

Die bayerische Wirtschaft

# Studie

vbw

## Klima 2030. Nachhaltige Innovationen.

Eine Studie im Auftrag der  
vbw – Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V.,  
erstellt von Prognos mit Beiträgen von EconSight, GWS und TwinEconomics

Stand Dezember 2020

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

# Klima 2030. Nachhaltige Innovationen.

Eine Studie im Auftrag der  
vbw – Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V.,  
erstellt von Prognos mit Beiträgen von EconSight, GWS und TwinEconomics

## Vorwort



Seit seiner Gründung befasst sich der Zukunftsrat mit den großen technologischen Trends, die Wirtschaft und Gesellschaft in den nächsten Jahren prägen. Wir lassen die Entwicklung in Studien analysieren und leiten daraus konkrete Handlungsempfehlungen ab. Dieses Mal aber haben wir mit der Herausforderung begonnen und Lösungen dafür gesucht.

Der Klimaschutz ist eine der zentralen Menschheitsaufgaben des Jahrhunderts. Klimawandel trifft uns alle. Deshalb müssen wir uns auch alle unserer Verantwortung für den Klimaschutz bewusst sein. Die Ziele – derzeit auf vielen Ebenen Klimaneutralität bis 2050 – sind das eine. Entscheidend ist aber aus Sicht des Zukunftsrats die Frage, wie wir auch den Weg dahin so gestalten können, dass wir die Grundlagen unseres Wohlstands und sozialen Frieden nachhaltig sichern. Um diese Diskussion im Zukunftsrat intensiv und fundiert führen zu können, hat die vbw als Grundlage die vorliegende Studie erstellen lassen.

Der Beitrag Deutschlands an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt bei zwei Prozent. Etwa ein Zehntel davon entfällt auf Bayern. Damit ist klar: Klimaschutz ist eine globale Aufgabe, und wir allein können den Klimawandel durch vorbildliche Zielerfüllung nicht aufhalten. Welchen Beitrag können wir also in Bayern und aus Bayern heraus dazu leisten?

Die Studie analysiert, wie unsere Handlungsmöglichkeiten aussehen und welchen Beitrag sie zum Klimaschutz leisten können. Dabei wird schnell deutlich: Um die globale Erwärmung auf mindestens unter 2 Grad Celsius, besser 1,5 Grad Celsius zu halten, müssen neben Ansätzen wie Verhaltensänderungen zwingend auch technologische Lösungen hinzugezogen werden. Diese reichen von Technologien im Bereich der Erneuerbaren Energien und zur Minderung des Energiebedarfs bis hin zum Einsatz von Negativ-Emissionstechnologien. Sie haben nicht nur das Potenzial, der Klimaerwärmung entgegenzuwirken, sondern eröffnen für unseren Standort auch neue Export- und Wachstumsmöglichkeiten.

Klimaschutz lohnt sich für unsere Unternehmen. Die Entwicklung und ambitionierte Anwendung von Klimaschutztechnologien erschließen neue Märkte und sichern die angestammten. Sie setzen Innovationskräfte frei und führen

zu einem Effizienz- und Modernisierungsschub, der unsere Wettbewerbsfähigkeit weiter stärkt. Dies gelingt umso wirkungsvoller und kostengünstiger, je mehr Länder sich am Klimaschutz beteiligen und international zusammenarbeiten. Wenn es uns gelingt, Lösungen zu entwickeln, die auch wirtschaftlich so attraktiv sind, dass niemand mehr etwas anderes einsetzen möchte, können wir auch aus Bayern heraus echte Impulse für den weltweiten Klimaschutz setzen.

Richtig umgesetzt, liegt im technologischen Fortschritt auch die große Chance, die Gesellschaft mitzunehmen, da erst dieser eine Veränderung ermöglicht, ohne Einbußen bei der individuellen Lebensqualität zu verursachen. Damit neue Technologien und Innovationen ihr Potenzial im gesamtgesellschaftlichen Interesse entfalten können, gilt es, von ihrer Notwendigkeit zu überzeugen und Vorbehalte zu beseitigen.

Dazu gehört allerdings auch, dass die Wirtschaft und insbesondere die Industrie als Teil der Lösung verstanden werden, und die nationalen sowie europäischen Rahmenbedingungen ganz auf die Entfaltung der Innovationspotenziale ausgerichtet werden. Innovation statt Verzicht muss dabei unsere Botschaft lauten.

Alfred Gaffal  
01. Dezember 2020

# Inhalte im Überblick

<b>I</b>	<b>Einführung</b>	<b>8</b>
<b>II</b>	<b>Bestandsaufnahme und Faktenlage</b>	<b>13</b>
<b>01</b>	<b>Klima und Klimawandel</b>	<b>14</b>
01.1	Faktoren zur Erklärung des Klimas	14
01.2	Globale Erwärmung und Klimawandel	19
01.3	Einfluss des Menschen	21
01.4	Rückkopplungseffekte und Kippelemente im Erdsystem	26
<b>02</b>	<b>Folgen des Klimawandels</b>	<b>28</b>
02.1	Klimatische Veränderungen	28
02.2	Anstieg des Meeresspiegels und Abtauen der Eisschilde	32
02.3	Folgen des Klimawandels für ausgewählte Lebens- und Wirtschaftsbereiche	32
02.4	Kosten des Klimawandels bzw. Nichthandelns	35
<b>03</b>	<b>Treibhausgas-Emissionen</b>	<b>42</b>
03.1	Die weltweiten CO <sub>2</sub> -Emissionen im Überblick	44
03.2	Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den bedeutendsten Emittentenländern	51
03.3	Emissionen und Wohlstand	61
<b>04</b>	<b>Klimaschutzziele und -maßnahmen</b>	<b>66</b>
04.1	Klimaschutzziele in Deutschland, Europa und global	66
04.2	Erfüllung der Klimaschutzziele in Europa und Deutschland	78
04.3	Beitrag bisheriger und neuer Maßnahmen zur Erfüllung der Klimaschutzziele in Deutschland	82
<b>III</b>	<b>Handlungsoptionen</b>	<b>89</b>
<b>01</b>	<b>Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel</b>	<b>90</b>
01.1	Anpassungserfordernis	90
01.2	Staatliche Anpassungsstrategien in Deutschland und Bayern	91
01.3	Anpassungsoptionen der Privatwirtschaft	94
<b>02</b>	<b>Verhaltens- und Konsummuster</b>	<b>96</b>
02.1	Wohnen und Gebäude	97
02.2	Verkehr	98
02.3	Landwirtschaft und Ernährung	99
02.4	Gebrauchsgüter	100
02.5	Chancen und Herausforderungen	100
<b>03</b>	<b>Kreislaufwirtschaft</b>	<b>102</b>
03.1	Linearwirtschaft, Kreislaufwirtschaft und zirkuläre Wertschöpfung	102
03.2	Klimaschutzpotenziale der Kreislaufwirtschaft	103
03.3	Chancen und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft	105
03.4	Politische Zielsetzungen und Bedeutung der Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Bayern	106
<b>04</b>	<b>Zentrale Technologien für eine klimaschonende Zukunft</b>	<b>108</b>
04.1	Erneuerbare-Energien-Technologien	108
04.2	Technologien zur Minderung des Energiebedarfs und der Emissionen	118
04.3	CO <sub>2</sub> -Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung (CCU, CCS, NET)	127
04.4	Power-to-X	135
04.5	Einzelmaßnahmen: „Was wäre, wenn ...“	138
<b>05</b>	<b>Die Rolle und Schaffung von gesellschaftlicher Akzeptanz und Begeisterung</b>	<b>144</b>

