data Academy“ zur Weiterbildung bayerischer Unternehmen aufgebaut. Neben grundsätzlicher Wissensvermittlung im Bereich Data Science wird in diesem Kurs auch eine Potenzialanalyse bei dem teilnehmenden Unternehmen durchgeführt (Campus-Akademie Universität Bayreuth, o. D.).



Innerhalb der Wertschöpfungskette gilt die Datenintegration als wichtiger Baustein für mehr ökologische Nachhaltigkeit. Durch die Einführung eines **digitalen Material-** beziehungsweise **Produktpasses** (DPP) strebt die Europäische Kommission an, dass Informationen zur Herstellung und Nutzung des Produkts über den gesamten Produktlebenszyklus mitgeführt werden müssen (Bundesverband der Deutschen Industrie, 2023). [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Produktpass.](#) Dies kann beispielsweise über die Einbettung eines QR-Codes oder auch über einen Digitalen Zwilling geschehen (2031 – 2036). Der DPP ermöglicht somit die eindeutige Zuordnung eines zu recycelnden Bauteils, der dort enthaltenen Bauelemente und der verarbeiteten Werkstoffe sowie der Nutzung des Bauteils. Dies ermöglicht eine effizientere und umfassendere Wiederaufbereitung des gesamten Bauteils oder einzelner Bauelemente als bisher und verringert das Abfallaufkommen.

- ◀ S. 65 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Schaffung von Transparenz und Nachprüfbarkeit von Daten.](#)
- Darauf aufbauend wurde von den Expertinnen und Experten über eine **Datenintegration über den gesamten Produktlebenszyklus** diskutiert. Da hierbei zunächst Dateneigentumsrechte sowie Datenschutzthemen eindeutig geklärt werden müssen, ist mit einer Umsetzung einer vollständigen Datenkette über den Produktlebenszyklus – angefangen bei den Ressourcen über die Herstellung bis zum Ende der Nutzungsphase – erst ab 2037 zu rechnen. Dafür ist es außerdem notwendig, dass die **Datenintegration innerhalb der Wertschöpfungskette** funktioniert, um Informationen über die Herstellung einzelner Produktkomponenten bis hin zum Produktlebensende zusammenführen zu können. Das kann bei Mehrkomponentensystemen beliebig komplex werden. Die Ansätze und Lösungen des Catena-X-Projekts (Catena-X, o. D.), in dem auf Basis der Gaia-X-Initiative ein Datenraum für die automobilen Wertschöpfungskette entstehen soll, könnten allerdings zeitnah erste branchenspezifische Lösungen bieten (2028 – 2035). Wichtig bei der Datenintegration sind zudem die Nachweisbarkeit der Daten sowie deren Integrität, um Manipulationen ausschließen zu können.

- ◀ S. 65 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenräume und Datenökosysteme.](#) Ein solcher Datenaustausch ist beispielsweise für die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks eines Produkts oder auch als Basis für den digitalen Produktpass notwendig.

## 5.2.2 Simulationen und Prognosen

Simulationen und Prognosen dienen der Vorhersage von Eigenschaften und Zuständen. So kann im Idealfall frühzeitig in Prozesse eingegriffen werden, um Fehler zu verhindern. Als Ergebnis können neben Kosten auch Ressourcen und Energie eingespart werden. Konkrete Anwendungen im Themenfeld Simulationen und Prognosen sind Predictive Maintenance, die Vorhersage von Produkteigenschaften, Vorhersagen in Echtzeit sowie Digitale Zwillinge im Prototyping über den gesamten Produktlebenszyklus und von Industrieparks und Unternehmensverbänden.

Bereits heute können Werkzeugzustände vorhergesagt und Maschinen vorausschauend gewartet werden. Für einzelne sehr komplexe Prozesse mit vielen Parametern müssen vorhandene Ansätze zu **Predictive Analytics** für eine zuverlässige Predictive Maintenance noch weiterentwickelt werden (bis 2026). Dies ist aktuell vor allem dann herausfordernd, wenn keine ausreichende Datengrundlage für die charakteristischen Merkmale über Ausfälle von spezifischen Maschinenteilen vorliegt. Bis 2026 sollten durch Weiterentwicklung von Berechnungsmodellen und Softwaresystemen für einen Großteil der Maschinen- und Anlagentechnik Predictive-Maintenance-Lösungen verfügbar sein. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2,](#)

◀ S. 64 [Einführung von Künstlicher Intelligenz \(KI\).](#) Verschiedene Forschungs- und Entwicklungsvorhaben widmen sich seit mehreren Jahren der Entwicklung solcher Lösungen. Beispielsweise forscht ein Konsortium aus den Firmen A. Eberle und microlab im Rahmen eines Verbundprojekts, das durch das Bayerische Verbundforschungsprogramm gefördert ist, an diesem Thema (mikrolab; A. Eberle, o. D.).

Der Einsatz solcher Anwendungen unterstützt neben der Vermeidung von Maschinenausfällen vor allem die Verringerung von Ausschuss, da Produktionsfehler vorhergesagt und deren Ursachen idealerweise rechtzeitig behoben werden können. Predictive Analytics helfen darüber hinaus, die Fehlerursache und fehlerhafte Maschinenteile zu identifizieren, was wiederum die Wartungszeit reduziert.

Aufbauend auf der Vorhersage von Prozessen wird durch digitale Anwendungen die **Vorhersage von Produkteigenschaften** auf der Basis von Fertigungsdaten ermöglicht. Notwendig dafür ist, dass alle Funktionalitäten der Produkte bekannt und messbar sind und in die Analysen einfließen. Durch die Kombination aus Fertigungsprozessüberwachung und -vorhersage sowie den Einfluss des Prozesses auf das Produkt können Algorithmen die Produkteigenschaften vorhersagen. Da hierfür noch einige Wirkmechanismen zwischen Prozessparametern und Produkteigenschaften untersucht werden müssen, ist mit einer Marktdurchdringung erst bis circa 2030 zu rechnen. Die Vorhersage von Produkteigenschaften dient als Grundlage für die weitere Optimierung von Prozessen und Bauteilen. Weiterhin können der Aufwand einer nachgelagerten Qualitätssicherung und der Ausschuss von Produkten reduziert werden.

Durch schnellere Softwaresysteme und effizientere Algorithmen lassen sich zukünftig auch **Vorhersagen in Echtzeit** treffen, sodass Fertigungsprozesse bei einer Fehlervorhersage reaktiv nachgesteuert werden können. Zusätzlich unterstützen hier schnellere Datenübertragungssysteme wie 5G. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.3, Kommunikationsnetze mit ausreichender Netzabdeckung sowie zu Dateninfrastruktur.](#) Je nach Prozessgeschwindigkeit reichen bei bisherigen Predictive-Systemen die Reaktionszeiten nicht aus, den Prozess rechtzeitig zu stoppen oder anzupassen. Lösungen für einen breiten Einsatz werden laut Meinung von Expertinnen und Experten etwa im Zeitraum von 2030 bis 2033 erwartet.

◀ S. 66  
◀ S. 67  
◀ S. 61 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung.](#) Die TH Deggendorf beispielsweise forschte bereits seit 2018 gemeinsam mit Beinbauer Automotive an einer Echtzeit-Vorhersage mittels KI, die durch das Bayerische Verbundforschungsprogramm gefördert wurde (Bayern Innovativ, o. D. c).



Die Informationen aus der Prozess- und Bauteilüberwachung fließen zurück ins Engineering werden dort wiederum in einen **Digitalen Zwilling** und in das **Prototyping** eingebunden. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung](#). Digitale Zwillinge ermöglichen die Datensammlung, -aufbereitung und -visualisierung in einem zentralen System, sodass alle Informationen aus unterschiedlichen Domänen zusammenfließen. Im Prototyping werden wesentliche Weichen für die ökologische Nachhaltigkeit des späteren Produkts gestellt. Durch die Einführung Digitaler Zwillinge im Prototyping können Vorhersagen über den Energiebedarf und den Materialeinsatz bei der Produktion wie auch im gesamten Produktlebenszyklus gemacht werden. Da hierfür zahlreiche Informationen zusammenlaufen müssen, ist die zeitliche Einordnung schwieriger zu treffen. Voraussichtlich ist allerdings nicht mit einer verbreiteten Umsetzung dieser Konzepte vor 2029 zu rechnen. [Siemens bietet seit rund fünf Jahren ein Softwaresystem für die grundlegende Umsetzung des Digitalen Zwillings im Engineering an \(Siemens Industry Software, o. D.\)](#) →



Aufbauend auf den Vorhersagemodellen für Prozesse, Maschinen und Produkte kann der **Digitale Zwilling** als fester Produkt- und Prozessbestandteil **über den gesamten Lebenszyklus** etabliert werden. Dafür müssen Produkte und Maschinen mit Sensorik zur Datenerfassung und -übertragung ausgestattet sein. Aktuell herrscht insbesondere noch Unklarheit bezüglich des Dateneigentums, denn bei komplexen Baugruppen haben mehrere Akteure aus der Lieferkette Interesse an den und Anspruch auf die erfassten Daten. Aufgrund dessen wird eine breite Umsetzung bei relevanten Produkten und Prozessen erst im Zeitraum von 2032 bis 2042 erwartet. Neben den Möglichkeiten eines nutzungsgerechteren Designs in nachfolgenden Produktversionen vereinfachen solche Digitalen Zwillinge die Wiederaufbereitung am Ende des Lebenszyklus.

Durch einen unternehmensübergreifenden Datenaustausch können laut Einschätzung von Expertinnen und Experten bereits ab 2035 ganze **Industrieparks und Unternehmensverbände über Digitale Zwillinge** verbunden werden. Hierbei geht es vor allem darum, Bedarfe – zum Beispiel von Energie – zusammenzuführen und aufeinander abzustimmen. Dadurch können beispielsweise Lastspitzen im Strombedarf reduziert werden, und zukünftig lässt sich womöglich auch die Logistik zusammenlegen. [Im kommunalen Umfeld wurde mit dem Projekt TwinBy in Bayern eine Initiative gestartet, um solche Digitalen Zwillinge umzusetzen \(Bayerisches Staatsministerium für Digitales, o. D.\)](#) →



### 5.2.3 Planung und Prozesse

Auch in der Planung und in der Ausführung von Prozessen können digitale Anwendungen eingesetzt werden, um die Entwicklung hin zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung zu unterstützen.

Innerhalb eines Fertigungsprozesses lassen sich über eine Kopplung von Produktionsplanung und Maschinendaten **Effizienzpotenziale** erschließen. Ein recht einfacher Weg ist dabei, zunächst den **Verbrauch an Betriebshilfsmitteln** wie Schutzgasen, Druckluft oder Schmierölen zu erfassen und zu analysieren. Bei einer digitalen Überwachung des Prozesses und einer guten Prozesssimulation lässt sich der Verbrauch schließlich bis auf den realen Bedarf verringern, wohingegen aktuell oft ein pauschaler Sicherheitswert genutzt wird. Zusätzlich können Lecks in Gas- oder Druckluftleitungen über Sensorik detektiert werden, die vor allem bei Druckluftleitungen ansonsten lange unbemerkt bleiben. Die Überwachung und Vorhersage von Verbräuchen bei Betriebshilfsmitteln kann schon heute meist mit einfachen digitalen Lösungen umgesetzt werden (Patel, 2022).



Durch den **Einsatz von KI** kann zukünftig auch der **Bedarf** neuer Prozesse vorhergesagt werden, und es lassen sich langfristige Prognosen erstellen. Dies betrifft neben Betriebshilfsmitteln auch andere Ressourcen, wie beispielsweise den Werkstoffeinsatz sowie den Energie- und Wasserbedarf. Der Einsatz von KI ist außerdem zur **Vorhersage** von Marktentwicklungen und Kundennachfragen möglich. Für eine ausreichend gute Aussagekraft sind Datenmenge und Datenqualität für das Training der KI entscheidend. Diese liegt in den meisten KMU heute so noch nicht vor. Je nach Komplexität des Prozesses und der gewünschten Simulation können unterschiedliche KI-Methoden eingesetzt werden. Daher gibt es bisher auch keine Plug-and-play-Lösungen, weshalb die verbreitete Implementierung der KI für diesen Einsatzzweck erst ab 2031 bis 2040 erwartet wird. Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Einführung von Künstlicher Intelligenz (KI). Die Plattform Lernende Systeme hat Beispiele für die Nutzung von KI unter anderem bei der Energieversorgung und -nutzung gesammelt (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, o. D.).<sup>3</sup>

◀ S. 64



Durch digitale Systeme und Überwachung können zudem **einzelne Produktionsprozesse optimiert** werden. Sind der Prozess sowie seine Einflussgrößen bekannt und können Maschinen und deren Zustände überwacht werden, verringert dies den Ausschuss und erhöht den Output. Dies ermöglicht eine Effizienzsteigerung, die neben der Produktivität auch der ökologischen Nachhaltigkeit zugutekommt. Je nach Komplexität des Fertigungsprozesses können bereits heute sehr viele Potenziale erschlossen werden (ab heute bis 2031). Beispielsweise hat ein im Rahmen des ZD.B Förderaufrufs 2017 gestartetes Projekt mittels Sensoriksystemen die Walzprofilherstellung optimiert und verbessert (data M Shee Metal Solutions, o. D.).



Die Datenerfassung für die Prozessoptimierung bildet zusätzlich die Grundlage dafür, **Produktions- und Fertigungsprozesse zu automatisieren**. Automatisierte Prozesse steuern und regeln sich weitgehend selbst, sodass nahezu keine Fehler mehr auftreten. Zur Automatisierungstechnik gehören dabei unterschiedliche Systeme, etwa Fließbänder, Robotik, Greif- und Erkennungssysteme sowie eine zugrunde liegende Steuerungstechnik mit dazugehöriger Planungs- und Überwachungssoftware. Vollständig automatisierte Prozesse gibt es in einzelnen Branchen und in der Großserienfertigung bereits recht umfangreich, wobei häufig im Falle erkannter Fehler oder der Qualitätssicherung weiterhin menschliche Arbeitskräfte notwendig sind. Je kleiner die zu fertigende Losgröße und je komplexer das Produkt, desto schwieriger ist es, eine Automatisierung umzusetzen, weshalb eine Marktdurchdringung erst in etwa 10 bis 15 Jahren (2032 – 2036) erwartet wird. Einige digitale, automatisierte Vorzeigefabriken existieren bereits in Deutschland, wie zum Beispiel das Siemens-Werk in Amberg (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. D. d).



<sup>3</sup> Eine Orientierungshilfe zum Einsatz von KI für ökologische Nachhaltigkeit bei Anwenderunternehmen bietet eine Veröffentlichung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aus dem Jahr 2022 (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022 b).



Die **Prozessoptimierung** kann zukünftig außerdem auch **entlang der Wertschöpfungskette** erfolgen. Dies ermöglicht beispielsweise die Fokussierung der Optimierung des Product Carbon Footprint (PCF), sodass das nachhaltigste Produktdesign auch anhand der nachfolgend möglichen Produktionsprozesse und des Nutzungsverhaltens des Endkunden ausgewählt werden kann. Wichtig für die Umsetzung dabei sind Daten aus den nachfolgenden Bearbeitungsschritten sowie über die tatsächliche Nutzung von Produkten. Je umfangreicher die Datenbasis ist, desto nachhaltiger kann die Produktgestaltung umgesetzt werden. Umgekehrt können in Produktionsprozessen, die zu einem späteren Zeitpunkt stattfinden, auch Informationen aus früheren Produktionsschritten einfließen. So können Fertigungsprozesse bestmöglich auf vorherrschende Rahmenbedingungen (z. B. die exakte Zusammensetzung des Eingangsmaterials) eingestellt werden. Dies vermeidet Ausschuss und spart Ressourcen. Wie eine industrielle Umsetzung eines solchen Ansatzes erfolgen kann, wird aktuell im Forschungsprojekt AdaProQ untersucht (AdaProQ, o. D.). Darüber hinaus können beispielsweise Lieferwege optimiert und Produktionskapazitäten besser ausgelastet werden (Fraunhofer IML, o. D. a; Catena-X, o. D.). Über Datenökosysteme, wie sie im Rahmen von Gaia-X entwickelt werden, lässt sich der dafür benötigte Datenaustausch um-

◀ S. 65 setzen (2030 – 2036). [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenräume und Datenökosysteme.](#)

Wird dabei auch die **Ökobilanzierung bereits in das CAD-System** integriert, können Designentscheidungen auf Basis von ökologischen Nachhaltigkeitsaspekten leichter getroffen werden.

◀ S. 61 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung](#) sowie zu [Werkzeuge und Kataloge von CAD-Systemen.](#)

◀ S. 62 Für einige Produkte funktioniert die Ökobilanzierung beziehungsweise das Life Cycle Assessment (LCA) bereits gut. Dies betrifft beispielsweise Verpackungsmaterialien (Tetra Pak, o. D.; Fraunhofer UMSICHT, 2019; Volkswagen, o. D.). Je komplexer das Produkt und die Produktionsprozesse, desto größer muss die Datenbasis sein, um geeignete Bilanzierungsmodelle abzuleiten. Aktuell wird ein LCA allerdings meist erst am Ende des Entwicklungsprozesses eines neuen Produkts vorgenommen. Der Einfluss von Designänderungen des Produkts auf den PCF muss mit jeder Iteration separat berechnet werden. Aus diesem Grund sollte das Ziel sein, die Ökobilanzierung bereits als festen Baustein in CAD-Tools zu integrieren.

Die breite Nutzung solcher Ökobilanzierungen in CAD-Systemen wird ab circa 2028 erwartet. Eine

Weiterentwicklung dessen werden **digitale Entscheidungsunterstützungssysteme** sein, die voraussicht-

◀ S. 64 lich auf KI-Methodiken beruhen werden. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Einführung von Künstlicher Intelligenz \(KI\).](#) Sie sollen dabei helfen, die unterschiedlichen Dimensionen der Nachhaltigkeit zu beachten und auch Auswirkungen von getroffenen Designentscheidungen zu beziffern (2034 – 2040).

Darüber hinaus wird der **Einsatz von KI** zukünftig dazu beitragen, eine **maximale Ressourceneffizienz** zu ermöglichen. Bereits während der Entwicklung neuer Produkte kann KI eingesetzt werden, beispielsweise bei der Entwicklung von neuen, effizienteren oder nachhaltigeren Werkstoffen. Hier steht die Forschung zwar noch relativ weit am Anfang, aber es gibt einige Institute, die sich diesem Thema widmen (Helmholtz, 2022; Werkstoffe in der Fertigung, o. D.; Carl Zeiss Stiftung, o. D.). Bereits teilweise im industriellen Einsatz hingegen ist eine KI, die in Recyclingtechnologien Anwendung findet und insbesondere bei der Erkennung von Werkstoffen eingesetzt wird (WeSort.AI, o. D.). Darüber hinaus wird KI auch im Produktdesign und in der Prozesssteuerung eingesetzt. Da meist die Algorithmen für jeden Prozess neu programmiert oder zumindest angelernt werden müssen, wird mit einer Marktdurchdringung erst ab etwa 2036 gerechnet.



Betrachtet man die gesamte Produktionsstätte, können über Datenanalysen weitere Potenziale im Bereich der Gebäudedefunktionen (Licht, Lüftung, Heizung) erschlossen werden. Neben bereits etablierten Bewegungsmeldern können **intelligente Steuerungen** über die Integration und Analyse unterschiedlicher Daten (Produktionspläne, Personalpläne, Intralogistik etc.) **Gebäudedefunktionen (Smart Building)** an den realen Bedarf anpassen und auch Vorhersagen über zukünftige Bedarfe treffen. Dabei fließen alle verfügbaren Daten des Bürogebäudes oder der Produktionshalle in einem Gebäudemanagementsystem zusammen. Es gibt bereits erste Bürokomplexe in Europa, die als Smart Building ausgezeichnet wurden (ubm Magazin, o. D.). Einige große Unternehmen bieten entsprechende digitale Lösungen an (z. B. Bosch, Siemens, EDAG), weshalb bereits in den nächsten zwei bis sieben Jahren wesentliche Fortschritte erwartet werden.



Darüber hinaus können **Intralogistikprozesse** durch die Unterstützung digitaler Systeme und Datenanalysen **im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit** besser geplant und optimiert werden. Hier geht es vor allem darum, Wege zu verkürzen und Leerfahrten von Staplern und fahrerlosen Transportsystemen (FTS) zu vermeiden. Auch im Verpackungs- und Lagerbereich können digitale Systeme zur Effizienzsteigerung eingesetzt werden. Zur Optimierung vorhandener Systeme können Algorithmen oder auch KI-Ansätze genutzt werden. Dies ermöglicht es beispielsweise, vorhersagbare Fahrten optimal zu planen und somit den sowohl für die Produktionsabläufe als auch im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit effizientesten Materialfluss zu erreichen. Das Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik IML betreibt in diesem Themenfeld Forschung (Fraunhofer IML, o. D. b). Die Expertinnen und Experten gehen davon aus, dass innerhalb der nächsten acht Jahre die größten Potenziale in diesem Themenfeld gehoben werden.



Durch die Weiterentwicklung der **Steuerungstechnik** und den Einsatz digitaler Vorhersagemodelle werden **Fertigungsprozesse** zukünftig **immer weiter flexibilisiert**. Das bedeutet, dass Produktionsprozesse in kürzeren Intervallen an- und abgeschaltet oder auch beschleunigt und verlangsamt werden können. Dies wird vor allem relevant im Hinblick auf potenziell schwankende Energieverfügbarkeiten und -preise, verursacht durch den Ausbau erneuerbarer Energien. Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.1, Technologien zur Energiespeicherung. Die Bemühungen vieler Unternehmen gehen bereits heute in Richtung flexiblerer und modularer Fertigungen (Elektroauto-News, 2022). Daher wird im Zeitraum von 2028 bis 2031 mit einer großflächigen Umsetzung und Nutzung solcher Systeme gerechnet.

◀ S. 54

**Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR)** können ebenfalls Nachhaltigkeitspotenziale entfalten. Dabei ist zu unterscheiden, in welchem Prozessschritt diese Technologien ihre Anwendung finden. In der **Fabrik- und Produktionsplanung** können durch Extended Reality (XR), also den Einsatz von AR und VR, Produktionsprozesse und Handgriffe virtuell durchgespielt werden, um eine möglichst effiziente Platzierung von Anlagen, Werkbänken, Regalen und Weiterem zu erreichen. In der **Produktentwicklung beziehungsweise dem Engineering** lassen sich durch AR- und VR-Systeme Entwicklungszyklen beschleunigen, und es kann die Anzahl an Prototypen verringert werden. Auch in der **Wartung und im Schulungsbereich** können durch AR- und VR-Anwendungen Reisen durch Servicemitarbeitende reduziert und Wartungsarbeiten beschleunigt werden. Die Unternehmen EOS und toolcraft beispielsweise setzen bereits XR-Anwendungen in diesen Bereichen ein (EOS, 2022; Solidwhite, o. D.). Eng verknüpft mit AR und VR ist der jeweils dazugehörige Digitale Zwilling. Über diesen werden die virtuellen Welten simuliert und Anpassungen aus der AR und VR in die Planung zurückgespiegelt. Aktuell engagieren sich viele Forschungseinrichtungen und -projekte in der Entwicklung und zeigen Anwendungsfälle auf: In Bayern gibt es beispielsweise drei XR Hubs in München, Nürnberg und Würzburg als Anlaufstellen (XR HUB Bavaria, o. D.). Bis sich allerdings tatsächlich eine verbreitete industrielle Nutzung durchgesetzt hat, wird es laut Expertenmeinung etwa acht bis vierzehn Jahre dauern.



## | VISION: 2045

Ein großes und umfangreiches Ziel, das durch eine gute Abstimmung sowie die Kombination aus Digitalisierungslösungen erreicht werden kann, ist die **papierlose Fertigung**, in der Informationen ausschließlich in digitaler Form transportiert werden. Neben der offensichtlichen Reduktion des Papierbedarfs werden dadurch auch zahlreiche Prozesse beschleunigt. Hierbei ist vor allem die direkte datenbasierte Verbindung der unterschiedlichen Domänen ein wichtiger Aspekt. Durch die direkte Datenverbindung des Engineerings mit der Fertigung können Erkenntnisse und Wissen besser zurück in die Produktentwicklung fließen und so auch im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit zu schnelleren Verbesserungen führen. Da es je nach Komplexität der Fertigung und der Anzahl beteiligter Domänen eine größere Herausforderung darstellt, komplett auf eine papierlose Fertigung umzustellen, ist eine Umsetzung in einer breiteren Zeitspanne von 2024 bis 2032 wahrscheinlich. Allerdings gibt es bereits jetzt Vorreiter in der papierlosen Fertigung, wie die Rex Gummiteniken aus Baden-Württemberg (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2016).



- Innerhalb der Lieferkette kann durch ein **nachhaltiges Lieferantenmanagement** in ökologischer Perspektive nachhaltiger gehandelt werden. Digitale Technologien können hierbei durch die Berechnung von Nachhaltigkeitskennwerten auf Basis von Angeboten unterstützen. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenmanagement und -austausch über Unternehmen hinweg](#). So können entsprechende Systeme eine bestmögliche Kombination unterschiedlicher Lieferanten mit differenzierten Angeboten vorschlagen. Hierbei können unterschiedliche Aspekte mit einfließen, wie beispielsweise Transportwege, Materialherkunft, Energieeffizienz der Produktionsprozesse, Einsatz erneuerbarer Energien und viele mehr. Das Lieferantenmanagement nachhaltiger zu gestalten wird bereits heute durch das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz gefordert, weshalb mit einer flächendeckenden Umsetzung in den kommenden fünf Jahren gerechnet wird. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.4, Regulatorische Rahmenbedingungen](#). Die Umsetzung eines nachhaltigen Lieferantenmanagements erfordert insbesondere bei komplexen Wertschöpfungsketten einen multilateralen Datenaustausch zwischen verschiedenen Organisationen. Dies kann beispielsweise durch Datenökosysteme, wie sie im Rahmen von Gaia-X entwickelt werden, erfolgen. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenräume und Datenökosysteme](#).
- ◀ S. 64
  - ◀ S. 68
  - ◀ S. 65

- Je besser das Lieferantenmanagement digitalisiert ist, desto einfacher fällt auch eine **bedarfsoptimierte Logistik**. Dabei gilt es, die Logistik entlang der Wertschöpfungskette anhand prognostizierter Bedarfe zu steuern. Ziel dabei ist es, die Überproduktion von Produkten zu vermeiden sowie die Lagerhaltung zu reduzieren. Dies trägt dazu bei, den Flächen- und Energieverbrauch zu senken. Für die bedarfsoptimierte Logistik sind ein flexibles Lieferantenmanagement und eine Vorhersage der Bedarfe notwendig. Daher ist die Umsetzung entsprechender Anwendungen voraussichtlich erst ab 2030 verbreitet, sie kann bei komplexen Lieferbeziehungen aber auch bis 2036 in der Umsetzung dauern. Konkrete Lösungsansätze könnten zum Beispiel über eine stärkere Nutzung von Data Science und KI-Ansätzen in der Bedarfplanung erarbeitet werden. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Einführung von Künstlicher Intelligenz \(KI\)](#).
- ◀ S. 64

Aus der Verbindung der bedarfsoptimierten Logistik und der flexibilisierten Produktionsprozesse ergibt sich insgesamt eine **Flexibilität in der Produktion**, die sich genau am Bedarf und an den Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Energie- und Rohstoffverfügbarkeit, orientieren kann. So kann sich die Produktion flexibel an sich ändernde Umgebungen anpassen. Dies stärkt die Resilienz des produzierenden Unternehmens enorm. Dafür müssen allerdings die Lieferketten nicht nur vertikal, sondern im gesamten Netzwerk und damit auch horizontal flexibilisiert werden. Dies bedeutet, dass das einkaufende Unternehmen flexibler in der Auswahl der Lieferanten wird. Dabei können wiederum digitale Datenökosysteme unterstützend wirken. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenräume und Datenökosysteme.](#) Für die Erreichung einer flexiblen Produktion ist die Analyse unterschiedlichster Daten aus verschiedenen Quellen notwendig, um vorausschauend Produktionsanpassungen umzusetzen. Je nach zu fertigendem Produkt wird eine Flexibilisierung beliebig komplex, weshalb seitens der Expertinnen und Experten erst ab 2037 mit einer Umsetzung gerechnet wird.



Ab 2043 wird laut Meinung von Expertinnen und Experten mit der Verbreitung **vollautonom operierender Produktionsstätten** gerechnet, bei denen keinerlei menschliches Eingreifen mehr notwendig ist. Es gibt zwar bereits heute vollautonomes Lights-out-Manufacturing, beispielsweise in Japan, und auch in Bayern zeigt die Firma Wöhner (Wöhner, o. D.) ein Paradebeispiel einer vollautonomen Fabrik. Die Herausforderung ist allerdings, dass auch bei diesen Fabriken im „Notfall“ weiterhin ein Mensch eingreifen muss. Aktuelle Systeme sind in der Regel nicht auf alle Eventualitäten vorbereitet und beispielsweise nicht in der Lage, sich selbst oder gegenseitig autonom zu reparieren. Dank großer Entwicklungsschritte der vergangenen Jahre sind allerdings Sensorik- und Steuerungssysteme bereits so weit fortgeschritten, dass eine gleichbleibend hohe Qualität in der Fertigung erzeugt werden kann, sofern keine Ausfälle vorkommen (Industrie Wegweiser, 2019).

Vor dem Hintergrund des auch zukünftig steigenden Fachkräftebedarfs und der weiteren Diversifizierung von Berufsbildern ist auch die Entwicklung einer **intelligenten und automatisierten Fachkräfteplanung** (Skilled Based Scheduling) interessant. [Bezug zu Layer 1, Kapitel 5.1.3, Fachkräftemangel.](#) Diese ermöglicht das automatisierte und flexible Einsetzen von Fachwissen an den relevanten Stellen in einer Organisation. Das bedeutet auch, dass keine festen Stellenbeschreibungen und Positionen mehr existieren, sondern der Personaleinsatz nach Bedarf erfolgt. Dadurch kann sowohl verstärkt ungelerntes Personal eingesetzt als auch schnell auf Krankheits- und Urlaubszeiten reagiert werden. Hierfür werden eine Art digitale „Skill-Bibliothek“ und der Einsatz von KI benötigt, um der komplexen Aufgabe angemessen zu begegnen und die vorhandenen Fähigkeiten den vorherrschenden Bedarfen zuordnen zu können. Es gibt auch hier bereits erste Ansätze und Anbietende, wobei es voraussichtlich noch wenigstens 12 bis 15 Jahre dauern wird, bis der Einsatz solcher digitalen Anwendungen die Norm darstellt.

## 5.2.4 Produktdesign und Engineering

Auch in den frühen Phasen des Produktlebenszyklus, also im Produktdesign und Engineering, bietet der Einsatz digitaler Anwendungen großes Potenzial für die Realisierung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung. Da Aspekte wie die Auswahl von Materialien oder die notwendigen Fertigungsschritte zur Herstellung eines Produkts einen großen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck haben können, bieten digitale Lösungen im Engineering und im Produktdesign einen großen Stellhebel für die Klimaneutralität.

Über das sogenannte **Robust Design** und **Design for Six Sigma** werden Produkte oder Prozesse so ausgelegt, dass die vom Kunden definierten Qualitätsanforderungen erfüllt werden und möglichst geringe Abweichungen auftreten (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, o. D.). Durch Robust Design als Weiterentwicklung des Design for Six Sigma sollen Produkte so entwickelt werden, dass sie möglichst unempfindlich gegenüber Schwankungen im Herstellungsprozess sind. Dabei steht statt der Toleranzen einzelner Fertigungsschritte die Funktionalität des Endprodukts im Vordergrund, um somit den Kundenwunsch bestmöglich zu erfüllen. Dadurch kann der Ausschuss minimiert und der Materialeinsatz optimiert werden. Design for Six Sigma wird in vielen Unternehmen bereits angewendet, könnte aber noch auf mehr Prozesse und Produkte übertragen werden. Da es hierfür schon zahlreiche Erfahrungswerte und entwickelte Ansätze gibt, wird nach Einschätzung der Expertinnen und Experten bis zum Jahr 2026 der überwiegende Teil der produzierenden Unternehmen diese Methodik nutzen.

Darauf aufbauend werden definierte **Prozesse für die Bilanzierung des Ökodesigns** in Zukunft relevanter. Neben der Definition von Standards für die Ökobilanzierung geht es dabei auch um ein noch zu entwickelndes Scoring, anhand dessen sich das Ökodesign der Produkte miteinander vergleichen lässt.

- ◀ S. 60 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Standardisierung der Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks.](#)
- ◀ S. 20 [Bezug zu Layer 1, Kapitel 5.1.1, Green Pressure sowie Wahrnehmung der Bepreisung.](#) Aufgrund der steigenden regulatorischen Anforderungen werden große Entwicklungssprünge in den kommenden drei bis fünf Jahren erwartet. Hierbei unterstützt auch die virtuelle Produktentwicklung, um **Emissionen, die während des Lebenszyklus entstehen**, bereits im Engineering berücksichtigen zu können. Die technischen Entwicklungen innerhalb der CAD-Software, die als Basis der Produktentwicklung weithin genutzt werden, lassen eine immer bessere Integration zusätzlicher Daten zu. Im Rahmen eines Digitalen Zwillings und des Digitalen Produktpasses werden Emissionen im gesamten Lebenszyklus zukünftig besser erfasst und ausgewertet. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Werkzeuge und Kataloge von CAD-Systemen.](#) [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Systeme zur Realisierung eines Digitalen Zwillings.](#) [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Produktpass.](#) Diese Informationen können dann wiederum in die Entwicklung neuer klimafreundlicher Produkte einfließen. Eine umfassende Datenlage über den Produktlebenszyklus erwarten Expertinnen und Experten in etwa 2031 bis 2034. Die Grundlage für die rasche Weiterentwicklung der Werkzeuge für die Ökobilanzierung wird durch viele aktive Forschungseinrichtungen und Studiengänge gebildet (Graz University of Technology, o. D.; Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, o. D.; Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, o. D.).
- ◀ S. 61
- ◀ S. 65





**Eine Produktion, die auf die Produktfunktionalität ausgerichtet ist**, kann deutlich effizienter sein als eine Produktion, deren Qualität auf Einzelteil- und Fertigungsschrittebene bewertet wird. Wesentliche Basis dafür ist, dass die Produktfunktionalität vollständig messbar ist. Neben geeigneten Messsystemen fehlt teilweise noch das Verständnis von Wirkzusammenhängen. Hier können Simulationswerkzeuge

- ◀ S. 61 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung](#) und KI-Systeme unterstützen.
- ◀ S. 64 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Einführung von Künstlicher Intelligenz \(KI\)](#): Wenn der Produktionsprozess anhand der Erreichung der Funktionalität gesteuert wird anstatt von Toleranzbändern einzelner Qualitätsmerkmale, können Prozessvariablen meistens weitergesteckt werden, was Spielraum für die energie- und ressourcenbasierte Optimierung gibt. Sollten sich Unternehmen auf eine Umstellung basierend auf der Funktionalität einlassen, könnte eine solche Optimierung bereits 2027 bis 2030 umgesetzt werden.

Bereits im Produktdesign sollte auf die **Kreislauffähigkeit der Produkte** geachtet werden. Zunächst liegt der Fokus hierbei vor allem auf dem **Second-Life-Ansatz**. Dieser umfasst die Wiederverwendung, Aufbereitung oder Reparatur der Produkte nach einer ersten Nutzungsphase, um sie für die gleiche oder eine alternative Anwendung erneut zu nutzen. Wichtig für die Umsetzung eines Second Life ist also vor allem, dass das Design der Produkte auf eine einfache Reparierbarkeit sowie lange Lebensdauer und Robustheit ausgerichtet ist. Hierbei können digitale CAD- und Simulationssysteme helfen, die Produkte auf Basis ihrer Kreislauffähigkeit zu optimieren. Die Kreislauffähigkeit spielt auch im Product Lifecycle Management (PLM) eine wichtige Rolle. Um die Wirtschaftlichkeit für Unternehmen beizubehalten, rücken hierbei neue (digitale) Geschäftsmodelle in den Fokus, weshalb mit einer weitreichenden Umsetzung auch erst im Zeitraum von 2027 bis 2031 gerechnet wird. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.9, Entwicklung](#)

- ◀ S. 72 [neuer Geschäftsmodelle](#).

Die Weiterentwicklung von **Design-Tools** wird es zukünftig erleichtern, **den Product Carbon Footprint (PCF)** des Produkts von Beginn an zu berechnen und auch direkt den maximal möglichen **Recyclinganteil** in der Produktion zu nutzen. Die Herausforderung ist hierbei unter anderem die Berücksichtigung von Scope-3-Emissionen in der Bilanzierung des Designs. Der entscheidende Ansatz ist, die Bilanzierung bereits im Designprozess vorzunehmen und nicht erst am fertigen Produkt die entstandenen Emissionen aufzusummieren. So kann eine Optimierung eines Produkts mit Hinblick auf den PCF erfolgen. Eine Automatisierung dieser Berechnungen ist zum aktuellen Zeitpunkt nur für einzelne Produkte vorhanden, die von vielen produzierenden Unternehmen oft selbst entwickelt wurden, weswegen ein vollumfänglicher Einsatz solcher Tools erst etwa 2032 bis 2035 erwartet wird. [Für die Massivumformung hat die Industrieinitiative NOCARBforging2050 ein Tool entwickelt \(Industrieverband Massivumformung, o. D.\), mit dem die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Designprozess möglich sein soll \(Konstruktionspraxis, 2021\).](#)



Eine Erweiterung der Möglichkeiten im **Design** stellt die vollumfängliche Berücksichtigung der Aspekte einer **Circular Economy** dar, zu **Deutsch: Kreislaufwirtschaft**. Hierbei geht es nicht nur um ein Second Life, sondern auch um die Berücksichtigung alternativer Materialien, Prozesse und Designoptionen für ein möglichst langes Produktleben sowie ein gleichwertiges Recycling. Da das Design und die Materialauswahl die nachfolgenden Produktionsschritte grundlegend beeinflusst, werden im Engineering die Weichen für die ökologische Nachhaltigkeit des Produkts festgelegt. Diese Kopplung aus Design und Konstruktion sowie Kreislaufwirtschaft stellt eine Erweiterung der Tools zur Berechnung des PCF dar und wird voraussichtlich auch gemeinsam entwickelt. Daher geht man von einer ähnlichen Zeitspanne aus (2032 bis 2035).

Eine Kombination all dieser vorherigen Anwendungen führt zu einem **Design für Klimaneutralität**. Dabei werden neben der Berücksichtigung aller Emissionen im Produktlebenszyklus und in der Werkstoffherstellung auch Kreislaufwirtschaftsaspekte, wie Reparatur und Recyclingfähigkeit, sowie Produktionsprozesse auf maximale Nachhaltigkeit und Klimaneutralität abgestimmt. Beachtung finden auch Einflüsse auf Ökosysteme, um klimaneutrale oder sogar klimapositive Produkte zu entwickeln. Expertinnen und Experten gehen davon aus, dass diese Designmethodik in etwa 2035 bis 2045 intensiveren Einsatz finden wird.

## 5.2.5 Energiesysteme und Energiemanagement

Durch steigende Energiekosten und einen steigenden Anteil an produzierenden Unternehmen, die Teile der benötigten Energie selbst erzeugen, steigt für die Industrie die Bedeutung eines effizienten Energiemanagements. Auch hier können digitale Anwendungen eine wichtige Rolle bei der Erreichung einer klimaneutralen Produktion spielen.

- ◀ S. 58 Bereits heute werden in vielen Unternehmen **Energiedaten und der Ressourcenbedarf** in der Produktion erhoben. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitale Technologien](#). Ab dem 01.01.2024 sind alle Unternehmen ab 250 Mitarbeitenden nach einer EU-Verordnung (RICHTLINIE 2014/95/EU) verpflichtet, einen Nachhaltigkeitsreport für das Geschäftsjahr 2023 zu erstellen. Im Rahmen dessen müssen die Energie- und Ressourcenbedarfe erfasst werden. In den folgenden Jahren wird diese Verordnung auf weitere Unternehmensgrößen ausgeweitet werden. Im Rahmen von Qualitätsmanagementsystemen, wie beispielsweise ISO 9001 und das Eco-Management and Audit Scheme (EMAS), werden diese Daten ebenfalls erfasst. Bis 2025 wird es in allen Betrieben Standard sein, Energiedaten zu erfassen und Ressourcenbedarfe zu kennen.

- Dies schafft bis 2025 Transparenz über Energieverbräuche in allen Unternehmen und deren zeitabhängige Energieflüsse, speziell auch an den Netzanschlusspunkten, durch die produzierende Unternehmen und Energieerzeuger mit dem Energienetz verbunden sind. Dies bildet die Grundlage für **netzdienliche Leistungen**. Netzdienliche Leistungen sind Leistungen eines Messstellenbetreibers (MSB), die über ein intelligentes Messsystem für den Netzbetreiber erbracht werden können. Dabei gehen sie, nach § 33 Messstellenbetriebsgesetz über die Standard- und Zusatzleistungen des Messstellenbetriebs sowie der Datenkommunikation hinaus und sind in der Lage, netzdienlich zu wirken. Sie helfen, Engpässe im Netz vorübergehend zu überbrücken und damit wertvolle Zeit bis zur Umsetzung des notwendigen Netzausbaus zu schaffen. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Flexibilisierung der Energienetze mit Hinblick auf deren Abschaltbarkeit, Steuerung und Zellenbildung](#). Beispiele von netzdienlichen Leistungen sind Primärregelleistung, Blindleistungsmanagement und Frequenzstabilisierung (Deutsche Energie-Agentur; Deloitte, 2019).
- ◀ S. 68

Ab 2025 werden **Virtuelle Kraftwerke** für produzierende Unternehmen regenerative Energie bereitstellen oder netzdienliche Leistungen erbringen können. Ein Virtuelles Kraftwerk ist ein Zusammenschluss von dezentralen Einheiten im Stromnetz, die über ein gemeinsames Leitsystem koordiniert werden. Die Einheiten können Stromproduzenten wie Biogas-, Windkraft-, Photovoltaik-, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)- oder Wasserkraftanlagen, Stromverbraucher, Stromspeicher und Power-to-X-Anlagen (Power-to-Gas, Power-to-Heat) sein. Zweck des Virtuellen Kraftwerks ist die gemeinsame Vermarktung von Strom und Flexibilität aus dem Schwarm der aggregierten Anlagen. Jeder dezentral produzierende, speichernde oder verbrauchende Akteur am Strommarkt kann Teil eines Virtuellen Kraftwerks werden (Next Kraftwerke, o. D.). Durch das Zusammenschließen entsteht neue Wirtschaftlichkeit für Kleinanlagen. [Energieversorger wie die EnBW bieten bereits das „Poolen“ solcher Anlagen zu Virtuellen Kraftwerken zur Direktvermarktung als Dienstleistung an \(Interconnector, o. D.\).](#)



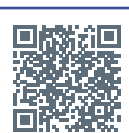
Bereits heute wird **erneuerbare Energie** vielerorts in der Produktion eingesetzt, zum Beispiel in der Eigenversorgung. Durch den weiteren Ausbau der Eigenversorgung und der Grünstromtarife wird es bis 2030 mit wenigen Ausnahmen Standard sein, 100 Prozent erneuerbare Energie bei der Produktion einzusetzen. [Firmen wie die Alois Müller GmbH versorgen sich als produzierendes mittelständisches Unternehmen bereits heute zu 100 Prozent selbst mit erneuerbaren Energien \(Alois Müller, o. D.\).](#) Ausnahmen bilden hier die energieintensiven Industrien oder Unternehmen, die stofflich auf fossile Ressourcen angewiesen sind. Aber auch die energieintensiven Industrien haben schon heute mittelfristig Lösungen zur Eigenversorgung entwickelt. [Die Max Bögl GmbH am Standort Sengenthal entwickelte zum Beispiel im Projekt „INZELL“ ein Energiemanagementsystem, um bis 2030 nicht nur bilanziell den Standort eigenversorgen zu können \(Forschungsprojekt INZELL, o. D.\).](#)



## | VISION: 2045

Ab 2028 sollen **Wärmenetze** massiv ausgebaut werden, und bis 2032 soll die Infrastruktur für regenerative Wärmeversorgung und Einspeisung überschüssiger Wärme in Wärmenetze mit verschiedenen Temperaturniveaus weitestgehend aufgebaut sein. Forschungsprojekte wie beispielsweise das Projekt MEMAP kommen zu dem Ergebnis, dass Wärmenetze als Prosumernetze fungieren werden. Das bedeutet, die Wärmenetze müssen bidirektional, also in beide Richtungen, funktionieren und somit in der Lage sein, Wärme an den Konsumenten abzugeben und gleichzeitig Wärme vom Produzenten auch wieder aufzunehmen (Memap, o. D.).

Ab 2029 wird verstärkt eine **energieadaptive Produktionsplanung und Steuerung** eingesetzt. Diese führt ab circa 2033 zur automatisierten Steuerung von Produktionsprozessen auf Basis von Energieverfügbarkeiten, beispielsweise gesteuert durch den Energiepreis oder die Netzfrequenz (vgl. **inhärente Energiespeicher** im nächsten Kapitel). Dies wird bis circa 2040 Standard in der Produktionsplanung und Steuerung sein. Wie industrielle Prozesse mithilfe synchronisierter und energieadaptiver Produktionstechnik auf eine fluktuierende Energieversorgung ausgerichtet werden können, untersuchen die Projekte SynErgie und SynErgie II (SynErgie, o. D.; Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften TUM School of Engineering and Design, o. D.). Ein Beispiel für ein Unternehmen, das bereits heute in Teilen energieadaptiv produziert, ist die Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, o. D.).



Erste **energieadaptive Produktionsstandorte** beginnen sich ab 2035 zu vernetzen und ihre Produktionsplanung untereinander abzustimmen. Unternehmen profitieren durch kleiner ausgelegte Erzeugungsanlagen. Netzbetreiber profitieren durch planbare und gleichmäßigere Netzauslastungen. Die Umsetzung kann durch finanzielle Anreize wie verringerte Netzentgelte gesteuert werden. Diese Vernetzung wird bis 2045 immer weiter fortschreiten und fortlaufend optimiert.

Die **Transparenz der Energieverbräuche** schafft Bedarfstransparenz für die Netzbetreiber in Echtzeit. Diese Transparenz ist notwendig, um bei einem erneuerbaren Energiesystem, in dem der Einklang zwischen Verbrauch und Erzeugung entscheidend ist, zu jeder Zeit möglichst in Echtzeit die Energieverbräuche zu kennen. Diese Information ist eine wichtige Entscheidungshilfe, um gezielt Erzeuger und Verbraucher steuern zu können, um so das Stromnetz jederzeit stabil zu halten. Bis 2037 lässt sich das Energiesystem vollständig auf allen Spannungsebenen abbilden. Erste regionale Ansätze gibt es bereits, wie zum Beispiel das Projekt KOSiNeK (Bayern Innovativ, o. D. d).



Parallel entwickelt sich von 2028 bis 2032 das **bidirektionale Laden** zum Standard bei Neufahrzeugen, sodass auch der private Fuhrpark als Speicher in die automatisierte Energiebedarfsplanung von Unternehmen integriert werden kann. Des Weiteren können private Pkw als Heimspeicher und zur Netzstabilisierung eingesetzt werden. Das Project SCALE beschäftigt sich damit, die dafür notwendigen Voraussetzungen in der Infrastruktur zu schaffen (Scale Horizon, o. D.). Hier müssen jedoch noch maßgebliche Verbesserungen der Rechtsposition und der Prozessstandardisierung vorangetrieben werden.



Ab 2032 werden Energiesysteme nur noch **simulationsgestützt geplant**. Dies dient zum Beispiel als wichtiger Baustein zur künftigen Gestaltung und Umwidmung des Gasnetzes. Hier gibt es verschiedene Szenarien: das Erdgasnetz als Speicher mit zehn Prozent Wasserstoff und höheren Anteilen nach Ertüchtigung oder Methanisierung des Wasserstoffs und Speicherung in der bestehenden Netzinfrastruktur.

Ab 2030 wird mit günstigerem Wasserstoff der globale Hochlauf der **H2-Wirtschaft** beginnen. Die niedrigeren Preise entstehen durch die Skalierung der Produktionskapazitäten mit günstigeren und effizienteren Technologien, sinkende Erzeugungskosten der erneuerbaren Energien und die Verteuerung der fossilen Brennstoffe, beispielsweise durch den CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel (Deutscher Bundestag, 2020). Fragestellungen und Trends bei der Etablierung der Wasserstoffwirtschaft und -infrastruktur, wie Digitalisierung, Brennwert-Detektion, Netzmanagement, Bedarfsplanung und Beschaffungswesen, sollen bis 2038 abschließend geklärt sein. Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.1, Technologien zur Energiespeicherung und

◀ S. 54

◀ S. 21

Bezug zu Layer 1, Kapitel 5.1.2, Energieträger Wasserstoff.

## 5.2.6 Speichieranwendungen

Durch die erhöhte Nachfrage nach und die immer weiter steigende Produktion von erneuerbaren Energien werden für eine Vollzeitversorgung neben den Flexibilisierungsmaßnahmen auch **Energiespeicher** notwendig. Auch in diesem Bereich können digitale Anwendungen einen wichtigen Beitrag zur Erreichung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung leisten.

**Strom- wie auch Wärmespeicher** schaffen eine zeitliche Entkopplung der Energienutzung von der Erzeugung. Dabei bieten unterschiedliche Speichertechnologien verschiedenste Vor- und Nachteile hinsichtlich Speicherdauer, -leistung und -effizienz, Leistungs- oder Kapazitätskosten und Platzbedarf. Kurzzeitspeicher ermöglichen zum Beispiel Lastspitzkappung oder Blindleistungsmanagement im Unternehmen. Hierfür können Schwungradspeicher oder Kondensatoren verwendet werden. Häufig übernehmen momentan Lithiumionenspeicher diese Funktion, gerade wenn die mittelfristige Speicherung mit abgedeckt wird (Stunden bis Tage). In diesem Fall können gegenüber dem Netzbetreiber auch netzstabilisierende Dienstleistungen wie Primärregelleistung angeboten werden. Zur langfristigen „saisonalen“ Speicherung von Energie kann die chemische Wandlung etwa in Wasserstoff genutzt werden.

- ◀ S. 54 [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.1, Technologien zur Energiespeicherung](#) und [Bezug zu Layer 1, Kapitel 5.1.2, Energieträger Wasserstoff](#)
- ◀ S. 21 [Energieträger Wasserstoff](#) Strom lässt sich auch in Wärme „speichern“. Bei der Wärmespeicherung von Vorteil sind für die mit dem Volumen skalierende Speicherkapazität aber nur quadratische mit der Oberfläche skalierende thermische Verluste.

Durch die **Vernetzung von (Strom-)Speichersystemen** ergeben sich heute bereits Synergieeffekte, wie beispielsweise durch die von der Firma Sonnen angebotenen Speicher- und Erzeugungslösungen im privaten Sektor (sonnen, o. D.). Ab 2025 sollte die Möglichkeit der Netzkommunikation und damit die Vernetzung von Speichern Standard eines jeden Speichersystems sein. Eine weitere Vernetzung und beispielsweise Kommunikation mit dem Stromnetz erlauben Anwendungen wie **netzdienliche Dienstleistungen**, hier zum Beispiel „Storage-as-a-Service“. Beispielsweise kann ein Hausbesitzer mit großem Speicher für die eigene PV-Anlage auch dem Nachbarn die Speicherung als Dienstleistung anbieten. Bereits heute sind solche Speicher vereinzelt im Einsatz (egrid applications & consulting, o. D.).