<b>IV</b>	<b>Klimapolitische Szenarien</b>	<b>147</b>
<b>01</b>	<b>Überblick zu den Grundlagen und zur Ausgestaltung der Szenarien</b>	<b>148</b>
01.1	Zusammenfassung Szenario 1: „Business as Usual“ („BaU“)	153
01.2	Zusammenfassung Szenario 2: „Einheitliches Vorgehen“	154
01.3	Zusammenfassung Szenario 3: „Europa geht voran“	156
01.4	Zusammenfassung Szenario 4: „Deutschland geht voran“	158
01.5	Leitfragen	160
<b>02</b>	<b>Szenarienvergleich und Einordnung der Ergebnisse</b>	<b>162</b>
02.1	Unterschiedliche Annahmen und Inputs für die Quantifizierung	162
02.2	Ergebnisvergleich	165
02.3	Einordnung der volkswirtschaftlichen Effekte	175
<b>03</b>	<b>Fazit aus der Szenarioanalyse</b>	<b>180</b>
<b>04</b>	<b>Szenarien im Detail</b>	<b>184</b>
04.1	Szenario 1 „Business as Usual“	184
04.2	Szenario 2 „Einheitliches Vorgehen“	212
04.3	Szenario 3 „Europa geht voran“	234
04.4	Szenario 4 „Deutschland geht voran“	253
<b>V</b>	<b>Technologische Positionierung Bayerns sowie Game-Changer-Technologien</b>	<b>271</b>
<b>01</b>	<b>Positionierung Bayerns</b>	<b>272</b>
01.1	Grundlage für die Analyse	272
01.2	Clusterung der Klima-Technologien	274
01.3	Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Technologie-Clustern	277
01.4	Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Technologie-Clustern im internationalen Vergleich	287
01.5	Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Leuchtturmtechnologien	292
01.6	Die Entwicklung der Digitalisierung in den Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien	296
01.7	„Klima-Innovationsbranche“ Bayern	311
<b>02</b>	<b>Game-Changer-Technologien</b>	<b>314</b>
02.1	Sektorübergreifende Game Changer	315
02.2	Sektorspezifische Game Changer	318
<b>VI</b>	<b>Synthese und Fazit</b>	<b>325</b>
	Synthese und Fazit	326

<b>Anhang Bedeutung der zehn Zukunftsfelder für Klimaschutz und -anpassung</b>	<b>335</b>
– Zukunftsfeld IKT und Digitalisierung	338
– Zukunftsfeld Neue Werkstoffe und Materialien	340
– Zukunftsfeld Nanotechnologien	342
– Zukunftsfeld Biotechnologien	344
– Zukunftsfeld Intelligente Verkehrssysteme (IVS) und zukünftige Mobilität	346
– Zukunftsfeld Energiesysteme und Energie(system)technologien	348
– Zukunftsfeld Industrielle Produktionstechnologien	350
– Zukunftsfeld Gesundheitswesen und Medizintechnologien	352
– Zukunftsfeld Ernährung und Lebensmitteltechnologien	353
– Zukunftsfeld Luft- und Raumfahrttechnologien	354
 Technologiedefinitionen	 355
 Literaturverzeichnis	 364
Abbildungsverzeichnis	381
Tabellenverzeichnis	390
Kastenverzeichnis	392
Ansprechpartner / Impressum	397



## Einführung

Hintergrund, Relevanz und Zielsetzung der Studie

## Einführung

**Der Klimawandel schreitet immer schneller voran, verursacht erhebliche Kosten und ist für einzelne Individuen zunehmend spürbar. Deutschland und Bayern können als Technologieproduzenten und Multiplikatoren zeigen, dass die erforderliche Transformation auch Chancen bietet und erfolgreich sein kann.**

### Klimawandel und Klimaschutz

Die Studie hat den Themenkomplex Klimawandel und Klimaschutz zum Gegenstand. Im Mittelpunkt steht die Analyse der Potenziale, Chancen und Herausforderungen für die deutsche und bayerische Wirtschaft, die sich aus der Transformation hin zur Klimaneutralität auf unterschiedlichen Technologiegebieten ergeben. Dabei wird mithilfe von Szenarien berücksichtigt, dass das Ausmaß an globaler Kooperation beim Klimaschutz ungewiss ist und folglich unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann. Das übergeordnete Ziel der Studie ist es aufzuzeigen, in welchen Bereichen zentrale Handlungsoptionen und -notwendigkeiten bestehen, wie Bayern in diesen Bereichen aufgestellt ist und inwiefern die bayerische Wirtschaft einen positiven Beitrag zum Klimaschutz leisten und zugleich von der Transformation profitieren kann. Damit stehen Nachhaltigkeitsaspekte mit Bezug zu Ökologie und Ökonomie im Zentrum der Studie. Auf gesellschaftlichen Fragen, wie Akzeptanz bzw. Begeisterung für bestimmte Technologien, liegt zwar kein Fokus, sie sind aber ein wichtiger und notwendiger Baustein in der Gesamtbetrachtung.<sup>1</sup>

### Faktenlage Klimawandel

Die Faktenlage zum Klimawandel und zum Einfluss des Menschen ist eindeutig. Sie zeigt sich in dem Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen, der Erwärmung der Atmosphäre und Ozeane, der Abnahme der Schnee- und Eismengen, dem Anstieg des globalen Meeresspiegels sowie der Zunahme einiger Wetter- und Klimaextreme. Viele der beobachteten Veränderungen sind in den zurückliegenden Jahrzehnten in einem Tempo aufgetreten, das in den nachgewiesenen natürlichen Klimaveränderungen in den letzten Jahrtausenden bei Weitem nicht auftrat.<sup>2</sup>

### Folgen des Klimawandels

Noch vollziehen sich die Folgen des Klimawandels eher auf einer globalen Skala und bleiben von den einzelnen Menschen weitgehend unbemerkt. In Zukunft werden die Folgen des Klimawandels aber weit über die klimatischen Veränderungen hinausgehen und alle möglichen Lebens- und Arbeitsbereiche betreffen – von der menschlichen Gesundheit und der Umwelt über die Realwirtschaft und den Finanzmarkt bis hin zur Bedrohung von Biodiversität, Ökosystemdienstleistungen und Ökosystemen sowie klimabedingter Migration und Wasserknappheit. Damit verursachen die Folgen in zunehmendem Maße erhebliche Kosten in Form von Risiken, Schäden und Anpassungsmaßnahmen und werden auch für einzelne Individuen spürbar.

### Individuelles und gesellschaftliches Wohlergehen

Beim Klimaschutz geht es letztlich um das individuelle und gesellschaftliche Wohlergehen – um die Aufrechterhaltung der Lebensgrundlagen und Entwicklungsmöglichkeiten für alle Menschen und Länder in den uns bekannten Formen. Dementsprechend steht Klimapolitik im engen Zusammenhang mit den globalen Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDG) der Vereinten Nationen (UN), bei denen der Mensch im Mittelpunkt steht. Trotz der Bedrohungen durch den Klimawandel und der Dringlichkeit des Themas darf nicht übersehen werden, dass sich die Lage in sehr vielen Lebensbereichen in den letzten Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten weltweit deutlich verbessert hat (Kasten 1).

<sup>1</sup> Für Akzeptanzfragen siehe z. B. vbw / Prognos, 2019

<sup>2</sup> IPCC, 2014.

### Kasten 1

#### Verbesserung der weltweiten Lage in vielen Bereichen

In den letzten Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten hat sich die weltweite Lage bereits in vielen Lebensbereichen deutlich verbessert. Die positiven Entwicklungen betreffen dabei auch einige große Herausforderungen unserer Zeit, wie Armut, Hunger, Krankheit und Gewalt:

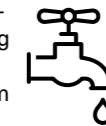
**-50 %**

Seit 1990 hat sich die Anzahl der Menschen in extremer Armut sowie die Kindersterblichkeit halbiert.



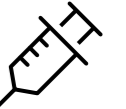
**+15 %**

stieg der Anteil der Menschen in der Bevölkerung die Zugang zu sanitären Einrichtungen, sauberem Trinkwasser und Elektrizität haben.



**85 %**

beträgt der weltweite Anteil der Menschen, die heute gegen Tetanus, Diphtherie und Keuchhusten geimpft sind.



**180 Mio.**

So viele Menschen leiden heute weniger an Unterernährung als 1991, als es ca. eine Mrd. Menschen waren.



**> 70 Jahre**

beträgt die Lebenserwartung heute im weltweiten Durchschnitt. Im 19. Jahrhundert lag diese noch bei unter 40 Jahren.