Die Vernetzung von Speichersystemen und die Speicheroptimierung inklusive inhärenter Speicher sind Voraussetzungen für **intelligente Quartiere**. Das können Wohn-, Gewerbe-, Industrie- oder Mischquartiere sein. Ein produzierendes Unternehmen im Quartier speist beispielsweise Abwärme in das Wärmenetz ein, während die PV-Anlagen auf den Wohngebäuden den Überschussstrom der Produktion bereitstellen. Zur Realisierung solcher Szenarien sind übergreifende und kommunizierende Energiemanagementsysteme notwendig. Inhärente Speicher können in Zeiten günstigen Stroms beispielsweise Kapazitäten (Flexibilitäten) in der Produktion, Temperaturtoleranzbänder, Wärme- oder Kältespeicher und auch stoffliche Speicher sein. Im Idealfall reagieren Speicher flexibel und autonom auf die Stromverfügbarkeit beziehungsweise den Strompreis und fahren flexibel am technischen wie auch wirtschaftlichen Optimum. Hier gibt es bereits Dienstleister, die solche Optimierungen und Simulationen anbieten, wie zum Beispiel VK Energie GmbH (VK Energie, o. D.) oder Consolinno GmbH (Consolinno Energy, o. D.). Der Vorteil ist, dass durch intelligente Quartiere eine Senkung der Energiekosten und des Rohstoffverbrauchs sowie Mehrfachnutzung des gleichen Energieträgers erreicht werden kann. Ab circa 2028 wird jedes neu geplante Quartier ein „intelligentes Quartier“ sein, und bis 2045 werden diese Quartiere optimiert, untereinander vernetzt und Bestandsquartiere nachgerüstet sein. [Bezug zu Layer 3, Kapitel](#)

- ◀ S. 67 [5.3.3, Dateninfrastruktur.](#)

Bis 2030 werden Speichersysteme über ihre Lebenszeit und den Einsatzbereich **vollständig digital verfolgbar** sein. Unter anderem lassen sich die Gesundheit des Speichers während des Betriebs und die Historie der Verwendungsart über eine Blockchain (Produktion, erster Einsatz, Second Life) nachvollziehen. Die Anwendungsart und der Einsatzbereich können den Restwert oder den weiteren Einsatz der Zelle beeinflussen. Ein Projekt, in dem an der Umsetzung eines auch von der EU geforderten Digitalen Produktpasses für Batterien gearbeitet wird, in dem all diese Informationen zusammenfließen sollen, ist das Forschungsprojekt Battery Pass (Bayern Innovativ, o. D. e).



## 5.2.7 R-Strategien

Wie bereits angedeutet wurde, bieten digitale Anwendungen auch das Potenzial, die Entwicklung zu einer Kreislaufwirtschaft als einen Baustein für die klimaneutrale Produktion zu leisten. In diesem Kontext werden im Folgenden digitale Anwendungen erläutert, die einen Beitrag zur Umsetzung einer oder mehrerer der sieben sogenannten R-Strategien leisten. Diese Strategien sind Reduce (reduzieren), Reuse (wieder nutzen), Repair (reparieren), Refit (überholen), Rebuild (erneuern), Refurbish (aufbereiten) und Recycle (recyklieren) (Haufe, 2023).

Sobald die technologischen Entwicklungen so weit sind, können über eine **simulationsbasierte Werkstoffentwicklung** neue Potenziale für ressourcen- und energieschonendere Materialien erschlossen werden. Aktuell ist die Werkstoffentwicklung sehr stark auf Versuche angewiesen, was die Entwicklung sehr zeitaufwendig und teuer macht. Basis hierfür sind Materialdatenbanken und Simulationswerkzeuge, die Mikrosimulation hinsichtlich der atomaren Ordnung und Mikrostruktur sowie Makrosimulation bezüglich mechanischer Eigenschaften verknüpfen können. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Automatisierung und Simulationswerkzeuge](#).

- ◀ S. 61 [Materialdatenbanken](#) umfassen dabei Messwerte aus der Forschung zu Materialzusammensetzungen, -eigenschaften und -herstellung, aus welchen über Datenanalyse neuartige Werkstoffe simuliert werden können. Insbesondere der Aufbau der Datenbanken ist ein aufwendiges Unterfangen, weshalb die Zeitspanne, bis die Werkstoffentwicklung rein simulationsbasiert ablaufen wird, von 2026 bis 2037 reicht. [Es gibt einige Forschungseinrichtungen, die sich bereits heute diesem Thema widmen, wie beispielsweise das Fraunhofer IWM \(Fraunhofer IWM, o. D.\).](#) →



Digitale Systeme können zudem eine verbesserte **Werkstoffsammlung und -aufbereitung** ermöglichen. Durch Sensorsysteme und den Einsatz von Erkennungssoftware können produzierende Unternehmen ihre anfallenden Werkstoffabfälle einfacher klassifizieren und sortieren, um sie so gezielter einer erneuten Nutzung oder einem Recycling zuzuführen. Durch den Digitalen Produktpass können Produkte nach ihrem Lebensende gezielter zerlegt und die enthaltenen Komponenten und Werkstoffe aufbereitet werden. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Digitaler Produktpass](#). Die Kooperationsinitiative R-Cycle arbeitet zum Beispiel an einem Digitalen Produktpass für Verpackungen (ProData, o. D.). Je sortenreiner die Werkstoffe gesammelt werden, desto hochwertiger ist in der Regel das Rezyklat. Besonders Recyclingunternehmen setzen bereits heute stark auf digitale Systeme in der Abfallsortierung und -aufbereitung. Produzierende Unternehmen könnten hier noch an einigen Stellen aktiver werden. In den kommenden sechs bis zehn Jahren wird mit deutlichen Fortschritten in diesem Bereich gerechnet.

- ◀ S. 65 [Die Kooperationsinitiative R-Cycle](#) arbeitet zum Beispiel an einem Digitalen Produktpass für Verpackungen (ProData, o. D.). Je sortenreiner die Werkstoffe gesammelt werden, desto hochwertiger ist in der Regel das Rezyklat. Besonders Recyclingunternehmen setzen bereits heute stark auf digitale Systeme in der Abfallsortierung und -aufbereitung. Produzierende Unternehmen könnten hier noch an einigen Stellen aktiver werden. In den kommenden sechs bis zehn Jahren wird mit deutlichen Fortschritten in diesem Bereich gerechnet.



Recyclingunternehmen setzen außerdem bereits heute auf die **Anwendung von Messsystemen zur Abfallklassifizierung und -aufbereitung**. Je nach Art des Abfalls kommen dabei unterschiedliche Sensorsysteme infrage. Kunststoffabfälle werden heutzutage oft durch optische Systeme erfasst und sortiert, was jedoch bei dunkel gefärbten Kunststoffen zu Schwierigkeiten führen kann. Bei metallischen Abfällen wird hingegen meist auf eine Kombination aus mehreren Messsystemen gesetzt, beispielsweise optische Sensoren, induktive Sensoren, Laser- und Röntgentechnologie. Zusätzlich werden Systeme zur Trennung der identifizierten Abfälle benötigt, was je nach Abfallart, -größe und -gewicht auf unterschiedliche Art geschehen kann, beispielsweise durch Windabscheider, Luftdüsen, Fallgitter, Robotik und andere Greifsysteme. [Oft wird die Verarbeitung der anfallenden Sensordaten durch eine Klassifizierung durch KI unterstützt, wie beispielsweise das Unternehmen WeSort.AI zeigt \(WeSort.AI, o. D.\).](#) Noch ist es nicht für alle Abfallmischungen möglich, eine sortenreine Trennung zu erreichen, weshalb zusätzlich der Fokus auf eine möglichst verursachernahe Abfallsortierung gelegt werden sollte. Expertinnen und Experten gehen hier von einem Zeitraum von 2029 bis 2035 für einen breiten Einsatz solcher Lösungen aus.





Neben der reinen Werkstofferkennung müssen die **Aufbereitungs- und Recyclingtechnologien** weiterentwickelt und vollständig etabliert werden, sodass auch für kleinere Abfall- und Werkstoffmengen Recycling betrieben werden kann. Vielen Recyclingtechnologien liegt aktuell das Prinzip „zerkleinern – waschen – sortieren“ zugrunde. Weitere Recyclingoptionen bestehen beispielsweise im Kunststoffbereich durch das chemische Recycling (Fraunhofer CCPE, 2021) und als letzte Option das thermische Recycling. Für komplexe Mehrkomponentensysteme wird vor allem die Demontage einen sehr wichtigen Baustein im Recycling darstellen, um funktionsfähige von funktionsunfähigen Komponenten zu trennen und wertvolle Ressourcen zu sichern. Aktuell läuft die Demontage noch fast ausschließlich von Hand, was den Prozess teuer und zeitaufwendig macht. Es gibt deshalb aktuell nur wenige Unternehmen, die diesen Aufwand in Kauf nehmen, wie beispielsweise die Firma Mangelberger Elektrotechnik (Mangelberger Elektrotechnik, o. D.). Für die Automatisierung der Demontage werden digitale Systeme zur Erkennung des vorliegenden Produkts, seiner Komponenten und enthaltenen Rohstoffe benötigt. Dies kann durch die Einführung des Digitalen Produktpasses vereinfacht werden. Die Umsetzung der Demontage wird für Mehrkomponentensysteme ab etwa 2032 bis 2045 erwartet. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2,](#)



◀ S. 65 [Digitaler Produktpass.](#)

**LCAs** können auch für **neue, nachhaltigere Werkstoffe** eingesetzt werden. Dies ergänzt die (simulationsbasierte) Werkstoffentwicklung, um die ökologische Nachhaltigkeit des neuen Werkstoffs bereits in diesem Prozessschritt beurteilen zu können. Hierfür müssen in Simulationen und Analysen Daten aus der Rohstoffherzeugung und Werkstoffverarbeitung genauso einfließen wie die Vorhersage eventueller positiver Effekte durch den neuen Werkstoff im Produktlebenszyklus. Dies bedeutet, dass bereits bei der Entwicklung neuer Werkstoffe die potenziellen Anwendungsgebiete nicht nur mitgedacht, sondern auch komplett berechnet werden müssen. Umgekehrt können LCAs der Produkte dabei unterstützen, anforderungsnah neue, ökologisch nachhaltige Werkstoffe besser zu definieren, um so eine gezieltere Werkstoffentwicklung zu ermöglichen. Ein Verbundprojekt arbeitet aktuell an der Entwicklung nachhaltiger Materialien für Automobile unter Nutzung von LCAs (BMW Group, 2023). Durch die stetigen Weiterentwicklungen im Bereich der LCAs und aktuell laufende Forschungsprojekte wird mit einem weitreichenden Einsatz von LCAs in der Werkstoffentwicklung etwa 2030 bis 2034 gerechnet.



Mit Unterstützung von digitalen Systemen wie Datenökosystemen kann ein **Anforderungsmanagement zur Ressourcenschonung** umgesetzt werden. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Datenräume und Daten-](#)

◀ S. 65 [ökosysteme.](#) Hierbei geht es darum, die gesamte Wertschöpfungskette miteinander zu vernetzen und in der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Denn jede Komponente bringt Anforderungen und Herausforderungen mit sich, wenn sie ressourcenschonender entwickelt wird. So kann es beispielsweise sein, dass sich die Prozessschritte verändern müssen oder andere Materialien eingesetzt werden. Diese Anforderungen zu überblicken und darauf basierend die ressourcenschonendste Produktvariante auszuwählen kann durch digitale Systeme unterstützt werden. Als Beispiel können hier Sankey-Diagramme genannt werden, die produktbezogene Energie- und Ressourcenströme darstellen und Aussagen über den Energie- und Ressourcenverbrauch eines konkreten Produkts treffen. Dies kann auch bei der Planung eines neuen Produkts helfen, die ressourcenschonendste Variante auszuwählen (ConTech Software & Engineering, o. D.). In den kommenden vier Jahren erwarten Expertinnen und Experten hier deutliche Entwicklungssprünge.



Zusätzlich kann mittels digitaler Anwendungen **über Branchengrenzen** hinaus eine **Kopplung von Input- und Output-Ressourcen oder Reststoffen** erfolgen. Oftmals können Rest- oder Abfallstoffe eines Unternehmens als Rohstoff in einer anderen Branche eingesetzt werden. Digitale Plattformen können helfen, diese Einsatzmöglichkeiten zu erkennen und Ein- sowie Verkäufer und potenzielle Wiederaufbereiter zusammenzubringen. Es gibt bereits mehrere Projekte und auch einige wenige kommerzielle Anbieter, die solche Plattformen entwickeln und anbieten (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2022; UWAZI Tech, o. D.). Allerdings gibt es hierbei noch Weiterentwicklungspotenzial hinsichtlich der automatisierten, intelligenten Verknüpfung potenzieller Rohstoffströme, weshalb eine verbreitete Nutzung erst etwa 2029 bis 2032 erwartet wird.



Die Flexibilisierung von Fertigungsprozessen ist eine Basis für die vollständige Umsetzung einer **marktgerechten Produktion (Production on Demand)**. Aktuell werden für Lagerflächen produzierter oder auf Vorrat bestellter Waren große Mengen an Energie und Fläche gebraucht, da teilweise beheizte oder gekühlte Lager benötigt werden, um Qualitätsverluste zu vermeiden. Zusätzlich unterliegen viele Produkte einer lagerbedingten Alterung, weshalb im Überschuss eingekaufte Ware teilweise ungenutzt recycelt oder entsorgt werden muss. Eine Lösung dieses Problems liegt darin, die Produkte auf Basis einer exakten Vorhersage und im Rahmen einer voll flexibilisierten Produktion erst zum Zeitpunkt des Bedarfs herzustellen, um so Lagerung zu vermeiden. Digitale Systeme, wie beispielsweise ein digitales Lagerhaus, automatisierte Prozessplanung und -steuerung und schnelle Datenanalysen ermöglichen es, die Produktion erst bei Bestellung der Waren zu starten. Hierbei werden unter anderem auch große Erwartungen an den Einsatz Additiver Fertigungstechnologien gestellt. Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2,

◀ S. 63 Additive Fertigungstechnologien. Da viele Unternehmen und auch Produktionsprozesse noch nicht weitreichend genug digitalisiert sind, wird mit einer flächendeckenden Umsetzung erst 2030 bis 2035 gerechnet.

## 5.2.8 Geschäftsmodelle

Neben der Digitalisierung von Geschäftsprozessen bieten digitale Technologien auch die Möglichkeit, neue Geschäftsmodelle zu realisieren, die einen Beitrag zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung leisten.

So beginnen Unternehmen bereits heute, verstärkt in digitale Geschäftsmodelle wie **Pay-per-Use-Modelle und Betreibermodelle** zu investieren. In solchen Modellen verbleibt das Eigentum des Produkts beim Hersteller, und der Kunde bezahlt im Sinne eines Leasings für die Nutzung. Der Nachhaltigkeitsaspekt dabei ist, dass die Hersteller dadurch verstärkt auf Langlebigkeit und Reparierbarkeit ihrer Produkte setzen und oftmals auch für die Rücknahme ausgedienter Maschinen und Anlagen verantwortlich sind. Zusätzlich bieten Pay-per-Use-Modelle auch für den Kunden monetäre Anreize für eine effizientere Nutzung der Produkte, was Energie und Ressourcen einsparen kann. Um diese Modelle umsetzen zu können, sind digitale Systeme zur Überwachung der Nutzung beispielsweise im Rahmen von IIoT-Plattformen und zur nutzungsbedingten Abrechnung notwendig. Für die Abrechnung kann unter anderem auf

◀ S. 58 Blockchain-Technologie gesetzt werden. Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Industrial-Internet-of-Things(IIoT)-

◀ S. 65 Plattformen sowie zu Schaffung von Transparenz und Nachprüfbarkeit von Daten.

Es sind aber auch klassischere Bezahlmodelle denkbar. Einige Industrieunternehmen haben diese Art der Geschäftsmodelle bereits für sich entdeckt, wie beispielsweise KAESER Kompressoren, EOS, Miele und einige mehr. (Kunststoffe.de, 2022; KAESER Kompressoren, o. D.; Miele, o. D.; EOS, o. D.). Daher wird davon ausgegangen, dass sich bis 2028 in vielen Bereichen Pay-per-Use-Modelle etabliert haben werden.



Eine noch größere Produktverantwortung bergen sogenannte **Sharing- & Pfand-Geschäftsmodelle**. Durch Pfandsysteme erhält das produzierende Unternehmen mit größerer Wahrscheinlichkeit seine Produkte zurück, um diese effektiv recyceln oder wiederaufbereiten zu können. Insbesondere bei Produkten mit wertvollen Komponenten und Rohstoffen ist das für Unternehmen ein zunehmend attraktives System. In Sharing-Geschäftsmodellen wird dasselbe Produkt von mehreren Kunden, zum Beispiel über ein Verleihsystem, genutzt. Dadurch sind in Summe weniger Produkte notwendig, was den Ressourcenverbrauch reduziert. Sowohl Sharing- als auch Pfand-Geschäftsmodelle können von Unternehmen mithilfe digitaler Anwendungen effizient realisiert werden. Während solche Geschäftsmodelle im B2C-Bereich heute bereits weitverbreitet sind, erwarten Expertinnen und Experten eine breitere Umsetzung solcher Modelle in der Industrie bis zum Jahr 2030.

Im Rahmen der Energiewende und mit dem Einsatz erneuerbarer Energien werden Stromspeicher immer relevanter, sodass sich auch das Geschäftsmodell **(virtueller) Stromspeicher als Dienstleistung** verstärkt durchsetzen wird. Dabei dient der Stromspeicher als Puffer für Überstromproduktion und wird vom Betreiber als Dienstleistung für Netzbetreiber oder auch Stromproduzenten angeboten. Dieses Modell gibt es für Privatpersonen bereits heute, es wird mit weiterem Ausbau der erneuerbaren Energien aber auch für Industriebetriebe interessant. Zusätzlich werden Speicher im Multi-Use-Konzept genutzt. Neben der Nutzung des Speichers als Puffer werden diese betriebs- und netzseitig zum Ausgleich von Lastspitzen sowie zum Bereitstellen von Primärregelleistung und Blindleistungsmanagement eingesetzt. Parallel zur Entwicklung von zeit- und lastabhängigen Stromtarifen werden diese

◀ S. 62 Geschäftsmodelle 2027 bis 2032 relevanter. [Bezug zu Layer 3, Kapitel 5.3.2, Echtzeitregelungssysteme.](#)

Ökolabel sind bereits vor allem aus der Lebensmittelbranche und vermehrt auch bei Textilien verbreitet. Auch im Industrieumfeld werden zukünftig verstärkt Ökozertifikate und -label ein Geschäftsmodell für Dienstleister darstellen. Dabei kann die ökologische Nachhaltigkeit eines Unternehmens über digitale Systeme, wie beispielsweise über den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck oder zertifizierte LCA-Analysen, nachgewiesen und über **Green Labelling** zertifiziert werden. Das wiederum kann für das entsprechende Unternehmen

◀ S. 30 Wettbewerbsvorteile im Markt bedeuten. [Bezug zu Layer 1, Kapitel 5.1.5, Nachhaltigkeitsklassifizierung.](#)

Zertifizierungen kosten in der Regel Geld, zusätzlich bedarf es zumeist einer begleitenden Beratung hinsichtlich der Erreichung nötiger Anforderungen. Das verstärkte Aufkommen von Green Labelling ist voraussichtlich von 2029 bis 2035 zu erwarten.

Für ein ganzheitliches **Lifecycle Management** eines Unternehmens müssen sehr viele Daten und Informationen, wie zum Beispiel die LCAs der einzelnen Produkte, an einer zentralen Stelle zusammenfließen. Darauf basierend werden Entscheidungen bezüglich der Entwicklung neuer Produkte und der Anpassung bestehender Produktlinien getroffen. Viele Unternehmen, insbesondere KMU, können hierbei Unterstützung benötigen, denn häufig haben sie noch nicht ausreichende Kompetenzen im eigenen Haus aufgebaut, um so eine Analyse vollumfänglich durchzuführen. Für andere Unternehmen wiederum bietet es sich an, sich mit dem Aufbau eines Unterstützungsangebots für die eben genannten Unternehmen zu beschäftigen. Bereits heute gibt es Unternehmen, die die Industrie bei ihrem Lifecycle Management unterstützen. Expertinnen und Experten erwarten eine weitere Verbreitung solcher Geschäftsmodelle im Zeitraum von 2029 bis 2045.





## LAYER 3 RAHMEN- BEDINGUNGEN

Die gute Botschaft vorweg: Es ist vieles da. Technologien müssen nicht grundlegend neu entwickelt werden, sondern vielmehr weiterentwickelt, um sie in der breiten Industrie und Energiewirtschaft zum Einsatz zu bringen. Komplexitäts- und Kostenreduktion sind dabei zwei häufig adressierte Ziele. So sind KI- und Simulationswerkzeuge sowie digitale Werkzeuge zur Ökobilanzierung bereits heute für spezifische Anwendungen verfügbar. Die Implementierung und der Betrieb sind jedoch heute noch mit hohem Aufwand zum Beispiel bei der Datenaufbereitung verbunden, wodurch entsprechende digitale Lösungen heute vor allem in Großunternehmen eingesetzt werden.

Neben dem Aus- und Aufbau von Infrastruktur werden auch einige „weiche“ Faktoren adressiert, die bei der Schaffung von geeigneten Rahmenbedingungen berücksichtigt werden sollten. Hervorzuheben ist hierbei die Verankerung der Themen ökologische Nachhaltigkeit und Digitalisierung in schulischer und beruflicher Ausbildung sowie in der beruflichen Weiterbildung, um heutige und zukünftige Fachkräfte in der Breite mit den notwendigen Fähigkeiten für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung auszustatten. Ein weiterer zentraler Aspekt liegt darin, ein Bewusstsein für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung bei allen produzierenden Unternehmen zu schaffen und einen Transfer in eine breite Anwendung zu realisieren.

Layer 3 bietet somit Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Verbänden und Politik eine Übersicht der Handlungsfelder, die wichtig sind, um eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung umsetzen zu können.



## 5.3 Layer 3: Rahmenbedingungen

Das folgende Kapitel beschreibt Rahmenbedingungen, die gegeben sein müssen, um Anwendungen in der Breite realisieren zu können und so die Vision einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung zu erreichen. Diese sind nach übergeordneten Themen und Handlungsfeldern sortiert: nicht digitale Technologien, digitale Technologien, Infrastruktur, regulatorische Rahmenbedingungen, Awareness bei produzierenden Unternehmen und Transfer in eine breite Anwendung, Mindset bei Unternehmen und Konsumenten, Kompetenzen und Wissen bei Fachkräften, betriebswirtschaftlicher Fortschritt und volkswirtschaftlicher Fortschritt.

Die einzelnen in diesem Kapitel beschriebenen Aspekte stellen Handlungsfelder dar, die einen positiven Beitrag zur Erreichung der Vision leisten und einen breiten Einsatz der in Layer 2 geschilderten Anwendungen ermöglichen. Die in den Kapiteln 5.2.4 „Regulatorische Rahmenbedingungen“ bis 5.3.9 „Volkswirtschaftlicher Fortschritt, aufgeführten Aspekte spiegeln keine Priorisierung wider und erheben auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie dienen zur Veranschaulichung konkreter Aktivitäten, die in dem jeweiligen Handlungsfeld möglich sind und von denen durch die Expertinnen und Experten ein positiver Beitrag zur Erreichung der Vision erwartet wird.

### ◀ S. 58 5.3.1 Nicht digitale Technologien

Um eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung bis zum Jahr 2045 realisieren zu können, ist eine Weiterentwicklung nicht digitaler Technologien notwendig. Dies betrifft die Bereiche Technologien zur Energiespeicherung, Sektorenkopplung sowie erneuerbare Energien, die im Folgenden geschildert werden. Der in diesem Kapitel geschilderte Entwicklungsbedarf bezieht sich vorrangig auf physische Aspekte in den adressierten Themen. Sollte darüber hinaus auch die Weiterentwicklung digitaler Aspekte für die jeweiligen Themen notwendig sein, wird dies in [Kapitel 5.3.2](#) erläutert.

#### ◀ S. 25 **Technologien zur Energiespeicherung**

◀ S. 40

◀ S. 46 **Energiespeicherung erfolgt durch Wandlung von beispielsweise Strom in elektrochemische Energie oder in Wärmeenergie. Je nach Wandlungspfad sind die Kosten- beziehungsweise die Wandlungseffizienzen besser oder schlechter. Deshalb sieht man bereits heute eine starke Diversifizierung der Speichertechnologien. Je nach Anwendungsfeld sind unterschiedliche Parameter relevant. Dazu zählen unter anderem die volumetrische oder gravimetrische Speicherdichte, der Preis pro Kilowatt(stunde), die Lade- und Entladeeffizienz oder -leistung sowie die Speicherdauer. Speicher sind gerade im Kontext der Sektorenkopplung notwendig und ermöglichen die Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch von Energie wie beispielsweise Strom, Wärme und Mobilität. Die grundlegenden Speichertechnologien sind bereits heute vorhanden, die maßgeblichen Weiterentwicklungen werden Preisreduktion, Verfügbarkeit und Ressourcenabhängigkeit sein (Universität Leipzig, o. D.).**

◀ S. 47

**Kurzzeitspeicher:** Weiterentwicklung bis 2030 erwartet

Unter Kurzzeitspeichern versteht man Anlagen zur Speicherung von Energie, bei denen eine häufige Be- und Entladung erfolgt. Das übergeordnete Ziel ist somit eine Speicherung über einen kurzen Zeitraum zum Ausgleich der auftretenden Residuallast. Die Zeitdauer der angestrebten Speicherung liegt hier im Bereich von wenigen Sekunden bis hin zu einigen Stunden. Kurzzeitspeicher eignen sich gut, um Lastspitzen zu glätten, die zum Beispiel durch Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen oder das Anfahren von Maschinen erzeugt werden. Aber auch für die Verschiebung von Erzeugungsspitzen über den Tag hinweg sind Kurzzeitspeicher geeignet. Als Beispiele sind hier Superkondensatoren, Batterien und Schwungradspeicher zu nennen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. D. e). Die Technologien sind bereits gut erforscht und werden durch Skalierung und Marktdiversifizierung bis 2030 kosteneffizienter in der Produktion eingesetzt werden können.