**95 %**

beträgt der Alphabetisierungsgrad der Weltbevölkerung 2016 im Vergleich zu 21 % im Jahr 1900.<sup>3</sup>



Die Fakten zum Fortschritt werden jedoch häufig nur verzerrt wahrgenommen, sodass die Lage schlechter eingeschätzt wird, als sie in Realität ist. Dies liegt u. a. daran, dass häufig ein Bild der Lage vorherrscht, das einige Jahrzehnte alt ist. Gründe für die verbreiteten Fehleinschätzungen zur tatsächlichen globalen Situation werden u. a. in der Funktionsweise unseres Gehirns gesehen, bspw. im Instinkt der Negativität, der dazu führt, dass Negatives aufmerksamer wahrgenommen wird als Gutes. Auch die Medien können eine Rolle spielen, da sie eher über große (negative) Veränderungen (z. B. Krisen, Katastrophen) als über graduelle (positive) Verbesserungen berichten.<sup>4</sup>

### Corona-Krise

Die Corona-Krise ändert nichts an der Dringlichkeit des Themas. Vielmehr führt die Pandemie vor Augen, welche Auswirkungen eine schnelle Verbreitung bisher unbekannter oder vernachlässigter Krankheiten haben kann. Zudem zeigt die Krise, dass große Teile der Gesellschaft offensichtlich bereit sind, enorme – monetäre und nicht monetäre – Kosten auf sich zu nehmen, wenn potenzielle Schäden und Risiken sofort sichtbar werden. Bei zukünftigen oder stark unsicheren Kosten ist die Bereitschaft dagegen deutlich weniger ausgeprägt. Daher ist die Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen, wenn immer möglich, auf Basis der Folgen des Klimawandels für einzelne Individuen konkret aufzuzeigen. Darüber hinaus bietet die Corona-Krise die Chance, den Umbau der Wirtschaft schneller voranzutreiben, wenn Teile der milliardenschweren Corona-Hilfspakete in klimaschutzfreundliche Investitionen und Innovationen geleitet werden.

<sup>3</sup> Vanderslott et al., 2020; Roser et al., 2020a, 2020b; Roser und Ortiz-Ospina, 2020; Ritchie und Roser, 2020a, 2020b, 2020c; Ritchie et al., 2018.

<sup>4</sup> Rosling et al., 2018.

### Deutschland und Bayern

Diese gelten dabei als besonders vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels, weniger, aber auch aufgrund ihrer direkten Exposition gegenüber den klimatischen Veränderungen (z.B. Zunahme von Extremwetterereignissen) als vielmehr aufgrund ihrer starken globalen Verflechtungen, entlang derer sich die Auswirkungen klimabedingter Veränderungen, die anderenorts auftreten, fortpflanzen können (z.B. Störungen in den Handels- und Lieferketten). Die Vulnerabilität kann die Resilienz<sup>5</sup> der deutschen Volkswirtschaft beeinträchtigen. Mit staatlichen und unternehmerischen Maßnahmen kann hier gegengesteuert werden.

### Erderwärmung unter 2 Grad C

Um die Folgen des Klimawandels in einem voraussichtlich beherrschbaren Bereich zu halten, sind die weltweiten Emissionen auf ein Maß zu reduzieren, das die globale Erderwärmung unter zwei Grad C, besser unter 1,5 Grad C hält. Die einzig realistische und im Zeitraum weniger Jahrzehnte umsetzbare Möglichkeit, um dies zu erreichen, ist der Einsatz von geeigneten Technologien. Daneben können Veränderungen in den Verhaltens- und Konsummustern sowie der Kreislaufwirtschaft bzw. zirkulären Wertschöpfung einen (geringeren) Beitrag leisten. Auch hierbei sind Technologien von zentraler Bedeutung, da diese oftmals erst eine gesellschaftliche Veränderung ohne Einschränkung der individuellen Zufriedenheit und Lebensqualität ermöglichen.

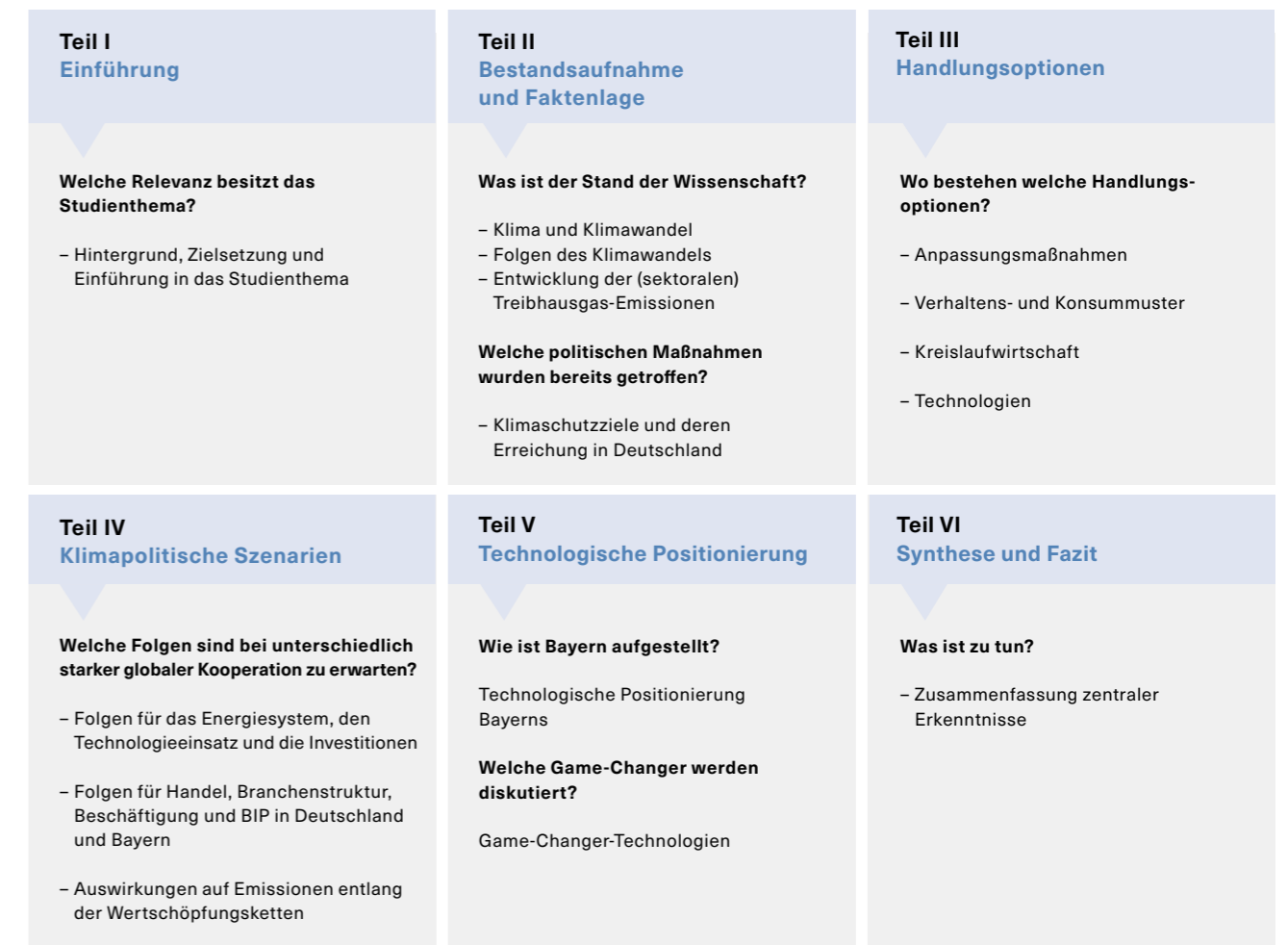
### Vorbildrolle Deutschland und Bayern

Mit einem Anteil an den weltweiten Treibhausgas-Emissionen von unter 2 Prozent sind die Möglichkeiten Deutschlands, den Klimawandel durch alleinige Reduktion der eigenen Treibhausgas-Emissionen spürbar zu beeinflussen, gering. Deutschland und Bayern können jedoch die Rolle eines Vorbildes und Multiplikators einnehmen, wenn es gelingt zu zeigen, dass die Verfolgung und Erfüllung ambitionierter Klimaschutzziele – ohne gesellschaftliche Verwerfungen – technisch und wirtschaftlich möglich sind. Dies umfasst u. a. die Möglichkeit Deutschlands und Bayerns, technische Lösungen zur Treibhausgas-Reduktion zu verbessern oder neue zu entwickeln und diese international zu vermarkten. Dadurch können Nachahmer motiviert werden, ihre Treibhausgas-Emissionen ebenfalls zu reduzieren bzw. sich internationalen Klimaschutzvereinbarungen anzuschließen.<sup>6</sup> Zudem könnten Deutschland und Bayern für den Klimaschutz (und die Anpassung an den Klimawandel) relevante Technologiefelder besetzen und sich neue Schlüsselkompetenzen erschließen, die bei fortschreitendem Klimawandel neue Export- und Wachstumsmöglichkeiten eröffnen.