### **Hochtemperaturwärmespeicher:** Weiterentwicklung bis 2030 erwartet

Hochtemperaturspeicher sind Speichertechnologien, die Wärme ab einer Temperatur von 400 °C einspeichern. Hochtemperaturspeicher werden interessant für Industrieprozesse, die zyklisch hohe Temperaturen erreichen müssen. Auch Überschussstrom kann verwendet werden, um einen Speicher zu erhitzen und die Wärme zu einem anderen Zeitpunkt zu nutzen. Besonders interessant ist hier das Potenzial von Hochtemperaturspeichern, die bestehende Kraftwerksinfrastrukturen flexibilisieren, indem sie Prozesswärme speichern und Prozessdampf bereitstellen können (Energie Campus Nürnberg, o. D.). Aktuell existieren hier zahlreiche Forschungsprojekte, vor allem im Bereich der verwendbaren Materialien, wie beispielsweise das Projekt TheMatIK unter Beteiligung des Fraunhofer UMSICHT, das sich mit der Eignung von metallischen Phasenwechselmaterialien (PCM) und metallischen Verkapselungen als Wärmespeicher beschäftigt (Fraunhofer UMSICHT, o. D.). Außerdem befinden sich erste Prototypen in Planung oder bereits im Betrieb (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2019 a). Bis 2030 werden für weitere Anwendungen und Temperaturniveaus Speicherlösungen entwickelt.

### **Einsatz von Wasserstoff als Energieträger in der Produktion:**

#### ◀ S. 56 Schwerpunkt der technologischen Entwicklung ab 2030 bis 2045

Die Erzeugung von Wasserstoff aus Überschussstrom kann für das zukünftige Energiesystem eine entscheidende Rolle spielen. Stromschwankungen, die durch erneuerbare Energien entstehen, könnten durch die Umwandlung von Strom in Wasserstoff zwischengespeichert und zu einem anderen Zeitpunkt wieder genutzt werden. Erste Projekte zeigen die technische Machbarkeit der Wasserstoffanwendungen und der Marktmechanismen. Eine Speicherung von Wasserstoff ist mittlerweile auch mit unterschiedlichen Möglichkeiten realisierbar, beispielsweise in Drucktanks, verflüssigt oder durch bestimmte Trägermedien absorbiert (Helmholtz, o. D.). Wasserstoffanwendungen werden zukünftig in immer mehr Bereichen eine wirtschaftlich attraktive Variante sein. Auch die bayerische Wasserstoffstrategie beschäftigt sich intensiv mit den Anwendungsfeldern von Wasserstoff sowie dem Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur. So gliedern sich die strategischen Ziele wie folgt: Fördern von Innovation und Erreichen von Technologieführerschaft, Beschleunigung der industriellen Skalierung und Wirtschaftlichkeit sowie schnellstmöglicher Einsatz von Wasserstoff in der breiten Praxisanwendung (Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B), o. D.). Mit der Skalierung der Produktion und der Kostendegression bei Erzeugungsanlagen etabliert sich die Wasserstoffwirtschaft zunehmend, und ab 2030 werden deutlich mehr Akteure diesen Markt vorantreiben.

### **Sektorenkopplung**

**In der konservativen Energietechnik wurden die Sektoren Wärme, Strom und Mobilität in der Vergangenheit separat betrachtet. Zum Beispiel wurde die Wärmeversorgung in einem Produktionsbetrieb über einen Spitzenlastkessel geplant. In den künftigen integrierten Energieversorgungskonzepten müssen alle Sektoren gemeinsam berücksichtigt werden, da sich hier enorme Energieeffizienz- und Einsparungspotenziale verbergen. Speziell bei der Defossilisierung des Wärmesektors ist die Kopplung mit dem Stromsektor relevant (Fraunhofer ISI, 2018).**

### **Substitution von Erdgas in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und in Blockheizkraftwerken (BHKW):**

Weiterentwicklung bis 2030 erwartet

Durch mehrere Marktmechanismen, wie beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Bepreisung und externe Faktoren wie den Ukrainekrieg, steigt der Druck, Erdgas in Energieerzeugungsanlagen zu substituieren. Ersatzbrennstoffe wie Bio-, Klär- oder Holzgas werden bis 2030 die wirtschaftliche Alternative darstellen. Das Stichwort „H<sub>2</sub>-ready“ rückt Wasserstoff als eine weitere Möglichkeit des Ersatzes von Erdgas in den Fokus. Hierbei sollen BHKWs für eine zukünftige Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff gerüstet werden. Damit ergibt sich in Kombination mit der Nutzung von Wasserstoff als Energiespeicher eine interessante Möglichkeit zur kombinierten Nutzung als Speicher und Substitut (Stadtwerke Haßfurt, o. D.).

### **Bidirektionales Laden:** Schwerpunkt der technologischen Entwicklung ab 2025 bis 2035

Die Technologie des bidirektionalen Ladens beschreibt die Möglichkeit, Energie anstatt wie üblich in eine Richtung, vom Ladepunkt in das Fahrzeug, in beide Richtungen zu verschieben. Somit kann Energie vom Fahrzeug in das Stromnetz oder eigene Haus verschoben werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, ein Elektrofahrzeug auch als Pufferspeicher für erneuerbaren Strom oder zur Netzdienstleistung zu nutzen. Einige Forschungsprojekte haben sich in der Vergangenheit bereits mit der Thematik beschäftigt und gezeigt, dass eine Unterstützung des Netzes mit bidirektionalem Laden möglich ist (Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2019 a). Zum jetzigen Stand bieten erste Elektrofahrzeuge die Funktion für bidirektionales Laden an, ebenso gibt es bereits Hersteller, deren Wallboxen die Funktion unterstützen (Vattenfall, o. D.). Bidirektionales Laden wird durch neue Geschäftsmodelle und ein größeres Angebot an Fahrzeugmodellen, die diesen Standard verbauen, ab 2025 ein wichtiges Feature für Besitzer von E-Fahrzeugen. Bis dahin müssen die entsprechenden Gesetzgebungen und Regularien für einen flächendeckenden Einsatz des bidirektionalen Ladens geschaffen werden.

### **Wärmepumpen:** Schwerpunkt der technologischen Entwicklung ab 2023 bis 2030

Die Wärmepumpe ist Stand 2021 im Neubau die am häufigsten genutzte Technologie zur CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmeerzeugung, vorausgesetzt erneuerbarer Strom ist zum Betrieb der Wärmepumpe verfügbar. Über 50 Prozent der im vergangenen Jahr verbauten Heizungen waren Wärmepumpen (Statistisches Bundesamt, 2022 b). Bis zum Jahr 2030 werden die Hersteller eine entsprechende Weiterentwicklung der Wärmepumpen forcieren. Im industriellen Kontext liegt der notwendige Temperaturbereich zur Nutzung für Prozesswärme deutlich höher als in der Anwendung zum Heizen im Haushalt, weshalb die Nutzung von Wärmepumpen in der Industrie noch nicht weitverbreitet ist. Aktuelle Entwicklungsergebnisse liefern aber auch für die Anwendung in Industrieprozessen mit bis zu 150 °C erste Produkte (Bayerischer Energiepreis, 2022). Die Wärmepumpe wird durch den enormen Bedarf und die Entwicklungen der Hersteller bis 2030 den Marktanteil im privaten Bereich weiter ausbauen und letztendlich auch im industriellen Sektor Fuß fassen können.

### **Brennstoffzellenheizung:** Schwerpunkt der technologischen Entwicklung ab 2025 bis 2035

Als Heizung bietet die Brennstoffzelle den Vorteil, aus Wasserstoff direkt Strom und Wärme erzeugen zu können. Allerdings steht Wasserstoff kaum zur direkten Nutzung zur Verfügung. Das bedeutet, dass er heute noch aus Erdgas reformiert werden muss (Viessmann Climate Solutions, o. D.). Die Nutzung von Wasserstoff in der Wärmeerzeugung mit vorgelagertem Reformationsprozess ist mit Effizienzverlusten verbunden. Deshalb wird die Nutzung einer Brennstoffzellenheizung erst durch den Einsatz von grünem Wasserstoff nachhaltig. Voraussetzung für diese Nutzung ist eine entsprechende Wasserstoffinfrastruktur, die aber bis 2035 im privaten Umfeld kaum umsetzbar sein wird (Fraunhofer ISI; Fraunhofer ISE, 2019). Für die industrielle Nutzung, die bereits heute teilweise aus Überschussstrom Wasserstoff erzeugt, ist eine Rückverstromung des erzeugten Wasserstoffs mittels Brennstoffzellenheizung, der sogenannten umgekehrten Elektrolyse, sinnvoll. Mit der Skalierung der Produktion sowie der Kostendegression bei Erzeugungsanlagen etablieren sich diese auf dem Markt ab 2030 und werden mehr und mehr zur Anwendung kommen. [Bezug zu Einsatz von Wasserstoff als Energieträger in der Produktion.](#)

◀ S. 55

### **Auf regenerativer Fernwärme basierende Quartierslösungen:** Weiterentwicklung ab heute bis 2035

Unternehmen mit Hochtemperaturprozess können meist die Abwärme nicht vollständig vor Ort verwerten. Auch bei idealer Effizienz wird ein Wärmeüberschuss produziert. Häufig wurde bisher aus Kostengründen über Kühllösungen die Abwärme in die Umwelt abgegeben. Bei der Planung von Neubauquartieren wird künftig primär darauf geachtet, ob zur Wärmeversorgung ungenutzte Abwärme über Fernwärmenetze genutzt werden kann. Im Neubau lassen sich Wärmenetze leichter realisieren als im Bestand. Je nach verfügbarer Temperatur im Fernwärmenetz kommen zusätzlich Wärmepumpen in den Einsatz, um die vor Ort benötigten Temperaturniveaus zu erreichen. Gleichzeitig können die Wärmenetze auch als Temperatursenke verwendet werden, betrieben von Wärmepumpen für Kühlanwendungen. Fernwärmenetze können auch mit lokalen Nahwärmenetzen gekoppelt werden (Bundesverband Wärmepumpe, o. D.).

## | VISION: 2045

Der Einsatz regenerativer Fernwärme bietet dabei mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern als Quellen hohes Potenzial. Fernwärme per se deckt im Privaten heute einen Anteil von 14 Prozent der Wärmeerzeugung (Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK, o. D.). Mit den aktuellen Förderprogrammen, wie beispielsweise der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW), wird sich der Anteil, der durch regenerative Fernwärme gedeckt wird, bis 2035 vergrößern.

### **Erneuerbare Energien**

**Bereits heute ist in vielen Bereichen eine komplette Versorgung der Produktion durch erneuerbare Energien möglich. Die Technologien sind vorhanden, es wird aber weiterhin Verbesserungen in der Effizienz, der Materialwahl und den Kosten geben. Speziell erneuerbarer Strom wird für die Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Mobilität in großer Menge benötigt. Hierzu rücken einige Technologien in Zukunft noch stärker in den Fokus:**

#### **Organische Photovoltaik (PV):** Schwerpunkt der technologischen Entwicklung ab 2025 bis 2035

Die organische Photovoltaikzelle ist eine Sonderform der Solarzelle. Sie zeichnet sich durch deren organische Bestandteile aus, die Kohlenwasserstoff-Verbindungen. Das besondere Interesse an organischer PV begründet sich durch die potenziell günstigeren und vielseitigeren Herstellungsverfahren (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022). Derzeit werden in diesem Bereich viele Forschungsvorhaben betrieben, weshalb die Experten und Expertinnen annehmen, dass es hier bis 2035 zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch verbesserte Produktionsmöglichkeiten sowie einen steigenden Wirkungsgrad kommen wird.

#### **Energieerzeugung aus Biomasse und biogenen Gasen:**

Weiterentwicklung der Anlagen und Betreibermodelle bis 2030 erwartet

Biomasse ist in Deutschland einer der wichtigsten erneuerbaren Energieträger, vor allem wegen der Grundlastfähigkeit und der Unabhängigkeit von Wind und Sonne als erneuerbare Energie. Dabei sind unterschiedliche Verfahren wie Verbrennung, Vergasung oder Vergärung gängig, um aus Biomasse Strom beziehungsweise Wärme zu erzeugen. Aktuell ist die Einschätzung des Europaparlaments bezüglich des Einsatzes von „Primärer Holzbiomasse“ besonders interessant, da die Option besteht, dass Holzenergieprojekte zukünftig nicht mehr förderfähig sind (Bayerische Staatsregierung, 2022). In Bezug auf den Vorstoß der EU bleibt die Zukunft im Bereich der Biomasse und der biogenen Gase ungewiss. Es ist allerdings zu erwarten, dass Biomasse weiterhin als unverzichtbarer Baustein in der Energiewende bestehen bleibt und somit einen wichtigen Beitrag leistet. Bis zum Jahr 2030 wird die Biogasnutzung zudem durch Technologien weiter flexibilisiert (Reverion, o. D.).

#### **Eigenerzeugung durch industrielle Verbraucher mithilfe von Photovoltaik (PV):**

Weiterentwicklung bis 2027 erwartet

Die Eigenerzeugung von Strom für den industriellen Verbrauch mittels Photovoltaik bietet für Industriebetriebe viele Möglichkeiten. Die durch die Eigenerzeugung von Strom entstandene (Teil-)Unabhängigkeit der industriellen Betriebe von den Preisen der Energielieferanten hat sich in der aktuellen Krisensituation als besonders wirtschaftlich erwiesen. Bereits heute haben PV-Anlagen die niedrigsten Stromgestehungskosten. Deshalb bieten sie für die langfristige wirtschaftliche und strategische Planung von Unternehmen sowie für ihre Konkurrenzfähigkeit viele Chancen. Strom ist in alle anderen Energieformen wandelbar und somit die „wertvollste“ Energieform. Durch die gestiegenen Energiebeschaffungspreise (beispielsweise für Strom und Gas) lohnen sich PV-Anlagen für Betriebe sehr viel schneller, was in der Vergangenheit im industriellen Umfeld zu einem enorm gestiegenen Interesse an PV-Anlagen geführt hat. Dieser Trend wird sich bis 2027 weiter verstärken und zu einem zunehmenden Zubau von PV-Anlagen bei Industriebetrieben führen (Fraunhofer ISE, 2021).

### **Eigenerzeugung durch industrielle Verbraucher mithilfe von Windkraftanlagen:**

Weiterentwicklung bis 2035 erwartet

Die Eigenstromerzeugung mithilfe von Windkraftanlagen im industriellen Maßstab stellt im Allgemeinen eher die Ausnahme dar. Vor allem schwierige und langwierige Genehmigungsverfahren sowie die Frage nach einem passenden Standort erschweren den Bau solcher Anlagen für Unternehmen. Allerdings besteht aktuell, beschleunigt durch die Energiekrise, durchaus größeres Interesse bei Unternehmen, Windkraftanlagen trotzdem als Energiequelle zu nutzen. Diese Entwicklung in Kombination mit den neuen Ausnahmeregelungen der 10H-Regelung sowie dem Wind-an-Land-Gesetz des Bundes wird bis 2035 zu einem Anstieg der Bauanträge für Windkraftanlagen führen (BR24, 2022).

### **Carbon-Capture-Technologien zur Filterung von CO<sub>2</sub> aus der Luft:**

Weiterentwicklung bis 2045 erwartet

Die Technologie zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, auf Englisch Carbon Capture, bietet die Möglichkeit, bereits emittiertes CO<sub>2</sub> der Atmosphäre wieder zu entziehen und zu binden. Schwer vermeidbare Prozessemissionen der Industrie könnten durch die Anwendung der Technologie zukünftig reduziert werden. Dabei kann zwischen der weiteren Nutzung des abgetrennten CO<sub>2</sub>, der sogenannten Carbon Capture and Utilization (CCU), und der Speicherung in tief liegenden geologischen Gesteinsschichten, dem sogenannten Carbon Capture and Storage (CCS), unterschieden werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. D. a). Die Nutzung dieser Technologie erfolgt an wenigen Stellen bereits. Das Schweizer Unternehmen Climeworks beispielsweise hat mittlerweile mit dem Bau einer zweiten Anlage zur Kohlendioxidabscheidung begonnen, die 2024 betriebsbereit sein soll (golem.de, 2022). Allerdings finden solche Verfahren in Deutschland bis jetzt nur im Rahmen der Erforschung, Erprobung und Demonstration der CO<sub>2</sub>-Speicherung Anwendung (Umweltbundesamt, 2022 a). Da solche Abscheidungsanlagen im Betrieb sehr energieintensiv sind, wird erst mit zunehmender Produktion von erneuerbarem Strom auch eine Nutzung zunehmend sinnvoll. Aktuell sind außerdem keine Anpassungen der Rechtslage geplant, und daher ist es umso unwahrscheinlicher, dass bis 2045 mit einem Zuwachs solcher Anlagen gerechnet werden kann.

## ◀ S. 45 **5.3.2 Digitale Technologien**

◀ S. 54

Neben der Weiterentwicklung nicht digitaler Technologien ist für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung auch eine Weiterentwicklung digitaler Technologien notwendig. Dies betrifft das Datenmanagement und den Datenaustausch innerhalb eines Unternehmens, Systeme zur Erstellung Digitaler Zwillinge, inklusive der damit einhergehenden Automatisierung, die Einführung von Künstlicher Intelligenz sowie das Datenmanagement und Cloudlösungen über Unternehmensgrenzen hinweg.

### ◀ S. 23 **Datenmanagement und -austausch innerhalb eines Unternehmens**

◀ S. 24

◀ S. 31 **Für einen breiten Einsatz von Anwendungen für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung sind in vielen Bereichen Technologien notwendig, die ein einfaches Management und einen unkomplizierten Austausch von Daten innerhalb einer Organisation ermöglichen. Der Entwicklungsbedarf dieser Technologien wird im Folgenden beschrieben.**

### ◀ S. 34 **Industrial-Internet-of-Things(IIoT)-Plattformen zur Verteilung und Speicherung von Daten:**

◀ S. 50 Weiterentwicklung bis 2030 erwartet

IIoT-Plattformen ermöglichen es, Maschinen und Geräte zu vernetzen, sowie Daten, die in den Steuerungen und Sensoren der Anlagen anfallen, zusammenzuführen und zu verwalten. So können digitalisierte Maschinen und Anlagen zentral verwaltet werden, wodurch Prozesse transparent werden und Optimierungspotenziale sich offenlegen lassen. Auf Basis dieser Erkenntnisse können Arbeitsprozesse zum Beispiel ressourcenschonender gestaltet werden. Insgesamt leisten IIoT-Plattformen einen Beitrag



zu mehr Transparenz in allen Bereichen eines Unternehmens und dienen als Grundlage für die Realisierung von Digital Twins und Sustainable Twins. Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts IIP-Ecosphere wurde ein Whitepaper erarbeitet, in dem 21 aktuell auf dem Markt verfügbare IIoT-Plattformen dargestellt und verglichen werden. Hierbei ergab sich, dass die verfügbaren Plattformen noch Einschränkungen bezüglich ihrer Interoperabilität haben. Um einen breiten Einsatz von IIoT-Plattformen auch in KMU zu ermöglichen, ist zudem die Entwicklung robuster Qualitäts- und Sicherheitskonzepte notwendig (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2021).

### **Datenmanagementsysteme zur Aggregation, Aufbereitung und Bereitstellung von Daten:**

Weiterentwicklung bis 2035 zu erwarten

Um Mitarbeitenden und Geschäftsprozessen notwendige Daten in ausreichender Qualität zur Verfügung zu stellen, sind Datenmanagementsysteme notwendig, in denen Daten gespeichert und verwaltet werden. Hierbei spielen Datensicherheit, Konsistenz und eine redundanzfreie Haltung von Daten eine zentrale Rolle. Ziel solcher Datenmanagementsysteme ist es, aus den in einer Organisation vorhandenen Daten das größtmögliche Nutzenpotenzial zu realisieren und Transparenz in allen Bereichen des Unternehmens zu schaffen. Datenmanagementsysteme bilden somit auch eine Grundlage für die Realisierung von Digital Twins und Sustainable Twins. Beispiele für Datenmanagementsysteme sind Enterprise-Resource-Planning(ERP)-Systeme unter anderem zur Planung und Steuerung von Personal, Kapital und Betriebsmitteln einer Organisation oder Produktdatenmanagement (PDM)-Systeme zur Verwaltung von Daten, die während der Entwicklung und Fertigung eines Produkts anfallen (Technische Universität München, 2020). Aufgrund ihrer Komplexität stellen die Einführung und die Nutzung von Datenmanagementsystemen insbesondere für KMU eine Herausforderung dar. Eine Weiterentwicklung der Systeme sollte deshalb unter anderem darauf abzielen, die Hürden zu reduzieren, solche Systeme in KMU einzuführen und einzusetzen.

### **Digitale Sensornachrüstätze:** Weiterentwicklung bis 2030 zu erwarten

Für zahlreiche in Layer 2 beschriebene Anwendungen ist es notwendig, Zustände in der Produktion und darüber hinaus digital zu erfassen. Neuere Maschinen und Geräte sind hierfür in der Regel bereits mit allen notwendigen Sensoren ausgestattet. Insbesondere ältere Maschinen und auch andere Geräte wie beispielsweise die Gebäudetechnik verfügen jedoch in der Regel nur über wenig bis keine integrierte Sensorik. Um die Zustände dieser Maschinen und Geräte digital erfassen zu können, sind digitale Sensornachrüstätze notwendig. Um einen einfachen Einsatz und eine unkomplizierte Integration (zum Beispiel durch eine Anbindung an IT-Systeme wie IIoT-Plattformen) bei KMU sicherzustellen, sollten diese Sensoren über offene Schnittstellen verfügen, eine einfache Datenerfassung ermöglichen und im Idealfall im Sinne von Plug-and-play sofort anwendbar sein. So wird ermöglicht, dass auch an älteren Maschinen und Anlagen alle Informationen erfasst werden können, die für datenbasierte Anwendungen notwendig sind.<sup>4</sup>

### **Einheitliche Schnittstellen und Standards für einen Datenaustausch zwischen IT- und OT-Systemen:**

Weiterentwicklung bis 2035 zu erwarten

Für den Einsatz zahlreicher Anwendungen, die in Layer 2 beschrieben werden, ist es zudem notwendig, dass Daten zwischen Operational Technology (OT), also Hardware und Software, die zur Überwachung und Steuerung von Maschinen und Anlagen eingesetzt werden, und IT-Systemen ausgetauscht werden. Zudem kann in industriellen Prozessen auch eine Datenübertragung zwischen Maschinensystemen notwendig sein. Um eine Datenübertragung zwischen den unterschiedlichen IT- und OT-Systemen zu ermöglichen und letztlich alle notwendigen Daten innerhalb eines Unternehmens zusammenführen zu können, sind standardisierte Schnittstellen sowie eine Standardisierung von Datenformaten und -inhalten zwingend erforderlich. In den vergangenen Jahren sind solche Schnittstellen und Standards, wie beispielsweise die Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) und die Verwaltungsschale erarbeitet worden. Insbesondere im Kontext der ökologischen Nachhaltigkeit, etwa für die

---

<sup>4</sup> Weiterführende Informationen zum Thema Sensorik, Datenerfassung und -aufbereitung bietet ein Fachartikel von Bayern Innovativ (Bayern Innovativ, o. D. f.).

Umsetzung eines digitalen Produktpasses, und für die Vernetzung von Produktions- und Energiesystemen besteht jedoch weiterer Entwicklungsbedarf. Einen Überblick über die Handlungsfelder zur Standardisierung im Themenfeld Industrie 4.0 bietet die vom Standardization Council Industrie 4.0 veröffentlichte Normungsroadmap Industrie 4.0, die in regelmäßigen Abständen aktualisiert wird (Standardization Council Industrie 4.0, o. D. a; Standardization Council Industrie 4.0, o. D. b).

### **Standardisierung der Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks und der Bilanzierung von Emissionen:**

#### ◀ S. 43 Weiterentwicklung bis 2030 zu erwarten

Um eine übergreifende Bilanzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks und anderer umweltschädlicher Emissionen einzelner Produktionsanlagen, Produkte und ganzer Lieferketten zu ermöglichen, ist neben einer technischen Standardisierung auch eine inhaltliche Standardisierung notwendig. Dadurch werden klare Vorgaben zur Bilanzierung festgelegt, die im Idealfall über Branchengrenzen hinweg und international anerkannt werden. Eine bereits heute aktive Bestrebung zu einer solchen Standardisierung ist das Greenhouse Gas Protocol (GHGP). Das GHGP ist ein standardisiertes Mess- und Verwaltungsverfahren des World Business Council for Sustainable Development und des World Resources Institute mit dem Ziel, Treibhausgasemissionen (englisch: Greenhouse Gas Emissions, GHG Emissions) messbar zu machen. Die Initiative umfasst unter anderem Leitlinien, Standards zur Berichterstattung, Berechnungsinstrumente und verschiedenste Möglichkeiten zur Schulung von Unternehmen oder lokalen sowie nationalen Behörden. Aktuell handelt es sich beim GHGP um das meistverwendete globale Tool im Bereich der Emissionserfassung (World Resources Institute, o. D.). Für eine breite Anwendung der Standards sollten branchenspezifische Richtlinien erarbeitet werden, wie beispielsweise die kürzlich veröffentlichte Product Carbon Footprint-Guideline des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA). Sie basiert auf der Norm ISO 14067 und dem GHG Protocol Accounting Standard und soll Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus an die Berechnung eines CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks heranzuführen (VDMA, 2022).

#### **Cybersecurity:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Die Anzahl von Cyberangriffen nimmt stetig zu, und gleichzeitig steigt die Komplexität der IT-Systeme von Unternehmen (zum Beispiel durch immer mehr Mitarbeitende, die im Homeoffice arbeiten). So steigt auch die Gefahr von Schadensfällen in der Cybersecurity, bei denen Unternehmen Opfer eines Cyberangriffs werden. Dabei kann es zu großen Schäden, Ausfällen und Verlusten für Unternehmen kommen. Eine Auswahl an Schadensfällen der Cybersecurity aus den Monaten Oktober und November 2022 zeigt, dass davon jede Form von Unternehmen betroffen sein kann (Bayern Innovativ, 2022 b; Bayern Innovativ, 2022 a) Für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung bedeutet dies, dass Cybersecurity eine Grundvoraussetzung für den sicheren Einsatz aller digitalen Technologien und Anwendungen darstellt. So ist die Sicherheit aller digitalen Systeme, beispielsweise gegenüber Cyberangriffen und Datendiebstählen, eine grundlegende Voraussetzung für Vertrauen in die Anwendung der Systeme. Der Aspekt der Cybersecurity sollte deshalb bei der Entwicklung und Implementierung der in Layer 2 geschilderten Anwendungen sowie bei der Entwicklung der in diesem Kapitel geschilderten digitalen Technologien durchgehend bis ins Jahr 2045 eine zentrale Rolle einnehmen.