### Aufbau und Struktur der Studie

Die Studie ist in fünf große Teile mit mehreren Unterkapiteln gegliedert (Abbildung 1). In Teil 2 wird der Stand der Wissenschaft zum Themakomplex Klima(-wandel), Treibhausgas-Emissionen und Klimaschutz(-maßnahmen) faktenbasiert dargelegt. Auf dieser Grundlage erfolgt in Teil 3 eine detaillierte Darstellung der zentralen Handlungsoptionen in den Bereichen Anpassung, Verhalten und Konsum, Kreislaufwirtschaft und Technologien. Aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der künftigen Rahmenbedingungen wird in Teil 4 anhand von Szenarien untersucht, wie sich unterschiedlich starke globale Kooperation beim Klimaschutz auf Technologieeinsatz, erreichbare Emissionsreduktionen (und damit verbundenen Temperaturregimes) sowie volkswirtschaftliche Veränderungen in Deutschland und auf Bayern auswirken. Darauf aufbauend zeigt Teil 5 die Positionierung Bayerns bei zentralen Klimaschutztechnologien sowie mögliche Game-Changer-Technologien. Teil 6 fasst die zentralen Erkenntnisse zusammen.

Abbildung 1  
Aufbau und Struktur der Studie



Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

<sup>5</sup> Resilienz bezeichnet nicht das Streben nach Autarkie oder Renationalisierung, sondern „die Fähigkeit, tatsächliche oder potenziell widrige Ereignisse einzukalkulieren, sich darauf vorzubereiten, sie abzuwehren oder sie zu verkraften, sich davon zu erholen, aus den Erfahrungen zu lernen, sich anzupassen und sich deshalb immer erfolgreicher aufzustellen“ (Zukunftsrat der Bayerischen Wirtschaft, 2020: 3)

<sup>6</sup> Die Wirksamkeit globaler Vereinbarungen im Bereich Umweltschutz zeigt sich bspw. in dem weltweiten Verbot von Fluorkohlenwasserstoffen (FCKW), das zu einem Rückgang des Ozonlochs geführt hat.



## Bestandsaufnahme und Faktenlage

Die faktenbasierte Aufbereitung des Stands der Wissenschaft zum Thema Klima, Klimawandel und Treibhausgas-Emissionen sowie die Darstellung der politischen Klimaschutzziele, der bereits getroffenen Klimaschutzmaßnahmen und der bisherigen Zielerreichung bilden die Grundlage der Studie – insbesondere mit Blick auf die Analyse der Handlungsoptionen im nächsten Studienteil.

### Kapitel in der Übersicht

01	Klima und Klimawandel	14
01.1	Faktoren zur Erklärung des Klimas	14
01.2	Globale Erwärmung und Klimawandel	19
01.3	Einfluss des Menschen	21
01.4	Rückkopplungseffekte und Kippelemente im Erdsystem	26
02	Folgen des Klimawandels	28
02.1	Zunahme von Extremwetterereignissen	28
02.2	Anstieg des Meeresspiegels und Abtauen der Eisschilde	32
02.3	Folgen des Klimawandels für ausgewählte Lebens- und Wirtschaftsbereiche	32
02.4	Kosten des Klimawandels bzw. Nichthandelns	35
03	Treibhausgas-Emissionen	42
03.1	Die weltweiten CO <sub>2</sub> -Emissionen im Überblick	44
03.2	Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den bedeutendsten Emittentenländern	51
03.3	Emissionen und Wohlstand	61
04	Klimaschutzziele und -maßnahmen	66
04.1	Klimaschutzziele in Deutschland, Europa und global	66
04.2	Erfüllung der Klimaschutzziele in Europa und Deutschland	78
04.3	Beitrag bisheriger und neuer Maßnahmen zur Erfüllung der Klimaschutzziele in Deutschland	82



# 01 Klima und Klimawandel

## Die Fakten zeigen eindeutig: Das Klima erwärmt sich infolge menschengemachter Emissionen.

### Inhalte

01.1	Faktoren zur Erklärung des Klimas	14
01.2	Globale Erwärmung und Klimawandel	19
01.3	Einfluss des Menschen	21
01.4	Rückkopplungseffekte und Kippelemente im Erdsystem	26

### 01.1 Faktoren zur Erklärung des Klimas

#### Wetter und Klima(-wandel)

Für das Verständnis des Klimawandels ist es wichtig, die zentralen Einflussfaktoren für das Klimasystem der Erde zu kennen. Zudem ist die – im Alltag oft vernachlässigte – Unterscheidung zwischen Klima und Wetter bedeutsam. Während das Wetter kurzfristige Veränderungen des atmosphärischen Zustands beschreibt, charakterisiert das Klima das durchschnittliche Wetter über einen langen Zeitraum (i. d. R. 30 Jahre) und über alle Regionen sowie typische regionale, globale und zeitliche „Wettermuster“. Das Klima ist nicht direkt messbar, sondern beruht auf vielen Einzelmessungen in räumlicher Auflösung und über die Zeit und verändert sich – verglichen mit Wetterveränderungen – sehr langsam. Ein kurzfristiges Absinken der Temperatur (Wetter) um z. B. 5 Grad C ist keine Besonderheit, beim Klima würde eine solche Veränderung die „Rückkehr“ zur letzten Eiszeit bedeuten.<sup>7</sup> Die Veränderung des globalen Klimas (z. B. Abkühlung, Erwärmung) wird als Klimawandel bezeichnet. In der vorliegenden Studie beschreibt Klimawandel die beobachtete globale Erwärmung des Klimasystems.

Das Klima wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren bestimmt. Unterscheiden lassen sich Faktoren, die innerhalb des Klimasystems liegen, und solche, die außerhalb liegen. Im Folgenden werden die wesentlichen Faktoren kurz dargestellt. Bei Betrachtung der Vielzahl von Einflussfaktoren darf nicht übersehen werden, dass Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) die mit Abstand relevan-

testen Treibhausgase und damit Haupttreiber des Klimawandels sind.

#### Interne Einflussfaktoren des Klimasystems

Die internen Faktoren umfassen u. a. Schwankungen in der Zirkulation der Atmosphäre und in dem ozeanischen Strömungssystem (thermohaline Zirkulation bzw. globales Förderband). Sie bewirken die natürliche Variabilität des Klimasystems der Erde, die durch komplexe, wechselwirkende Faktoren sowie Rückkopplungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Landoberfläche entsteht. Diese Prozesse verlaufen (zumindest teilweise) chaotisch und nichtlinear und sind kaum präzise vorhersagbar.

#### Externe Einflussfaktoren des Klimasystems

Die externen Faktoren wirken von außen auf das Klimasystem und können natürliche oder anthropogene Ursachen haben. Zu den natürlichen externen Faktoren zählen bspw. plattentektonische Prozesse, Variationen der Erdumlaufbahnparameter oder der Neigung der Erdachse ebenso wie Meteoriteneinschläge, Vulkanismus und Schwankungen in der Sonnenaktivität. Diese Faktoren wirken meistens auf langen Zeitskalen (z. B. Schwankungen der Erdbahnparameter gemäß der Milanković-Zyklen mit einer Dauer von etwa 20.000 bis 400.000 Jahren) oder treten episodisch auf (z. B. Meteoriteneinschläge, Vulkanausbrüche). Diese Faktoren können zu starken Veränderungen des Klimas führen und werden mitunter als Ursache für Eiszeiten und Warmzeiten gesehen.<sup>8</sup>

Die anthropogenen externen Faktoren wirken in den meisten Fällen auf deutlich kürzeren Zeitskalen (oftmals Jahre bis Jahrzehnte). Sie umfassen bspw. Veränderungen der Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre oder Veränderungen der Erdoberfläche infolge geänderter Landnutzung. Diese Faktoren stehen im Zentrum der wissenschaftlichen Untersuchung des Klimawandels. Ihre Wirkung auf das globale Klima bzw. die Erderwärmung entfalten die anthropogenen Faktoren im Wesentlichen durch Veränderungen der Energieflüsse innerhalb der Atmosphäre. Die Energiebilanz der Erde ist deshalb von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Wirkungsweise dieser Faktoren und der politischen Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels.

<sup>7</sup> Nelles und Serrer, 2018.

<sup>8</sup> Deutscher Bundestag, 2017.

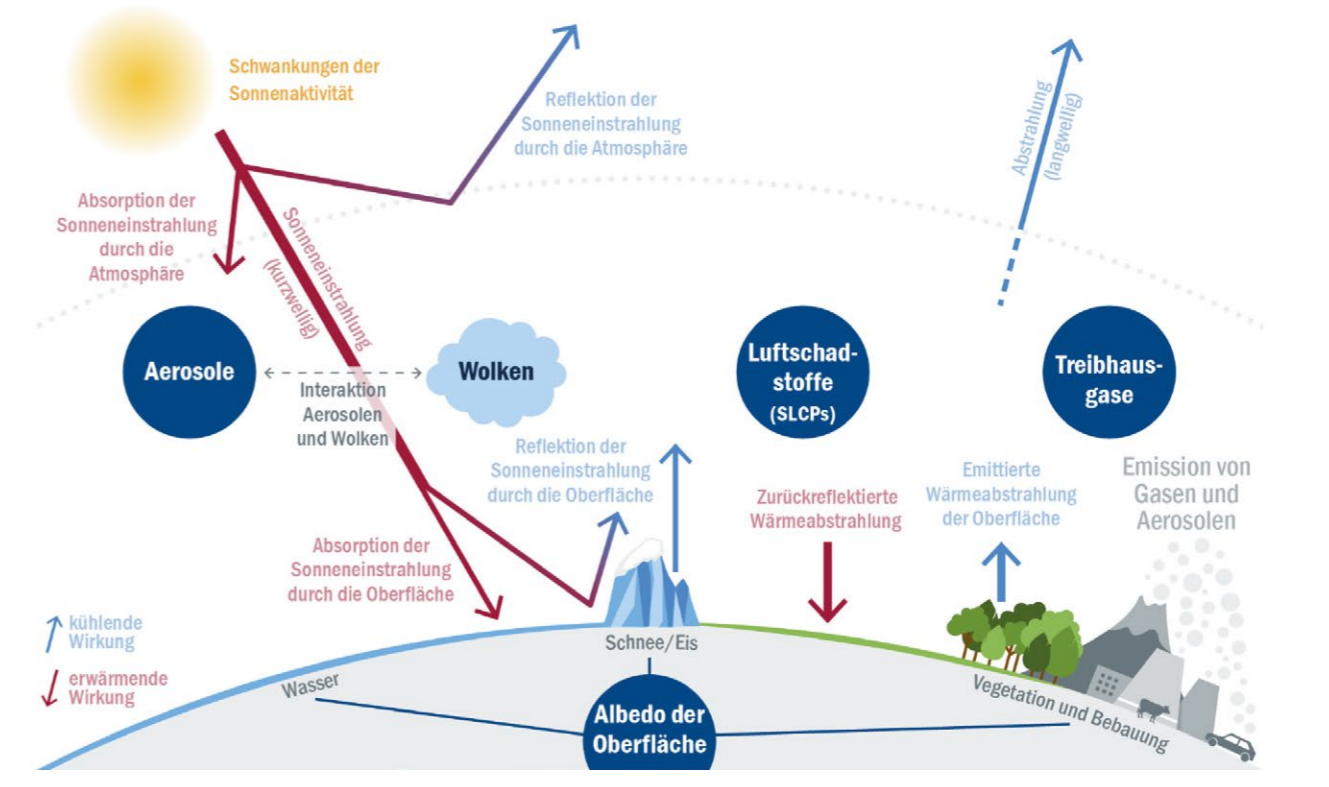
#### Energiebilanz der Erde

Die Energiebilanz der Erde ergibt sich aus dem Energiezufluss infolge der (kurzwelligigen) Sonneneinstrahlung aus dem Weltraum und dem Energieabfluss infolge der (langwelligigen) Wärmeabstrahlung in den Weltraum. Bereits kleine Veränderungen der Energiebilanz können über einen längeren Zeitraum hinweg größere Ungleichgewichte auslösen. Grundsätzlich gilt:

- Erderwärmung, wenn Energiezufluss > Energieabfluss
- Erdabkühlung, wenn Energiezufluss < Energieabfluss
- Klimakonstanz, wenn Energiezufluss = Energieabfluss (ausgeglichene Energiebilanz)

Innerhalb der Atmosphäre werden die Energieflüsse u. a. von der Albedo (Reflektivität – Anteil der zurückreflektierten Sonnenstrahlung), der Konzentration von Treibhausgasen, kurzlebigen Luftschadstoffen und Aerosolen sowie deren Wechselwirkung mit den Wolken bestimmt (Abbildung 2). Der Mensch beeinflusst alle drei Faktoren. Bspw. werden durch die (unvollständige) Verbrennung<sup>9</sup> fossiler Brennstoffe Treibhausgase und Aerosole emittiert oder die Albedo wird durch die Veränderung der Landnutzung verändert. Im Folgenden werden die einzelnen Faktoren und ihre Wirkung kurz dargestellt, wobei Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) die mit Abstand relevantesten Treibhausgase und Haupttreiber des Klimawandels sind.

Abbildung 2  
Energiebilanz der Erde mit Interaktionen innerhalb der Atmosphäre



Quelle: Vereinfachte schematische Darstellung, basierend auf IPCC, 2013; eigene Darstellung Prognos, 2020

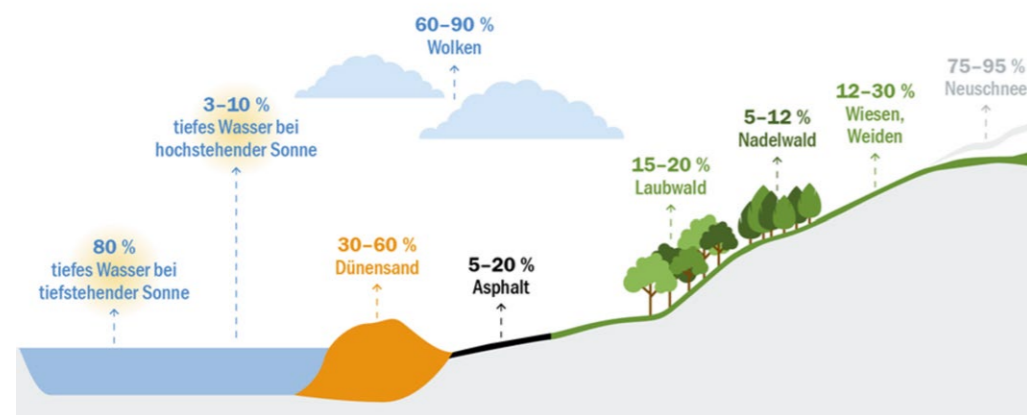
<sup>9</sup> Bei der vollständigen Verbrennung von Brennstoffen (Kohlenwasserstoffen) entsteht im Wesentlichen CO<sub>2</sub> und Wasser. Ist der Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft nicht ausreichend (oder nicht ausreichend durchmischt) befinden sich in dem Reaktionsgemisch neben CO<sub>2</sub> und Wasser noch Ausgangsstoffe (Kohlenwasserstoff) oder nicht vollständig oxidierte Bestandteile (z. B. Kohlenmonoxid).