#### **Quantentechnologie zur Verarbeitung großer Datenmengen:**

Schwerpunkt der technologischen Entwicklung 2035 bis 2045

In einer vollständigen vernetzten Produktion fallen sehr große Datenmengen an, und umgekehrt sind für die Lösung komplexer Optimierungsprobleme, wie sie auch in einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung auftreten, eine Vielzahl von Ist- und Prognosedaten notwendig. Die Verarbeitung dieser Datenmengen und die Lösung von Problemen mit solcher Komplexität ist mit klassischen Computern zum Teil nicht oder nur mit sehr großem Zeitaufwand zu bewerkstelligen. Eine große Hoffnung liegt hier in den Möglichkeiten von Quantencomputern. Insbesondere werden die Lösung bestimmter Problemstellungen, etwa die Optimierung von hochkomplexen Liefer- und Produktionsketten, und weitere große Vorteile gegenüber klassischen Computern erwartet (Bayern Innovativ, o. D. g). In einer Umfrage der Bitkom (2021 c) schrieben in etwa die Hälfte der Befragten Quantencomputern eine große Bedeutung für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu. Laut Einschätzung der Bitkom ist ein wichtiger Aspekt für die weitere Entwicklung dieser Technologie, dass diese so praxisnah wie möglich erfolgt (Bitkom, 2021 c).

### ◀ S. 23 **Digitaler Zwilling inklusive Automatisierung**

◀ S. 36

◀ S. 37 **Für zahlreiche Anwendungen für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung sind digitale**

◀ S. 39 **Technologien zur Erstellung von Digitalen Zwillingen notwendig, die in Teilen auch eine Automatisierung**

◀ S. 44 **von Prozessen ermöglichen müssen. Der Entwicklungsbedarf dieser Technologien wird im Folgenden beschrieben.**

#### **Energiemanagementsysteme:** Weiterentwicklung bis 2028 zu erwarten

Mit Energiemanagementsystemen können Energieströme und die dazugehörigen Energieträger innerhalb eines Unternehmens erfasst und darauf basierend Möglichkeiten identifiziert werden, den Energieverbrauch zu reduzieren oder den Betrieb von Maschinen und Anlagen in wirtschaftlicher Hinsicht zu optimieren (Gabler Wirtschaftslexikon, o. D.). Durch den Zubau von erneuerbaren Energien, die Diversifizierung der Energieverbraucher und -erzeuger und die Sektorenkopplung steigt die Komplexität der Energiesysteme. Volatile Energieerzeuger oder auch externe Faktoren wie Marktanreize, beispielsweise flexible Strompreise, oder gesetzliche Auflagen wie die Fernsteuerbarkeit von Erzeugungsanlagen durch den Netzbetreiber im Rahmen von Redispatch 2.0<sup>5</sup> führen zusätzlich zu einer Erhöhung der Komplexität von Energiesystemen und entsprechenden Energiemanagementsystemen. Die Energiemanagementsysteme werden weiterentwickelt, um beispielsweise auch mit ERP-Systemen verknüpft werden zu können. Es gibt bereits erste Softwareanbieter, die geeignete Lösungen anbieten. Die Entwicklung einfach einzuführender und zu betreibender Systeme für KMU stellt einen möglichen Entwicklungsbereich dar (Bundesnetzagentur, 2021). Zur Realisierung der Vision sollten bis 2028 solche übergreifenden Lösungen für Unternehmen umgesetzt sein, dafür müssen alle Energiemanagementsysteme entsprechend aufgestockt werden.

### ◀ S. 48 **Simulationswerkzeuge:** Weiterentwicklung bis 2035 zu erwarten

Für zahlreiche in Layer 2 beschriebene Anwendungen ist es notwendig, Zustände von Systemen zu simulieren, um davon Entscheidungen abzuleiten. Die dafür eingesetzten Simulationswerkzeuge können beispielsweise zur Planung und Bewertung von Handlungsoptionen und zur virtuellen Inbetriebnahme, Freigabe und Absicherung von Maschinen und Anlagen sowie von Energiesystemen verwendet werden. Für einige Anwendungen braucht es dabei die Simulation komplexer Gesamtsysteme bestehend aus Produktionsanlagen, Gebäudetechnik und Energiesystemen. Um dies zu realisieren, ist es notwendig, Modelle und Bibliotheken unterschiedlicher Disziplinen zusammenzuführen und niedrigschwellig zugänglich zu machen. Zudem müssen Simulationswerkzeuge einfach bedienbar und unkompliziert verfügbar sein, zum Beispiel über Clouddienste, damit sie auch von KMU genutzt werden können (Bayern Innovativ, o. D. e).

#### **Automatisierte und digitale Ökobilanzierung inklusive Reporting:**

Schwerpunkt der technologischen Entwicklung 2025 bis 2035

Die Anforderungen an die Ökobilanzierung von Unternehmen und an ein entsprechendes Reporting, beispielsweise auferlegt von der Europäischen Union, steigen stetig weiter an und betreffen immer mehr Organisationen. Insbesondere KMU, die häufig nicht über die notwendigen Ressourcen verfügen, um einzelne Personen für Bilanzierung und Reporting einzustellen oder freizusetzen, stehen vor einer großen Herausforderung. Dies hängt auch damit zusammen, dass für eine Bilanzierung häufig zahlreiche Informationen zusammengetragen und aufbereitet werden müssen, aber nur selten bereits vollständig in digitaler Form vorliegen. Um eine einfache Bilanzierung zu ermöglichen, sollten Systeme entwickelt werden, für die eine vollständig automatisierte und digitale Ökobilanzierung sowie ein entsprechendes Reporting erstellt werden kann. Hierfür sind beispielsweise Emissions-Bilanzierungssoftware und Datenbanken, wie beispielsweise das Internetportal ProBas des Umweltbundesamts, notwendig, über die öffentlich verfügbare Datensätze für die Erstellung von Ökobilanzen zur Verfügung gestellt werden (Umweltbundesamt, 2018; European Commission, o. D. a; Bundesministerium für Arbeit und Soziales, o. D. a). Das VDI Zentrum Ressourceneffizienz bietet zudem bereits heute ein Berechnungstool an, mit dem eingesparte Treibhausgasemissionen berechnet werden können (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, o. D. a).

---

<sup>5</sup> Redispatch 2.0 bezeichnet die Steuerbarkeit von Erzeugungsanlagen ab einer Leistung von 100 Kilowatt zur Vermeidung von Engpässen und Überlastungen.

- ◀ S. 51 **Echtzeitregelungssysteme:** Schwerpunkt der technologischen Entwicklung 2025 bis 2035  
Für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung ist es an einigen Stellen des Gesamtsystems aus Energieerzeugung und industriellen Verbrauchern notwendig, auf Basis des aktuellen Systemzustands Entscheidungen in Echtzeit zu treffen. Um die Vorteile flexibler Stromtarife nutzen zu können, benötigen Erzeuger erneuerbarer Energien zum Beispiel Systeme, die eine automatisierte Echtzeitsteuerung der Netzeinspeisung oder Speicherung von Energie auf Basis des aktuellen Strompreises ermöglichen. Aufseiten der industriellen Verbraucher wird zum Beispiel die Möglichkeit einer Steuerung von Maschinen auf Basis der aktuell verfügbaren Energie benötigt. Außerdem ist insbesondere bei sehr schnellen oder kontinuierlichen Prozessen ein Eingreifen in Echtzeit erforderlich, etwa bei Störungen oder Prozessabweichungen, um Fehler, Schäden oder Ausschuss zu vermeiden. In der Regel wird zwischen harter Echtzeit, mit Reaktionszeiten im Millisekundenbereich und erheblichen Folgen (Gefährdung, Beschädigung) bei Nichteinhaltung der Zeitgrenzen, und weicher Echtzeit mit reiner Qualitätsminderung bei Überschreitung unterschieden. Aufgrund der komplexen zu steuernden Systeme und der damit einhergehenden Vielzahl an Parametern, die bei der Steuerung berücksichtigt werden müssen, stellen die Entwicklung und der Einsatz solcher Echtzeitregelungssysteme in der Praxis eine Herausforderung dar (Technologie-Initiative SmartFactory KL, 2018).
- ◀ S. 39 **Werkzeuge und Kataloge von CAD-Systemen:**
- ◀ S. 43 **Schwerpunkt der technologischen Entwicklung 2025 bis 2035**  
IT-Systeme des Computer Aided Design (CAD), zu Deutsch computergestütztes Konstruieren, sind heute in der Produktentwicklung weitverbreitet. Sie bieten Ingenieurinnen und Ingenieuren weitreichende Unterstützungsmöglichkeiten während des Konstruktionsprozesses. CAD-Systeme sind in der Regel jedoch darauf ausgelegt, ein Produkt zu erhalten, das die zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses definierten Funktionen und sonstigen Anforderungen, beispielsweise mit Hinblick auf die Herstellungskosten, bestmöglich erfüllt. Ökologische Nachhaltigkeitsaspekte spielen hierbei aktuell noch eine untergeordnete Rolle. Um zukünftig auch diese Aspekte bereits während der Produktentwicklung bestmöglich berücksichtigen zu können, sollten CAD-Systeme entwickelt werden, die eine Ökobilanzierung, etwa den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines konstruierten Bauteils, sowie ein Design for Reuse, Remanufacturing oder Recycling als feste Bestandteile beinhalten. Werkzeuge und Kataloge der Systeme müssen hierfür entsprechend weiterentwickelt werden.
- ◀ S. 43 **Systeme zur Realisierung eines Digitalen Zwillings:** Weiterentwicklung bis 2035 zu erwarten  
Ein Digitaler Zwilling ist ein Datenabbild eines physischen Objekts, wie beispielsweise einer Maschine oder eines Produkts, und beschreibt zudem auch den Informationsfluss, der in Echtzeit zwischen dem physischen und dem Digitalen Zwilling in beide Richtungen erfolgt. Somit dient der Digitale Zwilling als zentrale Informationsquelle, etwa zum Zustand einer Maschine, und ermöglicht umgekehrt auch eine Manipulation der physischen Maschine (Fraunhofer ISOB, o. D.). Aufgrund der Vielzahl an Anwendungen, die auf Basis eines Digitalen Zwillings für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung eingesetzt werden können, wird er häufig als einer der zentralen Bausteine für die Erreichung dieses Zielzustands diskutiert. Die Implementierung von Digitalen Zwillingen ist heute jedoch noch mit großem finanziellem und zeitlichem Aufwand verbunden. Damit eine Anwendung Digitaler Zwillinge in der breiten Anwenderindustrie erfolgt, ist eine weitere Vereinfachung der Einführung und des Betriebs entsprechender Systeme notwendig. Ein Ansatz für eine zukünftige Weiterentwicklung ist die in der Plattform Industrie 4.0 entwickelte und von der Industrial Digital Twin Association (IDTA) weiterverfolgte Verwaltungsschale (englisch: Asset Administration Shell, kurz AAS), die einen herstellerübergreifenden Austausch von Informationen mit branchenneutralen Standards ermöglicht (Industrial Digital Twin Association, o. D. h).

### **Systeme zur Realisierung eines Sustainable Twin:**

Schwerpunkt der technologischen Entwicklung 2025 bis 2035

Beim Sustainable Twin handelt es sich um eine Erweiterung des Konzepts des Digitalen Zwillings um Aspekte der Nachhaltigkeit. So werden in einem Sustainable Twin zum Beispiel einer Produktionsanlage zusätzlich zu den Informationen eines Digitalen Zwillings auch alle Informationen bezüglich des ökologischen Fußabdrucks erfasst. Das Konzept des Sustainable Twin ist somit eng verwandt mit dem Konzept des digitalen Produktpasses, das im weiteren Verlauf dieses Kapitels im Detail diskutiert wird. Der Sustainable Twin bezieht sich dabei in der Regel auf konkrete Maschinen und Anlagen, die in einer Organisation betrieben werden, während der digitale Produktpass Informationen über den Lebenszyklus eines Produkts sammelt und somit mehrere Organisationen entlang der Wertschöpfungskette betrifft (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020; Bayern Innovativ, o. D. h).

### ◀ S. 50 **Additive Fertigungstechnologien: Weiterentwicklung bis 2035 zu erwarten**

Der industrielle Einsatz der Additiven Fertigung, auch häufig 3D-Druck genannt, wird regelmäßig mit einem großen Ressourceneinsparpotenzial assoziiert. So wird beispielsweise erwartet, dass ein breiter Einsatz der Additiven Fertigung einen Beitrag für die Realisierung einer bedarfsgerechten Logistik leisten kann, in der Produkte in unmittelbarer geografischer Nähe ihres Einsatzorts gefertigt werden. So stellt die Additive Fertigung mit Bezug auf den Digitalen Zwilling eine Art Brücke aus der digitalen in die physische Welt dar. Weitere Einsparpotenziale resultieren zum Beispiel aus der Möglichkeit, das Gewicht von Bauteilen zu reduzieren und dadurch während ihres Einsatzes, beispielsweise in einem Flugzeug, Energie einzusparen. Eine 2018 von der Delft University of Technology veröffentlichte Studie geht davon aus, dass durch Additive Fertigung bis 2050 fünf bis 27 Prozent des globalen Energieverbrauchs reduziert werden können (Verhoef, Budde, Chockalingam, Nodar, & van Wijk, 2018). Laut einer Befragung der BASF-Tochter Sculpteo aus dem Jahr 2022 hilft die Additive Fertigung 41 Prozent der befragten Firmen dabei, ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen (Sculpteo, o. D.). Für einen breiten Einsatz Additiver Fertigungstechnologien in der Industrie besteht in den kommenden Jahren jedoch erheblicher Entwicklungsbedarf, der in der Roadmap „Industrialisierung der Additiven Fertigung“ der Koordinierungsstelle Additive Fertigung bei Bayern Innovativ dargestellt ist (Bayern Innovativ, o. D. i).

### **Workflow Engines zur Automatisierung von Geschäftsprozessen:**

Weiterentwicklung bis 2030 zu erwarten

Workflow Engines sind IT-Systeme, die es ermöglichen, Geschäftsprozesse, die ansonsten manuell durch Mitarbeitende durchgeführt werden, vollständig digital abzubilden und zu automatisieren (IBM, o. D.). Neben einer Steigerung der Prozesssicherheit, die zum Beispiel in einer Vermeidung von Ausschuss resultieren kann, ermöglichen Workflow Engines die Realisierung von Geschäftsprozessen, die nur schwer durch einen Menschen abgebildet werden können. Hierzu zählt zum Beispiel der An- und Verkauf von Strom in Echtzeit auf Basis der verfügbaren, selbst erzeugten erneuerbaren Energie sowie des Energiebedarfs der Produktion eines Unternehmens. Insbesondere für einen Einsatz im Mittelstand sollten Workflow Engines entwickelt werden, die mit wenig Aufwand implementiert und betrieben werden können.



### ◀ S. 36 **Einführung von Künstlicher Intelligenz (KI)**

◀ S. 38

◀ S. 39 **Für zahlreiche Anwendungen einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung ist es notwendig,**

◀ S. 41 **Daten nicht nur transparent zu machen, sondern auch in irgendeiner Form zu analysieren. Hierfür**

◀ S. 44 **werden bereits heute zum Teil Methoden der KI eingesetzt, die jedoch für den Einsatz auf breiter Basis sowie eine Einführung in KMU noch weiterentwickelt werden müssen.**

**Data-Analytics-Methoden und -Werkzeuge:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten  
Methoden und Werkzeuge aus dem Bereich Data Analytics, beispielsweise solche der KI, werden in vielen Gebieten als Schlüsseltechnologie bezeichnet. Konkret erlauben es diese Methoden und Werkzeuge, auf Basis vorhandener Daten zum Beispiel zukünftige Zustände von Systemen vorherzusagen und unterschiedliche Entscheidungsoptionen zu simulieren. Während sich die Methoden und Werkzeuge in den vergangenen Jahren erheblich weiterentwickelt haben, besteht für einen breiten Einsatz der Technologie trotzdem noch erheblicher Entwicklungsbedarf. Dies betrifft zum Beispiel die Automatisierung der Prozesskette unter anderem zur Erhebung und Aufbereitung von Daten, die Weiterentwicklung und Kombination von Methoden sowie deren Nachvollziehbarkeit und Transparenz (vertrauenswürdige KI) sowie die Entwicklung ressourcenschonender Ansätze.

#### **Einfach einzuführende KI-Werkzeuge:**

Schwerpunkt der technologischen Entwicklung ab 2028 bis 2035

Für die Implementierung von KI-Lösungen ist in der Regel eine Kombination aus Methoden- und Domänenwissen notwendig. Da insbesondere mittelständische Unternehmen nur selten über Personal mit umfangreichen Data-Analytics-Fähigkeiten verfügen, stellt dies eine große Hürde für die Nutzung von KI-Anwendungen dar. Das wird auch durch eine Umfrage des VDI aus dem Jahr 2022 deutlich, laut der KI im Alltag von Ingenieurinnen und Ingenieuren nur einen geringen Stellenwert hat. Um KI-Anwendungen einfacher für mittelständische Unternehmen zugänglicher zu machen, sollten standardisierte KI-Werkzeuge entwickelt werden, die von Domänenexperten, wie Entwicklungsingenieurinnen und -ingenieuren, ohne viel Methodenwissen und Programmieraufwand eingeführt werden können (VDI, 2022).

#### **Plug-and-play-KI-Werkzeuge:** Schwerpunkt der technologischen Entwicklung ab 2033 bis 2045

Um den Aufwand für die Implementierung und den Betrieb von KI-Anwendungen noch weiter zu reduzieren, sollten KI-Werkzeuge entwickelt werden, die nach dem Plug-and-play-Prinzip funktionieren.

Dies reduziert Hürden, mit denen produzierende Unternehmen heute beim Einsatz von KI konfrontiert sind, wie eine oftmals spezifische Anpassung der KI an den Anwendungsfall.

### ◀ S. 24 **Datenmanagement und -austausch über Unternehmen hinweg**

◀ S.41

**Um eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung realisieren zu können, ist es notwendig, dass Organisationen über Datenmanagementsysteme verfügen, die es ihnen ermöglichen, mit anderen Akteuren ihres Wertschöpfungsnetzwerks Daten sicher und vertrauensvoll auszutauschen.**

**Vertrauenswürdige Cloudanwendungen:** Weiterentwicklung bis 2032 zu erwarten  
Cloudanwendungen ermöglichen es, Daten außerhalb der eigenen IT-Infrastruktur zu speichern und zu verarbeiten. Da bei der Nutzung solcher Anwendungen stets Daten in die Obhut von Dritten gegeben werden, erfordert eine breite Nutzung ein Vertrauensverhältnis zwischen Anwender und Anbieter (Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik, o. D.). Dies zeigt auch der Cloud-Monitor 2022, eine repräsentative Umfrage von Bitkom Research im Auftrag der KPMG AG, in der 84 Prozent der befragten Unternehmen angaben, auf Cloud-Computing zu setzen. Von diesen Unternehmen setzen jedoch nur 47 Prozent Public-Cloud-Lösungen ein, die von frei zugänglichen Providern über das Internet angeboten werden. Die restlichen Firmen nutzen lediglich Private-Cloud-Dienste, die von den Unternehmen selbst betrieben werden und ausschließlich für die eigenen Mitarbeitenden zugänglich sind. Bei der Auswahl von Cloud-Lösungen spielt neben der Stabilität des Systems (97 %) auch das Vertrauen in Sicherheit und Compliance des Anbieters (95 %) eine zentrale Rolle (KPMG Deutschland, 2022)

### ◀ S.35 **Datenräume und Datenökosysteme: Weiterentwicklung bis 2040 zu erwarten**

- ◀ S.39 Ein Ansatz, der es Unternehmen ermöglichen soll, Daten untereinander sicher und souverän auszutauschen, sind Datenräume und Datenökosysteme. In einem Datenraum beziehungsweise Datenökosystem
- ◀ S.41 werden die Daten der Beteiligten nicht zentral zusammengeführt, sondern verbleiben bei den jeweiligen
- ◀ S.42 Organisationen und werden nach Bedarf direkt zwischen zwei Organisationen ausgetauscht. Dies erfolgt
- ◀ S.49 über sogenannte Konnektoren, die als Schnittstelle der Organisationen ins Datenökosystem beziehungsweise in den Datenraum fungieren und Aspekte wie Zugriffsrechte und Datensicherheit regeln. Neben einer technischen Standardisierung über Konnektoren und weitere Schnittstellen erfordern Datenräume und Datenökosysteme auch eine semantische Standardisierung der Daten, die es allen beteiligten Akteuren ermöglicht, Informationen zu interpretieren. Die Erarbeitung grundlegender Funktionalitäten für Datenräume und Datenökosysteme wird aktuell beispielsweise in der europäischen Initiative Gaia-X vorangetrieben. Im Catena-X Automotive Network arbeiten außerdem bereits eine Vielzahl von Partnern gemeinsam an der Umsetzung eines Datenökosystems für das Wertschöpfungsnetzwerk der Automobilindustrie. In der Initiative Manufacturing-X soll ein Datenraum Industrie 4.0 in der gesamten Breite der produzierenden Industrie realisiert werden, und es soll somit eine Vernetzung industrieller Lieferketten erfolgen, die es allen beteiligten Akteuren ermöglicht, einfach, sicher und souverän Daten auszutauschen. Für eine erfolgreiche Umsetzung ist es unter anderem notwendig, einfache und kostengünstige Plug-and-play-Lösungen zu entwickeln, die dem produzierenden Mittelstand einen niedrigschwelligen Zugang zu den entstehenden Datenräumen und Datenökosystemen ermöglichen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Bildung und Forschung, o. D.; Bayern Innovativ, o. D. b; Catena-X, o. D.).

### ◀ S.35 **Schaffung von Transparenz und Nachprüfbarkeit von Daten:**

#### ◀ S.50 **Weiterentwicklung bis 2035 zu erwarten**

Für einige Aspekte einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung ist es notwendig, Transparenz und Nachprüfbarkeit darüber herzustellen, wie bestimmte Daten beziehungsweise Informationen innerhalb der Lieferkette erhoben wurden. Dies betrifft insbesondere Informationen wie den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck oder Nachweise im Rahmen des Lieferkettensorgfaltspflichtengesetzes. Um ein hohes Vertrauen in diese Informationen zu schaffen, sind Systeme notwendig, die sicherstellen, dass die Informationen entlang der Lieferkette nicht manipuliert werden. Hierfür eignet sich zum Beispiel der Einsatz von Distributed-Ledger-Technologien (DLT) wie beispielsweise die Blockchain. In ersten Forschungsprojekten wurde bereits erprobt, wie solche Technologien etwa für die Realisierung eines digitalen Abbilds eines Kreislaufsystems eingesetzt werden können (Bayern Innovativ, o. D. h). In der Industrie spielt der Einsatz der Blockchain-Technologie zum heutigen Zeitpunkt jedoch so gut wie keine Rolle. So ergab eine Befragung der Bitkom im Jahr (2021 d), dass lediglich sieben Prozent der deutschen Unternehmen die Blockchain-Technologien nutzen, ihren Einsatz planen oder zumindest darüber diskutieren.

#### ◀ S.35 **Digitaler Produktpass: Weiterentwicklung bis 2040 zu erwarten**

- ◀ S.43 Um entlang des Lebenszyklus eines Produkts Entscheidungen im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit
- ◀ S.48 zu treffen, ist es notwendig, bestimmte Informationen zum Produkt zu kennen, beispielsweise über
- ◀ S.49 enthaltene Materialien und deren Verarbeitung, die durchlaufenen Produktionsschritte sowie den aktuellen Zustand. Hier setzt das Konzept des digitalen Produktpasses (DPP) an, der als digitale Lebenszyklusakte alle Informationen zu einem Produkt über den gesamten Lebenszyklus sammelt. Zur Realisierung digitaler Produktpässe laufen aktuell bereits einige Initiativen, die beispielsweise an der Entwicklung eines Batteriepasses, eines digitalen Typenschilds oder eines Gebäuderessourcenpasses arbeiten. In allen Entwicklungen zum Thema digitaler Produktpass spielen Standardisierung und Normung sowie eine branchenübergreifende Interoperabilität eine zentrale Rolle, damit die entstehenden Lösungen auch im Mittelstand einfach eingesetzt werden können (Bayern Innovativ, o. D. h).

### 5.3.3 Infrastruktur

Neben der in den zwei vorangegangenen Kapiteln geschilderten Weiterentwicklung nicht digitaler und digitaler Technologien sind für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung aus Sicht der Expertinnen und Experten auch der Ausbau und die Schaffung von Infrastruktur notwendig. Dies betrifft insbesondere die Bereiche Kommunikationsnetze, Dateninfrastruktur und Energienetze, die im Folgenden erläutert werden.

◀ S. 22 **Kommunikationsnetze mit ausreichender Netzabdeckung**

◀ S. 36

**Um die für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung flächendeckende Vernetzung zu ermöglichen, braucht es Kommunikationsnetze mit ausreichender Netzabdeckung. Dies betrifft sowohl 5G- als auch 6G-Netze.**

**5G:** Weiterer Ausbau der Infrastruktur bis 2028 zu erwarten

5G ist die Nachfolgetechnologie von 4G (LTE) und ermöglicht eine bis zu zehnmals schnellere Datenübertragung als LTE. In der Produktion ist 5G beispielsweise für die Vernetzung von Produktionsanlagen, für die Steuerung von Maschinen in Echtzeit, für die Fernwartung von Anlagen oder für Assistenzsysteme mittels Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) einsetzbar. Damit dient 5G auch als Grundlage für zahlreiche Anwendungen einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung. In der Industrie erfolgt die Implementierung von 5G zum aktuellen Zeitpunkt vor allem über sogenannte Campusnetze. Dabei handelt es sich um lokale Netze mit eigenen Frequenzen auf einem begrenzten Gebiet, die entweder von Industrieunternehmen selbst oder in Zusammenarbeit mit Telekommunikationsanbietern betrieben werden. Damit 5G von der gesamten Industrie genutzt werden kann, sind ein weiterer Ausbau des entsprechenden öffentlichen Mobilfunknetzes sowie der zusätzliche Aufbau von Campusnetzen notwendig (Bitkom, 2022; Verbraucherzentrale.de, 2022).