### Landnutzung und Veränderung der Albedo

Die Albedo misst den Anteil an Sonnenstrahlung, den ein Körper nicht absorbiert, sondern zurückstrahlt und der nicht zur Erwärmung des Körpers führt. Je höher das Rückstrahlvermögen (Reflektivität) eines Körpers ist, desto höher ist seine Albedo, d. h., er nimmt weniger Energie auf und gibt damit auch weniger Energie an die Umgebung ab. Eine höhere Albedo führt zu einer geringen Erwärmung. Vereinfacht ausgedrückt haben hellere Körper eine höhere Reflektivität und damit eine größere Albedo; bspw. wärmt sich helle Kleidung bei Sonneneinstrahlung langsamer auf als dunkle Kleidung. Allerdings ist die Albedo nicht nur von der Helligkeit des Körpers, sondern auch von diversen anderen Faktoren wie bspw. Oberflächeneigenschaften abhängig, sodass das Rückstrahlvermögen von Oberflächen nur näherungsweise und nur in Bandbreiten bestimmt werden kann (Abbildung 3). Einen wesentlichen Einflussfaktor bildet bspw. der Einfallswinkel der Strahlung, was insbesondere bei Wasser eine große Bandbreite möglicher Rückstrahlvermögen bewirkt.

Die mittlere Albedo der Erde beträgt 0,3, d. h. 30 Prozent der Sonneneinstrahlung werden von der Erde reflektiert, wodurch die Albedo eine ansonsten deutlich stärkere Erwärmung verhindert.<sup>10</sup> Veränderungen der (Helligkeit der) Landoberfläche (z. B. infolge von Rodungen oder Schnee- und Eisschmelze, Rußablagerungen) können die Albedo und damit die Energiebilanz der Erde und das Klima verändern. Das Gleiche gilt für Veränderungen der Helligkeit von Wolken (bspw. durch Aerosole). Zudem können Veränderungen der Albedo Rückkopplungseffekte entfalten. Wenn bspw. Meereis schmilzt und zu Wasser wird, welches weniger Strahlung reflektiert als die ursprüngliche Eisfläche, erwärmt sich die Erde in der Folge. Dadurch schmilzt noch mehr Meereis und die entstehenden und im Schnitt schlechter reflektierenden Wasserflächen vergrößern sich weiter.

Abbildung 3  
Schematische Darstellung der Albedo-Wirkung



Ausgewählte Albedo-Richtwerte für kurzwellige Einstrahlung

Quelle: Spektrum, 2001; Kraus, 2004; eigene Darstellung Prognos, 2020

### Natürlicher Treibhauseffekt

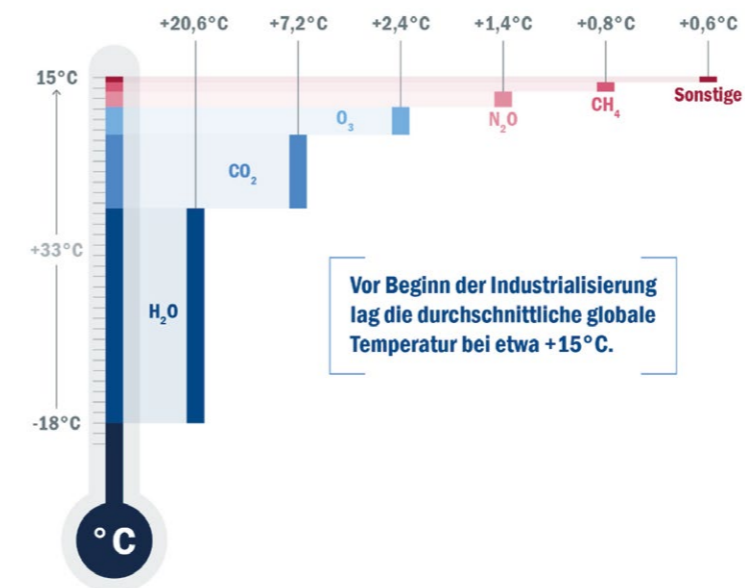
Treibhausgas spielen bei der Klimaveränderung eine bedeutende Rolle. Sie lassen von der kurzwelligen Strahlung der Sonne mehr Energie Richtung Erde durch als von der ausgehenden langwelligen Wärmeenergieabstrahlung der Erde Richtung Weltraum. Ein Teil der Wärmeabstrahlung wird also von den Treibhausgasen absorbiert, verbleibt zum

großen Teil in der Atmosphäre und wärmt diese auf. Dieser Treibhauseffekt wird einerseits durch natürlich in der Atmosphäre vorkommende Treibhausgas ausgelöst (natürlicher Treibhauseffekt). Andererseits verursachen zusätzlich durch menschliche Aktivitäten in die Atmosphäre eingebrachte Treibhausgas den anthropogenen Treibhauseffekt.

<sup>10</sup> Spektrum, 2001.

Der natürliche Treibhauseffekt ermöglicht das Leben auf der Erde, denn ohne die natürlichen Vorkommen an Treibhausgasen (primär Wasserdampf  $H_2O$ , Ozon  $O_3$ , Kohlenstoffdioxid  $CO_2$ , Methan  $CH_4$  und Lachgas  $N_2O$ ) läge die durchschnittliche Oberflächentemperatur bei rund  $-18$  Grad C statt bei ca.  $+15$  Grad C. Trotz ihres niedrigen Anteils in der Atmosphäre bewirken die natürlichen Treibhausgas eine Erwärmung der Erde um rund  $33$  Grad C. Den größten Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt leistet Wasserdampf mit  $+20,6$  Grad C, gefolgt von  $CO_2$  mit  $+7,2$  Grad C (Abbildung 4).<sup>11</sup> Infolge ihrer hohen Klimawirksamkeit können bereits geringe Veränderungen der Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre zu Veränderungen des Klimas führen.

Abbildung 4  
Beitrag der natürlichen Treibhausgas zum natürlichen Treibhauseffekt



Quelle: Schulz et al., 2001; eigene Darstellung Prognos, 2020 (in Anlehnung an Nelles und Serrer, 2018)

### Anteil der Treibhausgas in der Atmosphäre

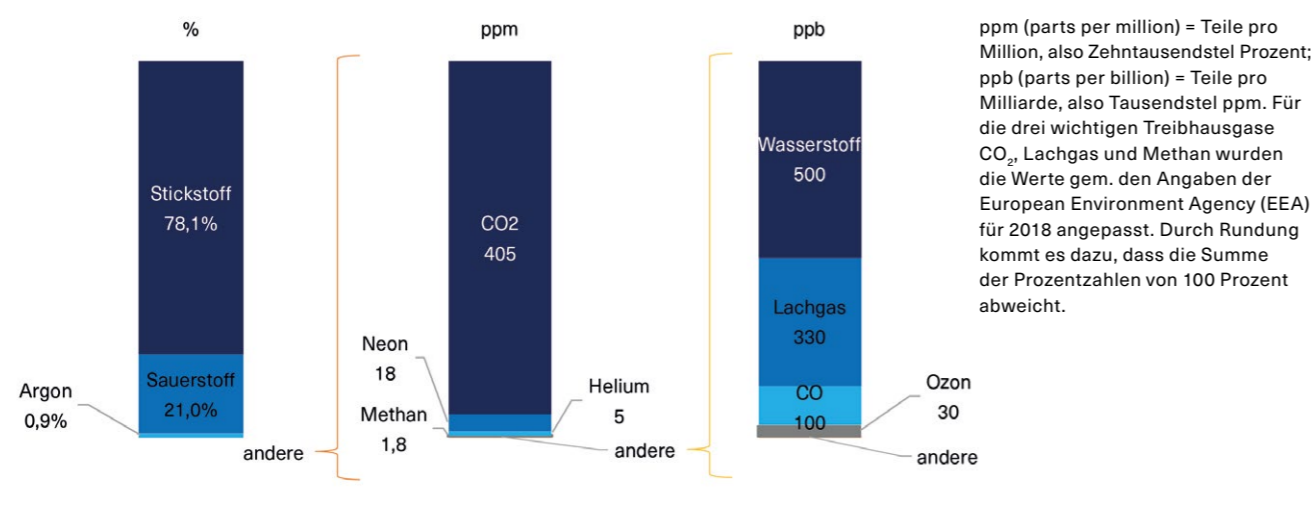
Trockene Luft in der Atmosphäre besteht zu über 99 Prozent aus den drei Gasen Stickstoff (ca. 78 Prozent), Sauerstoff (ca. 21 Prozent) und Argon (ca. 0,9 Prozent), die für die Energiebilanz der Erde nicht relevant sind (Abbildung 5). Der Anteil der Treibhausgas beträgt nur etwa 0,04 Prozent, womit die Treibhausgas zu den Spurengasen gehören. Aufgrund ihres geringen Anteils an der Luft werden die Spurengase in Teilen pro Million (parts per million, ppm), pro Milliarde (parts per billion, ppb) oder pro Billion (parts per trillion, ppt) gemessen. Durch die Emissionen von Treibhausgasen verändert sich deren Anteil in der Luft. Mit gegenwärtig rund 405 ppm (bzw. 0,0405 Prozent) hat  $CO_2$  zurzeit den größten Anteil aller Treibhausgas an der trockenen Luft in der Atmosphäre, gefolgt von Methan mit etwa 1,8 ppm und Lachgas mit etwa 0,3 ppm. Die Anteile der restlichen Treibhausgas liegen im ppb- bzw. ppt-Bereich (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide). Die Anteile dieser meist kurzlebigen Treibhausgas hängen oftmals stark von meteorologischen, geografischen und zeitlichen Bedingungen ab.<sup>12</sup> Das gilt auch für Ozon, das sich relativ schnell bildet und wieder zerfällt (20 bis 100 Stunden Halbwertszeit bei Raumtemperatur) und nur in geringem Maß zur Erwärmung des Klimas beiträgt. Methan und Lachgas haben im Vergleich Verweildauern von zwölf respektive 114 Jahren in der Atmosphäre.

<sup>11</sup> Schulz et al., 2001.

<sup>12</sup> DWD, 2020.

Ein weiteres Treibhausgas ist Wasserdampf. Dieser entsteht durch Verdunstung und kommt natürlich nur in feuchter Luft vor. Sein Anteil an der Atmosphäre unterliegt ebenfalls regional und zeitlich deutlichen Schwankungen und beträgt zwischen null und vier Prozent.<sup>13</sup> Die Konzentration von Wasserdampf kann bei konstanter Temperatur nur bis zur Sättigungsgrenze ansteigen. Der natürliche Treibhausgas-Effekt von Wasser ist daher zwar limitiert, kann allerdings durch den menschengemachten Anteil steigen – zumal sich die Sättigungsgrenze erhöht und entsprechend mehr Wasser in der Atmosphäre gelangen kann, wenn die Atmosphäre sich erwärmt.

Abbildung 5  
Zusammensetzung trockener Luft in der Atmosphäre



Quelle: DWD; EEA; eigene Darstellung Prognos, 2020

### Luftschadstoffe

Neben den Treibhausgasen beeinflussen in geringem Ausmaß kurzlebige Luftschadstoffe (Short-Lived Climateforcing Pollutants, SLCPs) die Energiebilanz der Erde. SLCPs werden als kurzlebig bezeichnet, da sie im Vergleich zu CO<sub>2</sub> nur relativ kurz in der Atmosphäre verweilen. Während CO<sub>2</sub> mehrere Hundert Jahre (bis zu einer Million Jahre)<sup>14</sup> in der Atmosphäre verbleibt, liegt die Verweildauer von SLCPs meist zwischen einigen Stunden und wenigen Jahren. Aufgrund der relativ kurzen Verweilzeit der SLCPs in der Atmosphäre wirkt sich eine Reduktion ihrer Emissionsmenge relativ schnell auf ihre Konzentration in der Atmosphäre und damit auf den Einfluss der SLCPs auf das Klima aus.<sup>15</sup>

SLCPs werden grundsätzlich in Gase und Aerosole (Schwebeteilchen bzw. -partikel bzw. Feinstaub) unterschieden. Die Gase wirken indirekt auf die Treibhausgas-Konzentration, da sie selbst keine unmittelbare Treibhauswirkung entfalten, aber die Bildung von Treibhausgasen beeinflussen. Zu diesen Gasen gehören z.B. Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Ursächlich für die Klimawirkung von Aerosolen ist u.a. ihr Einfluss auf den Anteil an Sonnenstrahlung, der zurück in den Weltraum reflektiert wird bzw. auf der Erde verbleibt. Zudem können Aerosole indirekt auf das Klima wirken, indem sie bspw. die Färbung

<sup>13</sup> Kraus, 2004.

<sup>14</sup> Die Verweildauer von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre ist schwierig zu bestimmen, da CO<sub>2</sub> nicht chemisch abgebaut wird. CO<sub>2</sub> kann daher sehr lange in der Atmosphäre verweilen, das meiste CO<sub>2</sub> wird innerhalb von wenigen hundert Jahren von den Ozeanen (zu geringeren Anteilen auch durch Biomasse, etc.) aufgenommen.

<sup>15</sup> Schneidmesser et al., 2017.

<sup>16</sup> Die SLCPs umfassen grundsätzlich Treibhausgase mit direkter Treibhauswirkung (z.B. Methan, Ozon, F-Gase). Anders als gut durchmischte Treibhausgase (well mixed greenhouse gases, WMGHG) wie bspw. CO<sub>2</sub> verteilen sich die kurzlebigen Treibhausgase infolge ihrer kurzen Verweildauer nicht homogen in der Atmosphäre. Aus Vereinfachungsgründe werden im Folgenden alle Gase mit direkter Treibhauswirkung den Treibhausgasen und die Gase mit indirekter Treibhauswirkung den SLCPs zugeordnet.

von Wolken, Eis und Schnee und damit die Albedo der Erde beeinflussen.<sup>16</sup> Neuere Forschungen zeigen, dass Aerosole das Klima auch über ihre Wechselwirkung mit den Wolken beeinflussen (Kasten 2). Unter anderem nehmen sie Einfluss auf die Entstehung von Wolken sowie auf Anzahl, Größe und Verteilung der Tropfen in den Wolken. Insgesamt wirken die Gase eher erwärmend und die Aerosole eher kühlend auf die Atmosphäre.

Zu den klimaschädlichen Aerosolen zählen insbesondere Rußpartikel, die Bestandteil von (feinem) Feinstaub sind und insbesondere bei der unvollständigen Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse entstehen. Die dunklen Partikel absorbieren Sonnen- und Infrarotstrahlung in der Atmosphäre und tragen zur Klimaerwärmung bei. Zudem erwärmen Rußpartikel das Klima durch ihre Wirkung auf die Albedo der Erdoberfläche und der Wolken (z. B. Verdunklung von Wolken sowie von Schnee- und Eisflächen). Andere Arten von Feinstaub mit helleren bzw. weißen Partikeln können die Sonnenstrahlung reflektieren und somit zu einer Klimaabkühlung führen (z. B. Sulfate, Nitrate, Ammonium, organischer Kohlenstoff, Mineralstaub).<sup>17</sup>

### Kasten 2 Klimawirkung von Wolken und deren Interaktion mit Aerosolen<sup>18</sup>

Wolken in der Atmosphäre bilden sich durch aufsteigenden Wasserdampf (Verdunstung), der sich abkühlt und in flüssiges Wasser oder Eis übergeht. Dabei haben neben dem Wasserdampf, der als Treibhausgas und Rückkopplungsfaktor wirkt (siehe Abschnitt oben zum natürlichen Treibhauseffekt), auch Wolken einen Einfluss aufs Klima. Wolken reflektieren einerseits einströmende Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum und andererseits abgehende Wärmestrahlung zurück zur Erde. Damit können sie das Klima zwar sowohl abkühlen als auch erwärmen; insgesamt haben Wolken gegenwärtig aber eher einen abkühlenden Effekt.