**6G:** Schwerpunkt des Infrastrukturausbaus ab 2035 bis 2045

6G ist die Nachfolgetechnologie von 5G und wird die Kapazität und Geschwindigkeit der Mobilfunknetze weiter erhöhen. Dadurch werden Anwendungen mit deutlich höheren Anforderungen an die Vernetzung ermöglicht, bei denen bereits heute absehbar ist, dass die 5G-Technologie nicht zu einer Realisierung ausreichen wird. Hierzu zählen beispielsweise vollständig autonomes Fahren und Digitale Zwillinge in Echtzeit, die auch für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung relevant sind. Die technologischen Entwicklungen im Themenfeld 6G haben bereits begonnen und adressieren zum Beispiel auch einen möglichst energieeffizienten Betrieb entsprechender Mobilfunknetze. Mit einem flächendeckenden Infrastrukturausbau ist jedoch erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt zu rechnen (Bayern Innovativ, o. D. j).

### ◀ S. 36 **Dateninfrastruktur**

#### ◀ S. 47

**Neben einer ausreichenden Netzabdeckung ist zudem der Aus- und Aufbau von Dateninfrastrukturen erforderlich, die einen rechtlichen, wirtschaftlichen und technischen Rahmen für den Austausch von Daten bieten. Dies umfasst neben vertrauenswürdigen Dateninfrastrukturen auch intelligente Energienetze, sogenannte Smart Grids.**

#### **Vertrauenswürdige Dateninfrastrukturen:**

Weiterer Ausbau der Infrastruktur bis 2030 zu erwarten

Wie bereits erläutert wurde, ist für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung die Entwicklung von vertrauenswürdigen Cloudanwendungen sowie von Datenräumen und Datenökosystemen grundlegend. Zusätzlich ist es notwendig, entsprechende vertrauenswürdige Dateninfrastrukturen aufzubauen. Dies umfasst zum Beispiel vertrauenswürdige Cloudinfrastrukturen sowie die Implementierung konkreter Datenräume und Datenökosysteme über vertrauensvolle Betreibergesellschaften. Über Gaia-X soll es für die Betreiber von Cloudinfrastrukturen zukünftig zum Beispiel möglich sein, eine Zertifizierung zu erhalten, die Kunden versichert, dass die Infrastrukturen entsprechend den Gaia-X Richtlinien betrieben werden. Im Catena-X Automotive Network wurde zudem kürzlich mit Cofinity-X eine Betreibergesellschaft ausgewählt, die zukünftig die Kerndienste für einen vertrauensvollen Catena-X-Datenraum bereitstellen soll (Catena-X, 2023).

#### **Intelligente Energienetze (Smart Grids):** Weiterer Ausbau der Infrastruktur bis 2035 zu erwarten

In einem Smart Grid erhalten unter anderem Netzbetreiber durch die digitale Vernetzung von Erzeugung, Speicherung und Verbrauch stetig Informationen zu Energieproduktion und -verbrauch, sie können das Netz somit optimal aufeinander abgestimmt zentral steuern (Umweltbundesamt, 2013). Hierzu ist eine digitale Netzzustandsüberwachung, wie beispielsweise mittels Smart Meter zur Verteilnetzauslastung, notwendig, die auch eine automatisierte Netzzustandsoptimierung ermöglicht. „Smart“ bedeutet hier auch, dass historische und Prognosedaten zur Optimierung eingebunden werden können.

### ◀ S. 26 **Energienetze**

**Für die Realisierung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung ist zudem auch ein Ausbeziehungsweise Umbau der Energienetze notwendig. Dies betrifft den Aufbau eines Wasserstoffnetzes für die Versorgung der Industrie sowie die Flexibilisierung der Energienetze, um eine Abschaltbarkeit, Steuerung und Zellenbildung zu ermöglichen.**

#### **Wasserstoffnetz für eine Versorgung der Industrie:**

Schwerpunkt des Infrastrukturausbaus ab 2030 bis 2045

Eine relevante Infrastruktur für Wasserstoff wird erst ab 2030 ausgebaut. Für eine Wasserstoffproduktion ist ein Überschuss an erneuerbarem Strom notwendig, um die Entstehungskosten zu senken und keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erzeugen. Der erzeugte Wasserstoff wird vorrangig vor Ort verwendet. Auch in Hochtemperaturprozessen und gegebenenfalls zur saisonalen Speicherung von erneuerbarer Energie wird Wasserstoff zuerst zur Anwendung kommen. Erst ab einer gewissen Überproduktion an Wasserstoff wird es erste Wasserstoffnetze geben, die zunächst auf Quartiersebene etabliert werden, bevor die Netze zu anderen Erzeugern und Verbrauchern erweitert werden. Bis 2045 werden so in energieintensiven Regionen dedizierte Wasserstoffnetze entstehen. Auch die Wasserstoff Roadmap Bayern sieht ab 2030 einen deutlich erhöhten Anstieg der Wasserstoffnachfrage, insbesondere wenn ein Anschluss an das europäische Wasserstoff-Backbone-Netz erfolgt (Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B), 2022).

◀ S. 45 **Flexibilisierung der Energienetze mit Hinblick auf deren Abschaltbarkeit, Steuerung und Zellenbildung:**

Weiterer Ausbau der Infrastruktur bis 2040 zu erwarten

Die zusätzlichen flexiblen Lasten und die volatilen Erzeuger benötigen eine lückenlose Zustandsüberwachung auf allen Netzebenen sowie einen weiteren Ausbau der Netze. Der VDE konkretisiert die Netzstrukturen der Zukunft als Balance zwischen Energieangebot und -nachfrage, die bereits auf regionaler Ebene ausgeglichen werden muss. Jeder Erzeuger und Verbraucher in einem solchen zellulären Netz wird so gesteuert, dass er zu Netzentlastung und Stabilisierung beiträgt (VDE, 2019).

Durch Fortschreiten von zellulären Netzen und Flexibilisierung auf Verteilnetzebene wird der Zubau von Hoch- und Höchstspannungsnetzen reduziert. Dennoch muss durch die unregelmäßige Stromerzeugung der Erneuerbaren viel Leistung durch das Netz geleitet werden. Zelluläre Ansätze können hier zwar Abhilfe schaffen, allerdings kann das Energiesystem der Zukunft nur mit der Kombination aus dem Ausbau der Netze, der Flexibilisierung der Erzeugung und einem zellulären Ansatz gestemmt werden.

◀ S. 20 **5.3.4 Regulatorische Rahmenbedingungen**

◀ S. 26

◀ S. 31

◀ S. 41

Die Weiterentwicklung von regulatorischen Rahmenbedingungen kann nach Einschätzung der Expertinnen und Experten einen positiven Einfluss auf die Erreichung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung haben. So sollen zum Beispiel Anreize für Unternehmen und Forschungseinrichtungen geschaffen werden, bestimmte Entwicklungen voranzutreiben, indem Organisationen eine gewisse Planungssicherheit erhalten. Dies betrifft die Bereiche finanzielle, öffentliche sowie rechtliche Rahmenbedingungen. Für die drei Bereiche werden im Folgenden beispielhafte Aktivitäten erläutert, die einen positiven Beitrag zur Realisierung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung leisten können.

**Finanzielle Rahmenbedingungen:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Um Organisationen einen finanziellen Anreiz zu geben, sich in Richtung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung zu entwickeln, besteht die Möglichkeit, finanzielle Rahmenbedingungen entsprechend weiterzuentwickeln. Dies kann zum Beispiel eine Monetarisierung von Emissionen umfassen, etwa über einen CO<sub>2</sub>-Preis beziehungsweise eine CO<sub>2</sub>-Steuer. Bei einer CO<sub>2</sub>-Steuer handelt es sich um eine Bepreisung pro ausgestoßenes CO<sub>2</sub>. In Deutschland erfolgte im Januar 2021 bereits die Ausweitung der Steuer von vormals Energiewirtschaft und Industrie auf die Bereiche Gebäude beziehungsweise Wärme und Verkehr. Der Verkauf von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten an Unternehmen erfolgt basierend auf dem durch ihre Produkte beziehungsweise Handlungen zukünftig verursachten Ausstoß an CO<sub>2</sub>. Dabei ist für jede Tonne an verursachtem CO<sub>2</sub> ein Zertifikat notwendig (Bundesregierung, 2019). Neben einer Monetarisierung von Emissionen besteht die Möglichkeit einer Anpassung der Investitionsförderung sowie des Ausschreibungs- und Vergaberechts hin zu einer expliziten Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Einsparungen und Digitalisierungsaspekten. Des Weiteren können Steuern und Abgaben so ausgestaltet werden, dass sie den Austausch von Energie zwischen unterschiedlichen Akteuren im Energiesystem nicht belasten. Die Festlegung harter Qualitätskriterien für das Label „Klimaneutralität“ und die Einführung eines Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) sind zwei weitere Beispiele für mögliche Aktivitäten im Bereich finanzieller Rahmenbedingungen. Das CBAM verfolgt dabei das Ziel, eine Monetarisierung von Emissionen und einen entsprechenden Emissionshandel auch international zu regulieren (Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2022).



### **Öffentliche Rahmenbedingungen:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Auch die Weiterentwicklung öffentlicher Rahmenbedingungen kann einen Beitrag zur Realisierung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung leisten. Dies kann zum Beispiel die Festlegung von Sanierungsraten für den Gebäudebestand umfassen. Zudem können auch einfache Genehmigungsverfahren einen positiven Beitrag zur Erreichung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung leisten. Darüber hinaus könnten in öffentlichen Ausschreibungen verstärkt Nachhaltigkeits- und Digitalisierungsziele festgesetzt werden.

### **Rechtliche Rahmenbedingungen:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Zuletzt besteht die Möglichkeit, auch durch die Weiterentwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen die Entwicklung zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung zu unterstützen. Dies kann zum Beispiel eine rechtliche Regulierung der Lieferkette umfassen. Ein Beispiel einer solcher Regulierung, die bereits heute umgesetzt wurde, ist das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz, in dem unternehmerische Sorgfaltspflichten zur Vermeidung von Menschenrechtsverletzungen in Lieferketten festgeschrieben sind (Bundesministerium für Arbeit und Soziales, o. D. b). Eine weitere Handlungsoption besteht darin, das Arbeitszeitschutzgesetz in einer Form anzupassen, die eine adaptive Anpassung der Produktion an die Energieverfügbarkeit erlaubt und die Interessen von Arbeitnehmenden in ausreichendem Maße schützt. Zudem kann auch eine rechtliche Regulierung, die eine Aufbereitung, Reparatur oder ein Recycling am Ende des Lebenszyklus eines Produkts, beispielsweise durch den Produzenten, sicherstellt, einen positiven Beitrag zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung leisten.

## 5.3.5 Awareness bei produzierenden Unternehmen und Transfer in eine breite Anwendung

### **Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten**

Für eine Durchdringung von Anwendungen einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung in die gesamte Industrie ist es aus Sicht der Expertinnen und Experten auch notwendig, ein Bewusstsein für das Thema bei allen produzierenden Unternehmen zu schaffen und einen Transfer in eine breite Anwendung zu realisieren. Hierzu kann zum Beispiel ein einfacher Zugang zu Informationen, insbesondere für KMU, beitragen. Dies betrifft auch eine umfangreiche Anzahl an Praxisbeispielen, die für Unternehmen einfach zugänglich sind. Ein weiteres Beispiel liegt in der Schaffung von Transparenz und einer umfassenden Kommunikation zu dem Beitrag, den Digitalisierung für die Erreichung einer klimaneutralen Produktion leisten kann, und zu konkreten Use Cases und Best Practices. Zusätzlich kann der Aufbau von Modell- und Lernfabriken für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung den Transfer in eine breite Anwendung unterstützen. Durch die Aufklärung von Mitarbeitenden und Kunden kann zudem das Bewusstsein für Klimaneutralität in produzierenden Unternehmen gestärkt werden. Zuletzt kann auch ein niedrigschwelliger Zugang zu Fördermitteln und deren Beantragung einen Beitrag zu einer breiten Anwendung von digitalen Lösungen für eine klimaneutrale Produktion leisten. Bei der Umsetzung all dieser Handlungsoptionen spielen Kammern, Verbände, überregionale Einrichtungen wie das VDI Zentrum Ressourceneffizienz (o. D. b) und die deutschlandweit verteilten, durch das BMWK geförderten Mittelstand-Digital Zentren (microTEC Südwest, o. D.) eine wichtige Rolle, ebenso wie regionale Akteure, etwa die bayerischen Cluster (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2020) oder die an dieser Roadmap beteiligten Themenplattformen Digitalisierung im Energiebereich und Digitale Produktion & Engineering der Bayern Innovativ.

◀ S. 20  
◀ S. 25

### 5.3.6 Mindset bei Unternehmen und Konsumenten

#### **Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten**

Nach Einschätzung der Expertinnen und Experten kann die Umsetzung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung in der breiten Industrie auch durch ein entsprechendes Mindset bei Unternehmen und Konsumenten unterstützt werden. Hierzu zählt zum Beispiel die Schaffung eines Bewusstseins für die Gefahren von Greenwashing, sowohl bei Konsumenten als auch bei Unternehmen. Des Weiteren kann die Sicherstellung einer gesellschaftlichen Akzeptanz für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung, beispielsweise durch die Schaffung eines ökologischen Bewusstseins im Konsum und durch die Vermittlung der Notwendigkeit, Produkte zu reparieren oder wiederzuverwenden, einen Beitrag zu einem solchen Mindset leisten. Ein weiteres Beispiel ist die Vermittlung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung als Notwendigkeit und Chance für die Zukunftsfähigkeit des Industriestandorts.

◀ S. 22  
◀ S. 26

### 5.3.7 Kompetenzen und Wissen bei Fachkräften

Damit die in Layer 2 beschriebenen Anwendungen für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung in der breiten Industrie eingesetzt werden können, ist es aus Sicht der Expertinnen und Experten notwendig, Fachkräfte mit Kompetenzen und Wissen in den Themenfeldern Digitalisierung und ökologische Nachhaltigkeit auszustatten. Dies betrifft die Bereiche schulische Ausbildung, berufliche Ausbildung und Weiterbildung, die im Folgenden näher erläutert werden.

#### **Schulische Ausbildung:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Für die Fachkräfte von morgen kann die Vermittlung von Kompetenzen und Wissen für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung bereits in der schulischen Ausbildung beginnen. Dies betrifft zum Beispiel die Etablierung der Themen Digitalisierung und ökologische Nachhaltigkeit als zentrale Bestandteile der schulischen Ausbildung. Ein weiterer möglicher Ansatz ist eine Erhöhung der Awareness und die Realisierung eines positiven Technologiebilds bereits während der Schulzeit, beispielsweise durch Angebote wie einem Tag der offenen Tür bei Unternehmen und Forschungseinrichtungen. In Summe können solche Ansätze in der schulischen Ausbildung auch zu einem erhöhten Vertrauen der Bevölkerung in digitale Anwendungen beitragen. In den nächsten Jahrzehnten wird die Digitalisierung weiter voranschreiten und die unterschiedlichsten Lebensbereiche stärker durchdringen. Daher ist es wichtig, dass das Vertrauen der Bevölkerung in digitale Anwendungen ebenso zunimmt.

#### **Berufliche Ausbildung:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Auch in der beruflichen Ausbildung können Kompetenzen und Wissen für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung an angehende Fachkräfte vermittelt werden. Hierzu kann zum Beispiel die Etablierung der Themen Digitalisierung, auch mit Bezug auf Aspekte der Cybersecurity, und ökologische Nachhaltigkeit in produkt- und produktionsbezogenen Ausbildungsberufen einen Beitrag leisten. Perspektivisch umfassen mögliche Aktivitäten in diesem Bereich außerdem die Schaffung neuer Berufsbilder und deren Etablierung in der Ausbildung, wie Nachhaltigkeitsmanager, Berufe an der Schnittstelle zwischen Energiemanagement und Informatik sowie der Beruf eines Digital Twin Modelers. Aus Aktivitäten in der beruflichen Ausbildung resultiert die Sicherstellung einer ausreichenden Verfügbarkeit von Fachkräften für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung.

### **Weiterbildung:** Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Neben zukünftigen und angehenden Fachkräften sind bestehende Fachkräfte eine Zielgruppe für die Vermittlung von Fachwissen und Kompetenzen zur klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung. Entsprechende Weiterbildungsmaßnahmen sollten dabei alle betroffenen Fachabteilungen erreichen und sich somit nicht nur an Mitarbeitende in der Produktion richten, sondern auch an Fachkräfte in der Produktentwicklung und im After Sales Service. Zudem sollten Mitarbeitende in Entscheidungspositionen über geeignete Weiterbildungsformate mit den notwendigen Kompetenzen und Fachwissen ausgestattet werden.

## 5.3.8 Betriebswirtschaftlicher Fortschritt

Um die Vision einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung bis zum Jahr 2045 zu realisieren, bedarf es nach Einschätzung der Expertinnen und Experten auch eines betriebswirtschaftlichen Fortschritts unter produzierenden Unternehmen und Organisationen aus dem Energiebereich. Dies umfasst sowohl die Transformation von Organisationen im Allgemeinen als auch eine Transformation der Unternehmenskultur für Mitarbeitende im Speziellen.

### **Transformation von Organisationen im Allgemeinen:**

Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Für eine klimaneutrale Industrie mit Digitalisierung kann aus Sicht der Expertinnen und Experten jede betroffene Organisation einen Beitrag leisten, indem auch jenseits der Implementierung technischer Lösungen das eigene Unternehmen entsprechend ausgerichtet wird. Dies kann zum Beispiel die Etablierung von Strategien zur ökologischen Nachhaltigkeit und zur Digitalisierung im Unternehmen umfassen. Ein weiteres Beispiel ist die Etablierung einer zentralen verantwortlichen Person für ökologische Nachhaltigkeit im Unternehmen, wie einer oder eines Chief Sustainability Officer. Unternehmen können zudem eine Anpassung der Wirkungsmessung vornehmen, sodass neben wirtschaftlichen Aspekten auch ökologische Nachhaltigkeitsaspekte als Entscheidungsgrundlage berücksichtigt werden. Beim Einsatz von Digitalisierung für eine klimaneutrale Produktion sollten daher auch die zusätzlichen Ressourcen berücksichtigt werden, die unter anderem für Hardware und Rechenleistung eingesetzt werden müssen, um Entscheidungen im Unternehmen bestmöglich im Sinne einer ökologischen Nachhaltigkeit treffen zu können. Da sich Unternehmen aufgrund der Auswirkungen soziokultureller Trends wie beispielsweise Green Pressure und globaler Protestbewegungen [\(siehe Layer 1 Kapitel 5.1.1\)](#) einem zunehmenden Entscheidungsdruck ausgesetzt sehen, gewinnt dieser Aspekt voraussichtlich deutlich an Bedeutung. Unternehmen benötigen hierfür zum Teil Unterstützung durch externe Dienstleister.

◀ S. 20

### **Transformation der Unternehmenskultur für Mitarbeitende:**

Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Ein weiteres Themenfeld ist die Verankerung der Themen ökologische Nachhaltigkeit und Digitalisierung in der Unternehmenskultur für Mitarbeitende. Zum Beispiel können Organisationen in die Berechnung von Mitarbeitenden-Boni neben wirtschaftlichen Erfolgsfaktoren auch ökologische Nachhaltigkeitsaspekte einfließen lassen. Zudem können Mitarbeitende unter anderem aus der Produktion in Innovationsprozesse eingebunden und agile und interdisziplinäre Teams etabliert werden.

### 5.3.9 Volkswirtschaftlicher Fortschritt

Neben der im vorangegangenen Kapitel geschilderten Transformation einzelner Organisationen ist aus Sicht der Expertinnen und Experten zusätzlich eine Weiterentwicklung der gesamten Industrie notwendig. Dies betrifft die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle sowie die Transformation der Wertschöpfung produzierender Unternehmen.

- ◀ S. 44 **Entwicklung neuer Geschäftsmodelle: Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten**
- ◀ S. 50 In **Layer 2 Kapitel 5.2.8** wurden bereits einige konkrete Geschäftsmodelle für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung geschildert. Um einige der nicht technischen Herausforderungen auf dem Weg zu einer klimaneutralen Industrie mit Digitalisierung zu lösen, ist es jedoch notwendig, dass darüber hinaus weitere neue Geschäftsmodelle entwickelt und in der breiten Industrie implementiert werden. Ein Beispiel liegt in der Entwicklung von Plattformgeschäftsmodellen für Energie von kleineren Erzeugern, beispielsweise auch für Wasserstoff, sowie für Eingangsmaterialien in einer Kreislaufwirtschaft, die es Unternehmen ermöglichen, unkompliziert Ressourcen auszutauschen. Um die für eine klimaneutrale Produktion mit Digitalisierung notwendige Transparenz zu schaffen, beispielsweise mit Hinblick auf Energieverfügbarkeiten und -bedarfe, ist die Entwicklung datengetriebener Geschäftsmodelle erforderlich, die eine Monetarisierung von Daten ermöglichen und einen Anreiz bieten, Daten über Unternehmensgrenzen hinweg auszutauschen.

#### **Transformation der Wertschöpfung produzierender Unternehmen:**

Weiterentwicklung bis 2045 zu erwarten

Neben der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle kann auch eine Transformation der industriellen Wertschöpfung einen positiven Beitrag zu einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung erreichen. Dies kann zum Beispiel den Übergang von einer Linearwirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft umfassen, in der die Weiterverwertung von Produkten bereits in der Produktentwicklung berücksichtigt wird, Maßnahmen zu einer möglichst langen Produktnutzung ergriffen werden und am Ende des Produktlebenszyklus eine Reparatur, ein Remanufacturing oder ein Recycling erfolgt. Eine weitere Möglichkeit liegt darin, eine ganzheitliche Sichtweise auf industrielle Ökosysteme zu etablieren, beispielsweise im Hinblick auf Rohstoff- und Energiebedarfe, um so für eine bessere Verteilung zu sorgen.

| VISION: 2045







## 6 Fazit

| VISION: 2045

## 6 Fazit

Aus den Inhalten der Roadmap-Layer 1, 2 und 3 werden die folgenden Kernaussagen abgeleitet:<sup>6</sup>

- Eine engere Vernetzung von Energieerzeugern, Energienetzbetreibern und Produktionsunternehmen wird in Zukunft noch relevanter.
- Digitale Anwendungen bieten an zahlreichen Stellen der Wertschöpfungskette und bei zahlreichen Akteuren im Bereich der Energieerzeugung, -übertragung und in der Produktion großes Potenzial, die Entwicklung hin zu einer Klimaneutralität zu unterstützen.
- Viele Entwicklungen zwingen Unternehmen bereits heute zum Umdenken beim Thema Energie (u. a. Green Deal, Gaskrise).
- Durch digitale Anwendungen können bereits in der Produktentwicklung und im Engineering wichtige Weichen in Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit der Produkte und deren Herstellungsprozesse gestellt werden.
- Digitale Anwendungen ermöglichen beispielsweise eine Flexibilisierung der Produktion, wodurch diese resilienter gegenüber Stromschwankungen wird. Digitalisierungslösungen schaffen Transparenz über den tatsächlichen Energieverbrauch der Produktion – eine wichtige Information für die Steuerung von Energieerzeugung und -speicherung und für die Energieeffizienz.
- Eine breite, digitale Vernetzung von Unternehmen innerhalb einer Wertschöpfungskette und in regionalen Industrieparks ermöglicht die Erschließung von ökologischen Nachhaltigkeitspotenzialen (z. B. durch die Etablierung eines digitalen Produktpasses sowie für Nahwärmenetze und für die Verringerung von Spitzenlasten oder Netzüberlastungen).
- Die Flexibilisierung der Produktion und des Energiebezugs kann durch rechtliche/politische Rahmenbedingungen unterstützt werden.
- Für die Verankerung digitaler Lösungen sind die Aus- und Weiterbildung sowie schulische Bildung in den Themenkomplexen hochrelevant; hier sind Unternehmen bereits jetzt gefordert, auch intern die Weichen zu stellen.
- Viele digitale Anwendungen sind bereits heute grundsätzlich vorhanden, müssen aber für spezifische Einsatzgebiete weiterentwickelt werden; hier ist Technologietransfer zentral.
- Best Practices und anwendungsnahe Lösungen sind wesentlich für die Umsetzung einer klimaneutralen Produktion mit Digitalisierung, insbesondere im Mittelstand.
- Der Transfer von Wissen und Technologien zwischen Forschung und Wirtschaft spielt eine wesentliche Rolle für innovative, anwendungsorientierte Ansätze; bedarfsorientierte Lösungen sind gefragt.

---

<sup>6</sup> Die in der Roadmap identifizierten Handlungsfelder adressieren vorrangig Unternehmen und Verbände.

## Literaturverzeichnis

**AdaProQ. (o. D.).** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://adaproq.de/>

**Agora Energiewende. (Februar 2017).** Energiewende und Dezentralität: Zu den Grundlagen einer politisierten Debatte. Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora\\_Dezentralitaet\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora_Dezentralitaet_WEB.pdf)

**Agora Energiewende; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. (August 2020).** Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Abgerufen am 02. März 2023 von Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung\\_Industrie/164\\_A-EW\\_Klimaneutrale-Industrie\\_Studie\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf)

**Aleger. (o. D.). Digital Engineering: Herausforderungen, Chancen und Tools für die Produktentwicklung in der digitalen Fabrik.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://alegerglobal.com/augmented-reality/anwendungsbereiche/digital-engineering/#:~:text=Digital%20Engineering%20betrifft%20das%20Engineering,lange%20zum%20Teil%20digital%20gearbeitet>

**Alois Müller. (o. D.). Die CO<sub>2</sub>-neutrale Fabrik.** Abgerufen am 08. März 2023 von Green Factory: <https://alois-mueller.com/unternehmen/energiekonzept/>

**Bayerische Staatsregierung. (08. November 2022).** Bayerns Wirtschafts- und Energieminister setzt sich in einem Schreiben an Bundesminister Habeck für Bioenergie ein. Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern.de/bayerns-wirtschafts-und-energieminister-setzt-sich-in-einem-schreiben-an-bundesminister-habeck-fr-bioenergie-ein/>

**Bayerischer Energiepreis. (2022).** Die Preisträgerinnen und Preisträger 2022. Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayerischer-energiepreis.de/preistraeger/preistraeger-2022>

**Bayerisches Landesamt für Umwelt. (o. D. a). Materialeffizienz – Weniger ist mehr!** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von Umwelt Klimapakt Bayern: <https://www.umweltpakt.bayern.de/abfall/fachwissen/270/materialeffizienz-weniger-mehr>

**Bayerisches Landesamt für Umwelt. (o. D. b). Ressourcen- und Rohstoffeffizienz.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von Umwelt Klimapakt Bayern: <https://www.umweltpakt.bayern.de/nachhaltigkeit/fachwissen/344/ressourcen-rohstoffeffizienz>

**Bayerisches Staatsministerium für Digitales. (o. D.).** TwinBy. Abgerufen am 02. März 2023 von Digitale Zwillinge für Bayern: <https://twinby.bayern.de/startseite>

**Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. (Mai 2020).** Cluster-Offensive Bayern. Abgerufen am 09. März 2023 von <https://www.stmwi.bayern.de/wirtschaft/forschung-technologie/cluster-offensive-bayern/>

**Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. (o. D.).** Energietransparenz. Abgerufen am 01. Dezember 2022 von Energie-Atlas Bayern: <https://www.energieatlas.bayern.de/unternehmen/energiemanagement/energietransparenz>

**Bayern Innovativ. (11. November 2022 a). Schadensfälle und deren Konsequenzen November 2022.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-digitalisierung/cybersecurity/seite/schadensfaelle-cybersecurity-november>



**Bayern Innovativ. (09. November 2022 b). Schadensfälle und deren Konsequenzen Oktober 2022.**

Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-digitalisierung/cybersecurity/seite/schadensfaelle-cybersecurity-oktober>

**Bayern Innovativ. (o. D. a). Roadmaps als Fahrplan zur Innovation. How to innovate.** Abgerufen am

02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/uwao-api/faila/files/bypath/pdf-dokumente/technologie-und-innovationsmanagement/how-to-innovate-roadmaps-bayern-innovativ.pdf?mod=2021-12-03T08:38:08.112Z&published=false>

**Bayern Innovativ. (o. D. b). Wie datenbasierte Anwendungen neue Geschäftsmodelle eröffnen.** Ab-

gerufen am 01. Dezember 2022 von Unternehmensübergreifende Kooperation im Datenraum Industrie 4.0: <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/digital-production-engineering/seite/unternehmensuebergreifende-kooperation-im-datenraum-industrie-4-0>

**Bayern Innovativ. (o. D. c). Verbundprojekte der ZD.B-Themenplattform Digital Production & Enginee-**

**ring.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/digital-production-engineering/seite/verbundprojekte-der-zdb-themenplattform-digital-production-engineering>

**Bayern Innovativ. (o. D. d). Ganzheitliche Energiesystemanalyse für Bayern, Deutschland und Europa.** Ab-

gerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/kosinek-energiesystemanalyse>

**Bayern Innovativ. (o. D. e). Wie mit Simulation Produktion und Engineering verbessert werden.** Abge-

rufen am 02. März 2023 von Simulation – auf dem Weg zur virtuellen Inbetriebnahme, Absicherung und Freigabe: <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/digital-production-engineering/seite/simulation-auf-dem-weg-zur-virtuellen-inbetriebnahme-absicherung-und-freigabe>

**Bayern Innovativ. (o. D. f). Wie sich die Anforderungen an automatisierte und vernetzte Fabriken er-**

**füllen lassen.** Abgerufen am 02. März 2023 von Sensorik in der Produktion: Datenerfassung und -aufbereitung: <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/digital-production-engineering/seite/sensorik-in-der-produktion-datenerfassung-und-aufbereitung>

**Bayern Innovativ. (o. D. g). Wenn jedes Quäntchen zählt ...** Abgerufen am 02. März 2023 von Quanten-

technologie in Produktion und Engineering: <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/digital-production-engineering/seite/quantentechnologie-in-produktion-und-engineering>

**Bayern Innovativ. (o. D. h). Welchen Beitrag der Digitale Produktpass für eine zirkuläre Wirtschaft**

**leistet.** Abgerufen am 02. März 2023 von Der Sustainable Twin als Baustein für eine nachhaltige Industrie: <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/digital-production-engineering/seite/der-sustainable-twin-als-baustein-fuer-eine-nachhaltige-industrie>

**Bayern Innovativ. (o. D. i). Herausforderungen meistern. Chancen nutzen.** Abgerufen am 07. März 2023

von Roadmap „Industrialisierung der additiven Fertigung“: <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/additive-fertigung/seite/roadmap-industrialisierung-in-der-additiven-fertigung>

**Bayern Innovativ. (o. D. j). Thinknet 6G.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-digitalisierung/thinknet-6g/seite/thinknet-6g>

**Bitkom. (12. April 2021 a). 3D-Druck kann Lieferengpässe überbrücken.** Abgerufen am 01. Dezember

2022 von <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/3D-Druck-kann-Lieferengpaesse-ueberbruecken>

## | VISION: 2045

**Bitkom. (Oktober 2021 b). Klimaeffekte der Digitalisierung.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-10/20211010\\_bitkom\\_studie\\_klimaeffekte\\_der\\_digitalisierung.pdf](https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-10/20211010_bitkom_studie_klimaeffekte_der_digitalisierung.pdf)

**Bitkom. (27. April 2021 c). Quantencomputer bieten entscheidenden Wettbewerbsvorteil.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Quantencomputer-bieten-entscheidenden-Wettbewerbsvorteil>

**Bitkom. (16. Dezember 2021 d). Wer sich mit Blockchain beschäftigt, hat hohe Erwartungen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Blockchain-hohe-Erwartungen>

**Bitkom. (15. November 2022). Ein Viertel der deutschen Industrie setzt auf 5G-Campus-Netze.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Viertel-deutscher-Industrie-5G-Campus-Netze>

**Bitkom Akademie. (o. D.). Relevante Anforderungen an Unternehmen und Unternehmensführung.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://bitkom-akademie.de/esg-kriterien>

**BMW Group. (26. Januar 2023). Leuchtturmprojekt: Konsortium entwickelt neue Konzepte zur Nutzung nachhaltiger Materialien.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0406535DE/leuchtturmprojekt-konsortium-entwickelt-neue-konzepte-zur-nutzung-nachhaltiger-materialien>

**Boston Consulting Group. (23. Februar 2023). How Tech and Telecom Can Create a Triple Win in Green.** Abgerufen am 08. März 2023 von <https://www.bcg.com/publications/2023/role-of-ict-in-sustainable-development-triple-green-win>

**BR24. (16. November 2022). Windkraft-Ausbau in Bayern: Was jetzt passiert.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.br.de/nachrichten/bayern/windkraft-ausbau-in-bayern-was-jetzt-passiert,TNI4BNI>

**Bundesakademie für Sicherheitspolitik. (2021). Die Mär von der multipolaren Weltordnung. Hegemonie in der Sicherheitspolitik des 21. Jahrhunderts.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.baks.bund.de/sites/baks010/files/arbeitspapier\\_sicherheitspolitik\\_5\\_2015.pdf](https://www.baks.bund.de/sites/baks010/files/arbeitspapier_sicherheitspolitik_5_2015.pdf)

**Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik. (o. D.). Grundlagenwissen zum Thema Cloud: Was ist zu beachten, bevor man eine Cloud nutzt?** Abgerufen am 07. März 2023 von [https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Informationen-und-Empfehlungen/Cloud-Computing-Sicherheitstipps/Grundlagenwissen/grundlagenwissen\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Informationen-und-Empfehlungen/Cloud-Computing-Sicherheitstipps/Grundlagenwissen/grundlagenwissen_node.html)

**Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. (o. D.). Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW).** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/Effiziente\\_Waermenetze/effiziente\\_waermenetze\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/Effiziente_Waermenetze/effiziente_waermenetze_node.html)

**Bundesministerium der Verteidigung. (Juni 2016). Weißbuch 2016: Zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmvg.de/resource/blob/13708/015be272f8c0098f1537a491676bfc31/weissbuch2016-barrierefrei-data.pdf>

**Bundesministerium des Innern und für Heimat. (o. D.). IT- und Cybersicherheit.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/it-und-digitalpolitik/it-und-cybersicherheit/it-und-cybersicherheit-node.html>

**Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (11. Dezember 2020). Plattformökonomie.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmas.de/DE/Arbeit/Digitalisierung-der-Arbeitswelt/Denkfabrik-Digitale-Arbeitsgesellschaft/plattformoekonomie.html>

**Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (22. Juli 2021). Plattformökonomie global denken – internationaler Austausch zu fairer Plattformarbeit.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmas.de/DE/Service/Presse/Meldungen/2021/plattformoekonomie-global-denken-internationaler-austausch-plattformarbeit.html>

**Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (o. D. a). Aktivitäten der Bundesregierung.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.csr-in-deutschland.de/DE/CSR-Allgemein/CSR-Politik/CSR-in-Deutschland/Aktivitaeten-der-Bundesregierung/aktivitaeten-der-bundesregierung.html>

**Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (o. D. b). Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmas.de/DE/Service/Gesetze-und-Gesetzesvorhaben/Gesetz-Unternehmerische-Sorgfaltspflichten-Lieferketten/gesetz-unternehmerische-sorgfaltspflichten-lieferketten.html>

**Bundesministerium für Bildung und Forschung. (11. Oktober 2021). Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>

**Bundesministerium für Bildung und Forschung. (17. Januar 2023). Nationale Wasserstoffstrategie: Grüner Wasserstoff als Energieträger der Zukunft.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie\\_node.html#:~:text=Wissenswertes%20zu%20Gr%C3%BCnem%20Wasserstoff%2015.05,Produktion%2C%20Transportf%C3%A4higkeit](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html#:~:text=Wissenswertes%20zu%20Gr%C3%BCnem%20Wasserstoff%2015.05,Produktion%2C%20Transportf%C3%A4higkeit)

**Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (22. Dezember 2022). Regionale Lebensmittel – transparent gekennzeichnet eine gute Wahl.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmel.de/DE/themen/ernaehrung/lebensmittel-kennzeichnung/freiwillige-angaben-und-label/kennzeichnung-regionale-lebensmittel.html#:~:text=Das%20vom%20BMEL%20gemeinsam%20mit,dem%20Produkt%20%22regional%22%20ist>

**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (30. Juni 2020). Green IT.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/konsum-und-produkte/produktbereiche/green-it>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (November 2020). Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Nachhaltige-Produktion.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Nachhaltige-Produktion.pdf?__blob=publicationFile&v=8)

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (14. Dezember 2016). Wie digitalisiert man ein analoges Unternehmen? Das Beispiel der Rex Gummiteniken GmbH & Co. KG.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Artikel/informations-planungssysteme-wie-digitalisiert-man-ein-analoges-unternehmen.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (20. August 2019 a). Vulkangestein speichert Windstrom.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2019/07/Meldung/News1.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (20. August 2019 b). Was ist eigentlich Versorgungssicherheit?** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2019/07/Meldung/direkt-erklaert.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (01. August 2021). Was bieten Industrial Internet of Things-Plattformen?** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2021/08/12-was-bieten-industrial-internet-of-things-plattformen.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (29. Dezember 2022 a). Elektromobilität in Deutschland.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (August 2022 b). Nachhaltigkeit durch den Einsatz von KI: Orientierungshilfe für anwendende Unternehmen.** Abgerufen am 08. März 2023 von [https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KI-Inno/2022/2022\\_08\\_29\\_KI-undNachhaltigkeit.pdf;jsessionid=4AF5C172F2574EE1FF06DD180D1D7C34?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KI-Inno/2022/2022_08_29_KI-undNachhaltigkeit.pdf;jsessionid=4AF5C172F2574EE1FF06DD180D1D7C34?__blob=publicationFile&v=12)

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. D. a). CCU/CCS: Baustein für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. D. b). Cloud Computing.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Digitale-Welt/cloud-computing.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. D. c). Fachkräfte für Deutschland.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/fachkraeftesicherung.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. D. d). Siemens Elektronikwerk Amberg – Die Digitale Fabrik.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/076-elektronikwerk-amberg-die-digitale-fabrik/beitrag-elektronikwerk-amberg-die-digitale-fabrik.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. D. e). Speichertechnologien.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/speichertechnologien.html#:~:text=Kurzzeit%2D%20und%20Langzeitspeicher,Regel%20nur%20ein%20begrenztes%20Speichervolumen.>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. D. f). Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Bildung und Forschung. (o. D.). Manufacturing-X.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Manufacturing-X/Initiative/initiative-manufacturing-x.html>

**Bundesnetzagentur. (18. November 2021). Redispatch.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Netzengpassmanagement/Engpassmanagement/Redispatch/start.html>

**Bundesregierung. (19. Dezember 2019). CO<sub>2</sub>-Bepreisung.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/CO<sub>2</sub>-bepreisung-1673008](https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/CO2-bepreisung-1673008)

**Bundesregierung. (15. November 2021). Was ist Quantencomputing?** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/quantencomputing-kurz-erklart-1929138>

**Bundesregierung. (07. November 2022 a). Generationenvertrag für das Klima.** Abgerufen am 02. März 2023 von Klimaschutzgesetz: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>

**Bundesregierung. (07. Juni 2022 b). Wasserstoff – Energieträger der Zukunft.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/wasserstoff-technologie-1732248>

**Bundesverband der Deutschen Industrie. (21. Oktober 2021 a). Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>

**Bundesverband der Deutschen Industrie. (21. Oktober 2021 b). Klimapfade 2.0 – Wie wir unser Industrieland klimaneutral gestalten.** Abgerufen am 31. August 2022 von <https://bdi.eu/artikel/news/klimapfade-2-0-wie-wir-unser-industrieland-klimaneutral-gestalten/>

**Bundesverband der Deutschen Industrie. (16. Februar 2023). Digitaler Produktpass als Teil der Sustainable Product Strategy der Europäischen Kommission.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://bdi.eu/artikel/news/digitaler-produktpass-als-teil-der-sustainable-product-strategy-der-europaeischen-kommission/>

**Bundesverband Wärmepumpe. (o. D.). Wärmenetze, Siedlung und Quartiere.** Abgerufen am 08. März 2023 von <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/waermenetze-siedlung-und-quartiere/>

**Bundeszentrale für politische Bildung. (31. Mai 2013). Wetter, Klima und Klimawandel.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/38427/wetter-klima-und-klimawandel/>

**Bundeszentrale für politische Bildung. (31. Januar 2014). Fachkräftemangel.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von Arbeitsmarktpolitik: <https://www.bpb.de/themen/arbeit/arbeitsmarktpolitik/178757/fachkraeftemangel/>

**Campus-Akademie Universität Bayreuth. (o. D.). Smart Data Academy: Arbeit im Unternehmen der Zukunft.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.campus-akademie.uni-bayreuth.de/de/zertifikatslehrgaenge/Smart-Data-Academy/index.html>

**Carl Zeiss Stiftung. (o. D.). SteelDesAI. KI-Tools zur Entwicklung zukunftsfähiger Stähle.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.carl-zeiss-stiftung.de/themen-projekte/uebersicht-projekte/detail/steel-desain-ki-tools-zur-entwicklung-zukunftsfaehtiger-staehle>

**Catena-X. (22. Februar 2023). Gewinner des RFT ist Cofinity-X.** Abgerufen am 08. März 2023 von <https://catena-x.net/de/aktuelles-terminen/news-display/gewinner-des-rft-ist-cofinity-x>

**Catena-X. (o. D.).** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://catena-x.net/de/>

**Consolinno Energy. (o. D.). Consolinno Digital Energy Services: Leistungsstarke Hardware- und Software-Dienstleistungen für die Digitalisierung der Energieversorgung.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://consolinno.de/>

**ConTech Software & Engineering. (o. D.). Effizienz für die Industrie – Contech gewinnt Bayerischen Ressourceneffizienzpreis 2021.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.contech-analyser.de/unternehmens-news/effizienz-fuer-die-industrie-contech-gewinnt-bayerischen-ressourceneffizienzpreis-2021>



**data M Shee Metal Solutions. (o. D.). ZD.B Förderaufruf 2017 – Digital Production & Engineering.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/uwao-api/faila/files/bypath/pdf-dokumente/zentrum-digitalisierung-bayern/digital-production-engineering/intwal17-ergebnisse-datam-f-hp.pdf?mod=2021-10-20T12:50:27.343Z&published=false>

**Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK. (o. D.). Fernwärmesystem.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/energiehende-politik/system-kwk-fernwaerme>

**Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. (03. September 2021). KI und Nachhaltigkeit – Ein Diskussionsbeitrag für die Plattform Lernende Systeme.** Abgerufen am 02. März 2023 von Plattform Lernende Systeme: <https://www.acatech.de/publikation/ki-und-nachhaltigkeit-ein-diskussionsbeitrag-fuer-die-plattform-lernende-systeme/>

**Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. (o. D.). Potenziale von KI für eine nachhaltige Entwicklung.** Abgerufen am 02. März 2023 von Plattform Lernende Systeme: <https://www.plattform-lernende-systeme.de/ki-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html>

**Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Leopoldina, Akademienunion. (02. Februar 2023). Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement.** Abgerufen am 07. März 2023 von [https://www.acatech.de/publikation/deutschland-klimaneutral/?utm\\_source=sendinblue&utm\\_campaign=acatech%20TRANSFER%20Mrz2023&utm\\_medium=email](https://www.acatech.de/publikation/deutschland-klimaneutral/?utm_source=sendinblue&utm_campaign=acatech%20TRANSFER%20Mrz2023&utm_medium=email)

**Deutsche Bundesstiftung Umwelt. (o. D.). Energieoptimierte Gießerei.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://cms.dbu.de/708artikel38914\\_2486.html](https://cms.dbu.de/708artikel38914_2486.html)

**Deutsche Energie-Agentur. (Januar 2018). Schnittstellen und Standards für die Digitalisierung der Energiewende: Übersicht, Status Quo und Handlungsbedarf.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9240\\_Schnittstellen\\_und\\_Standards\\_fuer\\_die\\_Digitalisierung\\_der\\_Energiewende.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9240_Schnittstellen_und_Standards_fuer_die_Digitalisierung_der_Energiewende.pdf)

**Deutsche Energie-Agentur. (o. D.). Elektrizität ist das neue Öl.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.dena.de/newsroom/elektrizitaet-ist-das-neue-oel/>

**Deutsche Energie-Agentur; Deloitte. (05. September 2019). Smart Grid 2019 – Netzdienliche Leistungen über Smart Metering als neues und standardisiertes Instrument im Verteilernetz.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Veranstaltungen/Netzflex\\_Netzdienliche\\_Flexibilitaet/04\\_Ludwig\\_Einhellig\\_DELOITTE.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Veranstaltungen/Netzflex_Netzdienliche_Flexibilitaet/04_Ludwig_Einhellig_DELOITTE.pdf)

**Deutsche Industrie- und Handelskammer. (20. Juni 2022). EU-Taxonomie für Unternehmen aller Größen relevant: Komplexer Klassifizierungsrahmen bringt umfangreiche Berichtspflichten.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.dihk.de/de/themen-und-positionen/wirtschaftspolitik/steuer-und-finanzpolitik/sustainable-finance-taxonomie-ein-dossier-fuer-die-betriebliche-praxis/eu-taxonomie-fuer-unternehmen-aller-groessen-relevant-66740>

**Deutscher Bundestag. (03. April 2020). Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bundestag.de/resource/blob/691748/01a954b2b-2d7c70259b19662ae37a575/WD-5-029-20-pdf-data.pdf>

**Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches. (o. D.). Sektorenkopplung – Synergien sinnvoll nutzen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.dvgw.de/themen/energiehende/sektorenkopplung>

**Die Energieintensiven Industrien in Deutschland. (o. D.). EID: Die Energieintensiven Industrien sichern Wohlstand.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.energieintensive.de/>

**E-Bridge Consulting; MITNETZ Strom. (07. August 2017). Zukünftige Rolle des Verteilnetzbetreibers in der Energiewende: Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung des ordnungspolitischen Rahmens.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://www.bdew.de/media/documents/20160906\\_Studie-E-Bridge-MITNETZ-DSO2.0-Paper.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/20160906_Studie-E-Bridge-MITNETZ-DSO2.0-Paper.pdf)

**egrid applications & consulting. (o. D.). Schwarmspeicher Allgäu.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.egrid.de/portfolio-items/schwarmspeicher-allgaeu/>

**Elektroauto-News. (21. Dezember 2022). Audi stellt Plan für Produktion der Zukunft vor.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.elektroauto-news.net/2022/audi-plan-fuer-produktion-der-zukunft>

**Energie Campus Nürnberg. (o. D.). Spitzenlastfähige Hochtemperaturspeicher.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.encn.de/referenzprojekte/energiespeicher/spitzenlastfaehige-hochtemperaturspeicher>

**EOS. (15. Juni 2022). Additive Minds Academy: EOS M 290 Basis Training App.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.eos.info/de/presscenter/pressemitteilungen/eos-additive-minds-training-app>

**EOS. (o. D.). Beratung und Wissen rund um die Additive Fertigung.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.eos.info/de/beratung-wissen>

**Europäische Kommission. (o. D.). Umsetzung des europäischen Grünen Deals.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_de)

**European Commission. (o. D. a). Corporate sustainability reporting.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting\\_en](https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en)

**European Commission. (o. D. b). Overview of sustainable finance.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/overview-sustainable-finance\\_en](https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/overview-sustainable-finance_en)

**Eurostat. (o. D.). Was sind globale Wertschöpfungsketten?** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://ec.europa.eu/eurostat/web/economic-globalisation/globalisation-in-business-statistics/global-value-chains>

**Forschungsprojekt INZELL. (o. D.). Forschungsprojekt INZELL.** Abgerufen am 07. März 2023 von Netzstützung und Systemdienstleistungserbringung durch eine Industriezelle mit Inselnetzfähigkeit und Erneuerbaren Energien: <https://forschungsprojekt-industriezelle.de/>

**Forschungsstelle für Energiewirtschaft. (Mai 2019 a). Bidirektionales Lademanagement (BDL).** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.ffe.de/projekte/bdl/>

**Forschungsstelle für Energiewirtschaft. (08. August 2019 b). Flexumer als Gestalter einer digitalen Energiezukunft – eine Begriffseinordnung.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/flexumer-als-gestalter-einer-digitalen-energiezukunft-eine-begriffseinordnung/>

**Forschungsstelle für Energiewirtschaft. (13. Juli 2022). Beitragsreihe Politische Maßnahmen: Was ist der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)?** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/carbon-border-adjustment-mechanism-cbam/>

**Frankfurter Allgemeine Zeitung. (11. Mai 2022). Deutsche kaufen weniger Bio-Produkte.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/bio-produkte-deutsche-achten-wegen-inflation-mehr-auf-den-preis-18021437.html>

**Fraunhofer CCPE. (März 2021). Positionspapier und Forschungsprogramm zum Recycling von Kunststoffen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.ccpe.fraunhofer.de/de/aktuelles/newsletter/2021/recycling-von-kunststoffen.html>

**Fraunhofer IESE. (06. September 2019). Autonom oder vielleicht doch nur hochautomatisiert?** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/autonom-oder-vielleicht-doch-nur-hochautomatisiert-was-ist-eigentlich-der-unterschied/>

**Fraunhofer IML. (o. D. a). E<sup>2</sup>-Design – Energieeffizienz in der strategischen Gestaltung von Produktions- und Logistiknetzwerken.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.impl.fraunhofer.de/de/abteilungen/b2/produktionslogistik/e--design.html>

**Fraunhofer IML. (o. D. b). Künstliche Intelligenz in der Anwendung.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.impl.fraunhofer.de/de/themenfelder/kuenstliche-intelligenz-in-der-anwendung.html>

**Fraunhofer ISE. (Juni 2021). Stromgestehungskosten erneuerbare Energien.** Abgerufen am 09. März 2023 von <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>

**Fraunhofer ISI. (2018). Sektorkopplung – Definition, Chancen und Herausforderungen.** Abgerufen am 08. März 2023 von [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2018/WP01-2018\\_Sektorkopplung\\_Wietschel.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2018/WP01-2018_Sektorkopplung_Wietschel.pdf)

**Fraunhofer ISI; Fraunhofer ISE. (Oktober 2019). Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe/Freiburg.** Abgerufen am 08. März 2023 von [https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/pressemitteilungen/2019-10\\_Fraunhofer\\_Wasserstoff-Roadmap\\_fuer\\_Deutschland.pdf](https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/pressemitteilungen/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf)

**Fraunhofer IOSB. (o. D.). Digitaler Zwilling – das Schlüsselkonzept für Industrie 4.0.** Abgerufen am 08. März 2023 von <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/automatisierung-digitalisierung/anwendungsfelder/digitaler-zwilling.html>

**Fraunhofer IWM. (o. D.). Werkstoffmodellierung und Simulation.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.iwm.fraunhofer.de/de/warum-fraunhofer-iwm/kernkompetenzen-technische-moeglichkeiten/werkstoffmodellierung-simulation.html>

**Fraunhofer UMSICHT. (18. Juni 2019). Ökobilanzierung: Einsparung von Treibhausgasemissionen bei Wurstverpackungen.** Abgerufen am 07. März 2023 von [Carbon Footprint von Verpackungen für Fleischwaren: https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2019/wurstverpackungen-oekobilanzierung.html](https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2019/wurstverpackungen-oekobilanzierung.html)

**Fraunhofer UMSICHT. (o. D.). Hochtemperatur Wärmespeicher für Industrie und Kraftwerke.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/thermische-speicher.html>

**Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT. (o. D.). Datenschutz und Datensouveränität.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.fit.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/data-science-und-kuenstliche-intelligenz/datenschutz-und-datensouveraenitaet.html>

**Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. (14. November 2022). Forschende der FAU optimieren Leistung und Stabilität mehrschichtiger organischer Solarzellen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.fau.de/2022/11/news/wissenschaft/forschende-der-fau-optimieren-leistung-und-stabilitaet-mehrschichtiger-organischer-solarzellen/>

**Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. (o. D.). Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik.** Abgerufen am 08. März 2023 von <https://www.mfk.tf.fau.de/forschung/schwerpunkte/virtuelle-produktentwicklung/>

**Gabler Wirtschaftslexikon. (o. D.). Definition: Was ist „Energiemanagementsystem“?** Abgerufen am 08. März 2023 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/energiemanagementsystem-53996>

**Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL. (o. D.). What we are.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://gaia-x.eu/>

**golem.de. (29. Juni 2022). Climeworks baut zweite Kohlendioxid-Filteranlage in Island.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.golem.de/news/klimaschutz-climeworks-baut-zweite-kohlendioxid-filteranlage-in-island-2206-166517.html>

**Graz University of Technology. (o. D.). Virtuelle Produktentwicklung.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://graz.pure.elsevier.com/de/projects/virtual-product-development>

**Haufe. (19. Januar 2023). Kreislaufwirtschaft – die „7 R“.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.haufe.de/sustainability/umwelt/kreislaufwirtschaft-und-circular-economy/kreislaufwirtschaft-die-7-r\\_575774\\_577660.html](https://www.haufe.de/sustainability/umwelt/kreislaufwirtschaft-und-circular-economy/kreislaufwirtschaft-die-7-r_575774_577660.html)

**Helmholtz. (06. Juli 2022). 5 Fragen an ... Pascal Friederich: Mit KI neue Materialien vorhersagen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/mit-ki-neue-materialien-vorhersagen/>

**Helmholtz. (o. D.). Speicherung.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.helmholtz.de/forschung/im-fokus/wasserstofftechnologien/speicherung/>

**IBM. (o. D.). Learn how workflow engine software automates tasks to support a focus on higher-value work.** Abgerufen am 08. März 2023 von What Is a Workflow Engine?: <https://www.ibm.com/cloud/blog/workflow-engine>

**iMi Blockchain. (26. November 2020). Distributed Ledger Technologie (DLT) einfach erklärt.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://imiblockchain.com/de/distributed-ledger-technologie/>

**Industrial Digital Twin Association. (o. D.). Die Technologie kennenlernen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://industrialdigitaltwin.org/technologie>

**Industrie Wegweiser. (09. September 2019). Vollautonome Industrie: Kann eine Fabrik wirklich ohne Arbeitskräfte funktionieren?** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://industrie-wegweiser.de/vollautonome-industrie-4-0/>

**Industrieverband Massivumformung. (o. D.). NOCARBforging 2050.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.massivumformung.de/themen/trends-strategie/nocarbforging-2050>

**Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften TUM School of Engineering and Design. (o. D.). SynErgie II – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.mec.ed.tum.de/iwb/forschung-und-industrie/projekte/nachhaltige-produktion/synergie-ii-synchronisierte-und-energieadaptive-produktionstechnik-zur-flexiblen-ausrichtung-von-industrieprozessen-auf-eine-fluktuierende-energieversorgung/>

**Interconnector. (o. D.). Lohnt sich die Direktvermarktung wirklich? Unser Erlösrechner bringt Klarheit!** Abgerufen am 09. März 2023 von <https://www.interconnector.de/direktvermarktung-strom/direktvermarktungsangebot-anfordern/>

**KAESER Kompressoren. (o. D.). Smart, sicher, sorgenfrei.** Abgerufen am 07. März 2023 von Betreibermodelle: <https://www.kaeser.de/loesungen/betreibermodelle/>

**Konnanath, G. (07. April 2022). Konnektivität: Grundlage für die Zukunftssicherheit von Unternehmen.** Abgerufen am 02. März 2023 von Industry of Things Mission Manufacturing: <https://www.industry-of-things.de/konnektivitaet-grundlage-fuer-die-zukunftssicherheit-von-unternehmen-a-1101290/>

**Konstruktionspraxis. (31. August 2021). Nachhaltigkeit in der Massivumformung: Den Ressourcenschutz gemeinsam vorantreiben.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/den-ressourcenschutz-gemeinsam-vorantreiben-a-1051628/>

**KPMG Deutschland. (14. Juni 2022). Cloud-Computing bietet mehr als nur Kosteneffizienz.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://kpmg.com/de/de/home/media/press-releases/2022/06/cloud-computing-bietet-mehr-als-nur-kosteneffizienz.html>

**Kunststoffe.de. (15. Dezember 2022). Engel startet Pay per Use.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.kunststoffe.de/a/news/engel-startet-pay-per-use-3227631>

**Lexikon der Nachhaltigkeit. (14. Oktober 2015). Cradle-to-Cradle-Vision.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/1\\_3\\_f\\_cradle\\_to\\_cradle\\_vision\\_1544.htm](https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/1_3_f_cradle_to_cradle_vision_1544.htm)

**Mangelberger Elektrotechnik. (o. D.). Circular Economy.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.mangelberger.com/leistungen/mangelberger#circular-economy>

**Memap. (o. D.). 10 KEY-Findings: Wie können Quartiere mit Hilfe digitaler Technologien nachhaltig gestaltet werden?** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://memap-projekt.de/project/keyfindings/>

**microTEC Südwest. (o. D.).** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://klima-neutral-digital.de/>

**Miele. (o. D.). appWash Services – Die digitale Lösung für Ihren Waschkeller.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.miele.de/p/appwash-4784.htm>

**mikrolab; A. Eberle. (o. D.). Predictive maintenance durch cloudbasierte Auswertung von (digitalen) Daten im durchgängigen Austausch zwischen Kunde und Lieferant über den Lebenszyklus von industriellen Komponenten.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.bayern-innovativ.de/uwao-api/faila/files/bypath/pdf-dokumente/zentrum-digitalisierung-bayern/digital-production-engineering/prezys-kurz-zusammenfassung.pdf?mod=2021-11-08T14:52:33.014Z&published=false>

**Mittelstand-Digital Zentrum Augsburg. (o. D.). Was ist künstliche Intelligenz? KI einfach erklärt.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://digitalzentrum-augsburg.de/kuenstliche-intelligenz-einfach-erklaert/>



**Next Kraftwerke. (o. D.). Was ist ein Virtuelles Kraftwerk?** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/virtuelles-kraftwerk>

**Patel, A. (20. Dezember 2022). Kampf dem Druckluft-Energiefresser: Drei-Punkte Digital-Agenda sorgt für Durchblick.** Abgerufen am 02. März 2023 von Digitalisierung für Druckluft-Anlagen: <https://www.process.vogel.de/kampf-dem-druckluft-energiefresser-drei-punkte-digital-agenda-sorgt-fuer-durchblick-a-4a2af96ce83a74b9650789f7bd6b6fef/>

**Phaal, R., Simonse, L., & Den Ouden, E. (2008). Next generation roadmapping for innovation planning.** International Journal of Technology Intelligence and Planning, 4(2), 135–152.

**ProData. (o. D.). Wir ermöglichen digitale Produktpässe für Kunststoffe.** Abgerufen am 02. März 2023 von R-Cycle: <https://www.r-cycle.org/>

**Pufé, I. (2017). Nachhaltigkeit (3., überarbeitete und erweiterte Auflage).** Konstanz und München: UVK Verlagsgesellschaft mbH.

**Reverion. (o. D.). Technology.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://reverion.com/technology/>

**Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau. (o. D.). Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung (VPE).** Abgerufen am 07. März 2023 von Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik: <https://vpe.mv.uni-kl.de/forschung/forschungsschwerpunkte>

**Scale Horizon. (o. D.). What is SCALE?** Abgerufen am 02. März 2023 von About SCALE: <https://scale-horizon.eu/>

**Sculpteo. (o. D.). The State of 3D Printing Report: 2022.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.sculpteo.com/de/ebooks/state-of-3d-printing-report-2022/>

**Siemens Industry Software. (o. D.). Siemens bringt Simcenter auf den Markt – bessere Leistung durch Predictive Engineering Analytics.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://de.industryarena.com/siemens-software/news/siemens-bringt-simcenter-auf-den-markt-bessere-leistung-durch-predictive-engineering-analytics--6246.html>

**Solidwhite. (o. D.). AMbitious powered by toolcraft – VR Schulung.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://solidwhite.de/work/ambitious-powered-by-toolcraft-vr-schulung>

**sonnen. (o. D.). Die Energie: erneuerbar. Die Gemeinschaft: unersetzlich.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://sonnen.de/sonnencommunity/>

**Spektrum. (1999). Umweltschutz.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/umweltschutz/68484>

**Stadtwerte Haßfurt. (o. D.). Nutzung von Wasserstoff als langzeitfähige Option für die Stromspeicherung.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.stwhas.de/portfolio-item/wasserstoff-bhkw/>

**Standardization Council Industrie 4.0. (o. D. a). Die erste Adresse für die Normung der Zukunft.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.sci40.com/>

**Standardization Council Industrie 4.0. (o. D. b). Die Normungsroadmap.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.sci40.com/german/normungsroadmap/>

**Statistisches Bundesamt. (06. Juli 2022 a). Industriesektor in Deutschland weiterhin stark.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Industrie-Handel-Dienstleistungen/Industrie.html>

**Statistisches Bundesamt. (02. Juni 2022 b). Mehr als die Hälfte der im Jahr 2021 gebauten Wohngebäude heizen mit Wärmepumpen.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22\\_226\\_31121.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22_226_31121.html)

**Statistisches Bundesamt. (o. D.). Unternehmen, Tätige Personen, Umsatz und weitere betriebs- und volkswirtschaftliche Kennzahlen: Deutschland, Jahre, Unternehmensgröße, Wirtschaftszweige.** Abgerufen am 07. März 2023 von: <https://www.govdata.de/suchen/-/details/unternehmen-tatige-personen-umsatz-investitionen-bruttowertschopfung-betriebsuberschuss-persona>

**Stiftung Allianz für Entwicklung und Klima. (o.D.). Was sind Scopes (Geltungsbereiche) bei der Berechnung der unternehmensbezogenen Treibhausgasemissionen?** Abgerufen von <https://allianz-entwicklung-klima.de/toolbox/was-sind-scopes-geltungsbereiche-bei-der-berechnung-der-unternehmensbezogenen-treibhausgasemissionen>

**Stiftung Klimaneutralität; Agora Energiewende; Agora Verkehrswende. (Juni 2021). Politikinstrumente für ein klimaneutrales Deutschland: 50 Empfehlungen für die 20. Legislaturperiode (2021–2025).** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_06\\_DE\\_100Tage\\_LP20/A-EW\\_219\\_Politikinstrumente\\_klimaneutrales\\_Deutschland\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_06_DE_100Tage_LP20/A-EW_219_Politikinstrumente_klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf)

**SynErgie. (o. D.). SynErgie.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://synergie-projekt.de/>

**Tagesschau. (26. Juli 2022). Regierung legt Fokus auf Sanierung.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.tagesschau.de/inland/regierung-sanierung-gebaeude-101.html>

**Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe. (o. D.). Virtuelle Produktentwicklung.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.th-owl.de/studium/angebote/studiengaenge/detail/virtuelle-produktentwicklung/>

**Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt. (o. D.). Schwache vs. Starke KI – eine Definition.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://ki.fhws.de/thematik/starke-vs-schwache-ki-eine-definition/>

**Technische Universität München. (19. November 2020). Datenmanagementsystem.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://wiki.tum.de/display/logistikkompodium/Datenmanagementsystem>

**Technologie-Initiative SmartFactory KL. (2018). Echtzeitsystem.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://smartfactory.de/echtzeitsystem/>

**Tetra Pak. (o. D.). Beispiele für Lebenszyklusanalysen (LCAs) zur Untersuchung der Umweltbelastung durch Lebensmittel- und Getränkeverpackungen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.tetra-pak.com/de/sustainability/planet/environmental-impact/a-value-chain-approach/life-cycle-assessment/lca-examples>

**ubm Magazin. (o. D.). Das Gebäude, das denkt.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.ubm-development.com/magazin/smart-building-cube-berlin/>

**Umweltbundesamt. (03. August 2013). Was bedeutet „Energieeffizienz“?** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-bedeutet-energieeffizienz#:~:text=Energieeffizienz%20beschreibt%20allgemein%20das%20Verh%C3%A4ltnis,ein%20Produkt%20oder%20eine%20Dienstleistung>

**Umweltbundesamt. (Oktober 2017). Ökologische Rohstoffverfügbarkeit: Umweltrisiken sind die Versorgungsrisiken der Zukunft.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/dokumente/factsheet\\_oekologische\\_rohstoffverfuegbarkeit.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/dokumente/factsheet_oekologische_rohstoffverfuegbarkeit.pdf)

**Umweltbundesamt. (17. Oktober 2018). Ökobilanz.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>

**Umweltbundesamt. (13. Februar 2020). Klimaschutz und Dekarbonisierung im Industriesektor.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/klimaschutz-dekarbonisierung-im-industriesektor>

**Umweltbundesamt. (23. April 2021). Klima und Treibhauseffekt.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#die-sonne-und-das-klima>

**Umweltbundesamt. (23. Mai 2022 a). Carbon Capture and Storage.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen>

**Umweltbundesamt. (22. September 2022 b). Der Europäische Emissionshandel.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>

**Umweltbundesamt. (20. Dezember 2022 c). Greenwashing und Sustainable Finance.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.umweltbundesamt.de/greenwashing-sustainable-finance#undefined>

**Umweltbundesamt. (03. August 2013). Was ist ein „Smart-Grid“?** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-ein-smart-grid>

**Universität Leipzig. (o. D.). Energie – Grundlagen.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://home.uni-leipzig.de/energy/energie-grundlagen/22.html>

**UWAZI Tech. (o. D.). vcg.** Abgerufen am 02. März 2023 von Enabling circular bioeconomy at scale: <https://vcg.ai/>

**Vattenfall. (o. D.). Bidirektionales Laden: das Elektroauto als Speicher.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/bidirektionales-laden>

**VDA. (o. D.). Wasserstoff und E-Fuels: Energieimporte.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.vda.de/de/themen/klima-umwelt-und-nachhaltigkeit/wasserstoff-und-e-fuels/energieimporte>

**VDE. (Mai 2019). Zelluläres Energiesystem: Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellulären Ansatzes mit Handlungsempfehlungen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.vde.com/resource/blob/1884494/98f96973fcd8a70777654d0f40c179e5/studie---zellulares-energiesystem-data.pdf>

**VDI. (Juli 2022). Künstliche Intelligenz im Ingenieuralltag.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/kuenstliche-intelligenz-im-ingenieuralltag>

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz. (Juni 2021). Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/1\\_Themen/h\\_Publikationen/Studien/VDI-ZRE\\_Studie\\_KI-betriebliche-Ressourceneffizienz\\_Web\\_bf.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI-ZRE_Studie_KI-betriebliche-Ressourceneffizienz_Web_bf.pdf)

## | VISION: 2045

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz. (o. D. a). ESTEM.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.ressource-deutschland.de/service/estem>

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz. (o. D. b). Gute-Praxis-Beispiele.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/ressourceneffizienz-in-der-praxis/gute-praxis-beispiele/>

**VDMA. (12. Dezember 2022). VDMA veröffentlicht Product Carbon Footprint-Guideline für den Maschinen- und Anlagebau.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/72334734>

**VDMA: Forum Industrie 4.0; Fraunhofer IOSB-INA. (2020). Leitfaden Retrofit für Industrie 4.0: Neuer Nutzen mit vorhandenen Maschinen.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.vdma.org/documents/34570/15610928/Leitfaden\\_I40\\_Retrofit\\_DE\\_FINAL.pdf/214a2929-315d-a4f0-677f-c0221627b23c?t=1642160194829](https://www.vdma.org/documents/34570/15610928/Leitfaden_I40_Retrofit_DE_FINAL.pdf/214a2929-315d-a4f0-677f-c0221627b23c?t=1642160194829)

**Verbraucherzentrale.de. (11. November 2022). Was ist 5G? Vorteile und Risiken der 5. Generation Mobilfunk.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/digitale-welt/mobilfunk-und-festnetz/was-ist-5g-vorteile-und-risiken-der-5-generation-mobilfunk-52004>

**Verhoef, L. A., Budde, B. W., Chockalingam, C., Nodar, B. G., & van Wijk, A. J. (2018). The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach.** Energy Policy, 349–360.

**Viessmann Climate Solutions. (o. D.). Die Brennstoffzelle: Funktion und Einsparpotenzial.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.viessmann.de/de/wissen/technik-und-systeme/brennstoffzelle.html>

**VK Energie. (o. D.). Wir optimieren Energiesysteme und machen sie fit für die Zukunft!** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.vk-energie.de/>

**Volkswagen. (o. D.). Von der Wiege bis zur Bahre.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/04/from-the-well-to-the-wheel.html#>

**Werkstoffe in der Fertigung. (o. D.). Computerbasiertes Hochdurchsatzscreening für die Werkstoffentwicklung.** Abgerufen am 07. März 2023 von <https://werkstoffzeitschrift.de/computerbasiertes-hochdurchsatzscreening-fuer-die-werkstoffentwicklung/>

**WeSort.AI. (o. D.). Abfallanalyse und Sortierung der nächsten Generation durch künstliche Intelligenz.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.wesort.ai/>

**Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung. (o. D.). WiGeP-Positionspapier zum Thema „Digitaler Zwilling“.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von [https://secureservercdn.net/160.153.137.184/b7s.1f6.myftpupload.com/wp-content/uploads/2022/05/Final\\_WiGeP\\_Positionspapier\\_Digital\\_Twin.pdf](https://secureservercdn.net/160.153.137.184/b7s.1f6.myftpupload.com/wp-content/uploads/2022/05/Final_WiGeP_Positionspapier_Digital_Twin.pdf)

**Wöhner. (o. D.). Live-Produktion.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.woehner.de/de/live-produktion>

**World Economic Forum. (September 2021). Global Lighthouse Network: Unlocking Sustainability through Fourth Industrial Revolution Technologies.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Lighthouse\\_Network\\_Unlocking\\_Sustainability\\_Through\\_4IR.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Lighthouse_Network_Unlocking_Sustainability_Through_4IR.pdf)

**World Resources Institute. (o. D.). Greenhouse Gas Protocol.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.wri.org/initiatives/greenhouse-gas-protocol>

## | VISION: 2045

**Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. (Oktober 2020). CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrages zur Einhaltung der 1,5°C-Grenze.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2020/10/FFF-Bericht\\_Ambition2035\\_Endbericht\\_final\\_20201011-v.3.pdf](https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2020/10/FFF-Bericht_Ambition2035_Endbericht_final_20201011-v.3.pdf)

**Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. (26. Oktober 2022). Digitale Plattform bietet Unternehmen die Möglichkeit Ressourcen auszutauschen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://jrf.nrw/2022/10/wi-digitale-plattform/>

**XR HUB Bavaria. (o. D.). XR HUB Bavaria: Where Community Creates XR.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://xrhub-bavaria.de/>

**Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B). (Oktober 2022). Wasserstoff-Roadmap Bayern: Perspektiven und Handlungsempfehlungen zum Hochlauf der bayerischen Wasserstoffwirtschaft.** Abgerufen am 02. März 2023 von [https://h2.bayern/wp-content/uploads/2022/11/H2B\\_BROSCHUeRE\\_Roadmap\\_2022-10\\_WEB\\_secure.pdf](https://h2.bayern/wp-content/uploads/2022/11/H2B_BROSCHUeRE_Roadmap_2022-10_WEB_secure.pdf)

**Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B). (o. D.). Wasserstoffstrategie für Bayern.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://h2.bayern/wasserstoffstrategie/>

**zukunftsInstitut. (April 2015). Zero Waste: Zukunft ohne Müll.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/umwelt/zero-waste-zukunft-ohne-muell/>

**zukunftsInstitut. (o. D. a). Glossar Globalisierung: Trendbegriffe und Definitionen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/megatrend-glossar/globalisierung-glossar/>

**zukunftsInstitut. (o. D. b). Glossar Konnektivität: Trendbegriffe und Definitionen.** Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/megatrend-glossar/konnektivitaet-glossar/>

**zukunftsInstitut. (o. D. c). Glossar Neo-Ökologie: Trendbegriffe und Definitionen.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/megatrend-glossar/neo-oekologie-glossar/>

**zukunftsInstitut. (o. D. d). Megatrend: Konnektivität.** Abgerufen am 02. März 2023 von <https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrend-konnektivitaet/>

**ZVEI e. V. (Juli 2021). Elektro- und Digitalindustrie in Zahlen.** Abgerufen am 07. März 2023 von [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Publikationen/2022/Juli/Elektro\\_und\\_Digitalindustrie\\_in\\_Zahlen\\_2022/ZVEI-Elektro-und-Digitalindustrie-in-Zahlen-2022\\_V2.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2022/Juli/Elektro_und_Digitalindustrie_in_Zahlen_2022/ZVEI-Elektro-und-Digitalindustrie-in-Zahlen-2022_V2.pdf)



# Beteiligte Expertinnen und Experten

**Josef Bayer**

Head of Research & Development Energy Systems  
Firmengruppe Max Bögl

**Alexander Bogensperger**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.

**Lydia Bühler**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

**Prof. Dr. Frank Döpfer**

Professor am Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik  
Universität Bayreuth

**Andreas Frank**

Leiter Entwicklung  
Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH

**Florian Ganz**

Geschäftsführer  
enders GmbH

**Jean-Pierre Hacquin**

Systemadministrator  
Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG

**Dr. Eva Halsch**

Projektmanagerin Technologie  
Bayern Innovativ GmbH

**Christoph Hauck**

Vorstand Technologie und Vertrieb  
Toolcraft AG

**Prof. Dr. Frieder Heieck**

Professor an der Fakultät Maschinenbau  
Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten

**Markus Heigele**

Key Account Manager  
Alois Müller GmbH

**Michael Hetzer**

Beiratsvorsitzender  
Elobau GmbH & Co. KG

## | VISION: 2045

**Dr. Roland Hofer**

Experte Energieeffizienz  
Bayernwerk AG

**Anna Hopf**

Supply Chain Planner & Ramp-Up Manager  
Infineon Technologies AG

**Florian Huber**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Maschinenbau  
Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten

**Benjamin Hufnagel**

Associate Partner Energiewirtschaft  
Rödl & Partner

**Florian Karg**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

**Dr. Thomas Koenen**

Leitung der Task Force Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit  
Plattform Industrie 4.0

**Jürgen Mangelberger**

Geschäftsführer  
Mangelberger Elektrotechnik GmbH

**Philip Mangelberger**

Geschäftsführer  
Mangelberger Elektrotechnik GmbH

**Stefanie Marzocca**

Assistentin der Geschäftsleitung  
CONTECH Software & Engineering GmbH

**Alfred Mayr**

Geschäftsführer  
Trägerverein Umwelttechnologie-Cluster Bayern e. V.

**Christian Müller**

Quality Manager APQP  
Alfmeier Präzision SE

**Michael Müller**

Bereichsleiter Engineering  
Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH

**Emil Nigl**

Product Sales Manager  
GROB-WERKE GmbH & Co. KG

## | VISION: 2045

**Anselm Pfitzmaier**

Geschäftsführer  
schwaben netz GmbH

**Prof. Dr. Peter Post**

Leitung der Task Force Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit  
Plattform Industrie 4.0

**Bernhard Reichle**

SVP of Sales Digital Industries  
Siemens AG

**Michael Roggenkamp**

Vertriebsleiter Smart Infrastructure  
Siemens AG

**Alena Rückert**

Entwicklungsingenieurin  
Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH

**Prof. Dr. Joachim Schenk**

Professor an der Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik  
Hochschule München

**Dr. Peter Schley**

Geschäftsführer  
SmartSim GmbH

**Dr. Ralph Schneid**

Product Management and Sales Support  
Steinecker GmbH

**Dr. Tassilo Schuster**

Senior Researcher  
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

**Stefan Seyfried**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Technische Universität Darmstadt

**Dr. Georg Stegshuster**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH

**Frank Thurner**

Geschäftsführer  
CONTECH Software & Engineering GmbH

**Wei Min Wang**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

| VISION: 2045

# Abbildungsverzeichnis

AdobeStock@Marcos OsorioStocksy

AdobeStock@Віталій Баріда

AdobeStock@Olga Rai

AdobeStock@Simple Line

AdobeStock@LuckyStep

AdobeStock@Lifeking



# Projektteam

Die vorliegende Studie wurde in einem interdisziplinären Team aus den Bereichen Digitalisierung, Energie, Material & Produktion und Technologie- und Innovationsmanagement bei Bayern Innovativ erarbeitet:



**Anja Birke**



**Tina Johnscher**



**Dr. Maximilian Bock**



**Dr. Tanja Jovanovic**



**Leonard Höcht**



**Kathrin Singer**



**Maximilian Irlbeck**



**Christopher Ziegler**

Die Bayern Innovativ GmbH ist seit ihrer Gründung im Jahr 1995 wichtiger Bestandteil der Innovationspolitik des Freistaats Bayern. Vision der Bayern Innovativ GmbH ist ein Bayern, in dem jede tragfähige Idee und Technologie zur Innovation wird.

Neben der Organisation von Netzwerken in fünf Spezialisierungsfeldern – Digitalisierung, Energie, Gesundheit, Material & Produktion und Mobilität – bietet Bayern Innovativ seinen Kundinnen und Kunden ein umfangreiches Beratungsangebot. Dieses umfasst Dienstleistungen für ein erfolgreiches Technologie- und Innovationsmanagement, zum Patentwesen, zu Fragen der Kultur- und Kreativwirtschaft, zur Teilnahme an internationalen Innovations- und Kooperationsprojekten und zur Projektförderung.

Bayern Innovativ ist Projektträger mehrerer bayerischer Förderprogramme und navigiert als Förderlotse zu weiteren Förderprogrammen des Freistaats Bayern, des Bundes und der EU.

Für einen optimalen Wissenstransfer organisiert Bayern Innovativ hochkarätige Kongresse, Arbeitskreise, Workshops, Coachings und weitere Events. Der „Gemeinschaftsstand Bayern Innovativ“ öffnet Unternehmen und Forschungseinrichtungen kostengünstig das Tor zu internationalen Leitmesse.

Im Fokus unserer Aktivitäten stehen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und Start-ups.

[www.bayern-innovativ.de](http://www.bayern-innovativ.de)