Die genaue Wirkung von Wolken ist allerdings noch nicht abschließend geklärt. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass Wolken je nach Typ, Farbe sowie Gebiet und Höhe über der Erdoberfläche (und wohl auch je nach Landoberfläche, über der sie sich befinden) unterschiedlich auf die Energiebilanz der Erde wirken und auch unterschiedlich auf die verschiedenen Facetten des Klimawandels (z.B. Erwärmung, Veränderung der atmosphärischen Zirkulation) reagieren können. Zudem bestehen komplexe Wechselwirkungen zwischen Wolken und Aerosolen. Grundsätzlich können sich durch Aerosole mehr Wassertröpfchen in den Wolken bilden als sonst, wodurch mehr Sonnenlicht reflektiert wird (zumindest, wenn es sich bei den Aerosolen nicht um Rußpartikel handelt). Zudem verteilt sich das Wasser auf mehr Tröpfchen, sodass diese eine geringere Größe haben und damit die Lebensdauer von Wolken erhöhen.

## 01.2 Globale Erwärmung und Klimawandel

Der Klimawandel beschreibt die beobachtete globale Erwärmung des Klimasystems. Die Abweichung der Temperatur von langjährigen Mittelwerten wird als Temperaturanomalie bezeichnet. Seit Ende des 19. Jahrhunderts ist die durchschnittliche bodennahe Lufttemperatur weltweit deutlich gestiegen. Dabei war jedes der letzten drei Jahrzehnte sukzessiv wärmer als alle vorangehenden Jahrzehnte seit 1850. Bis heute hat sich die durchschnittliche globale Lufttemperatur insgesamt um etwa 1 Grad C gegenüber vorindustriellen Werten erhöht.<sup>19</sup> Auch in Deutschland und Bayern ist die bodennahe Lufttemperatur seit Beginn der Temperaturaufzeichnungen stark angestiegen (Abbildung 6). Besonders deutlich

<sup>17</sup> Neben den Auswirkungen auf das Klima gefährden Luftschadstoffe auch die menschliche Gesundheit und Ökosysteme.

<sup>18</sup> Spektrum, 2018a, 2011.

<sup>19</sup> IPCC, 2018.

ist der Temperaturanstieg seit Ende der 1980er-Jahre, wobei die Zunahme im Winter stärker ausgeprägt ist als im Sommer. In Deutschland und Bayern lagen neun der zehn wärmsten Jahre im Zeitraum ab 2000 und die durchschnittliche Temperatur war im Zeitraum 1990 bis 2019 rund 1,2 Grad C höher als im langjährigen Durchschnitt der Jahre 1951 bis 1980. Die Erwärmung spiegelt sich in der Zunahme von klimatologischen Kennzahlen wider, an denen bestimmte Schwellenwerte über- bzw. unterschritten werden (z. B. Eis-, Schneedecken-, Sommer-, Tropentag, heißer Tag, Tropennacht).

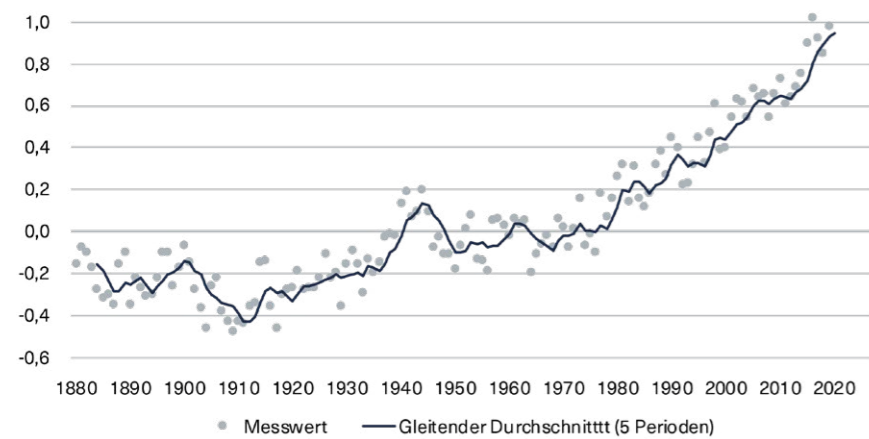
Die Erwärmung des Klimas verursacht zudem langfristige Veränderungen im Klimasystem. Das zeigt sich nicht nur im Anstieg der gemessenen Temperatur, sondern auch in

vielen anderen voneinander unabhängigen Indikatoren aus unterschiedlichen Datenquellen – bspw. den Grunddaten, auf denen die Berichte des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) basieren. In diesen Datenquellen sind seit der Industrialisierung gleichgerichtete Trends zu erkennen:<sup>20</sup>

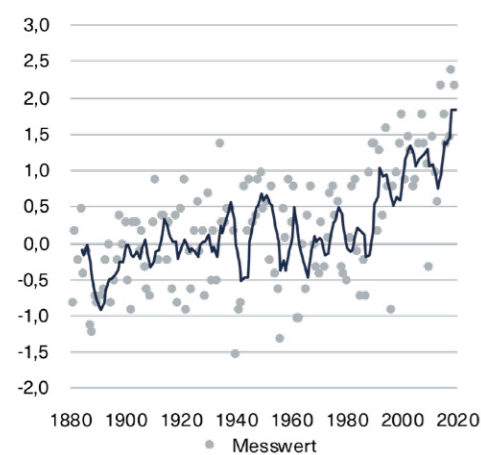
- Anstieg der Temperaturen in der Atmosphäre sowie über dem Land und Meer
- Erwärmung der Ozeane
- Anstieg des Meeresspiegels
- Abschmelzen der Gletscher (Masse)
- Abnahme schnee- und eisbedeckter Flächen in der nördlichen Hemisphäre
- Anstieg der Konzentrationen an Treibhausgasen und Wasserdampf in der Atmosphäre

Abbildung 6  
Abweichung der Temperatur vom Durchschnitt der Jahre 1951–1980

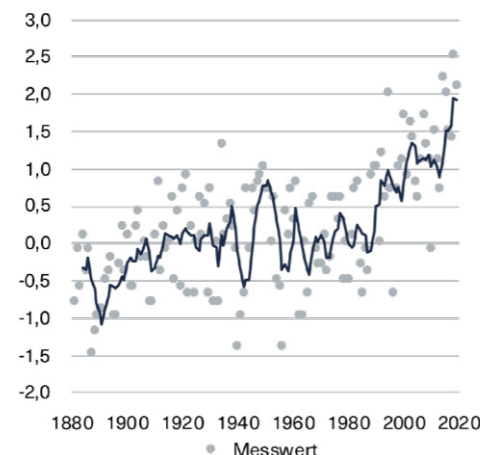
Global



Deutschland



Bayern



Quelle: NASA/GISS; DWD; eigene Darstellung Prognos, 2020

### 01.3 Einfluss des Menschen

Es ist inzwischen allgemein anerkannt, dass menschliche Aktivitäten seit Beginn der Industrialisierung zur globalen Erwärmung beigetragen haben. Der Klimawandel ist insbesondere auf den anthropogenen Anteil an den Treibhausgasen zurückzuführen. Aber auch der anthropogene Beitrag zu den kurzlebigen Luftschadstoffen und zur Veränderung der Albedo spielen eine Rolle.

Um den bisherigen Einfluss des Menschen auf das Klima zu bestimmen, werden typischerweise die heutigen Konzentrationen an Treibhausgasen (v. a. CO<sub>2</sub>) mit vorindustriellen Konzentrationen verglichen (Kasten 3). Die Differenz zwischen den heutigen und vorindustriellen Konzentrationen wird auf menschliche Aktivitäten seit der Industrialisierung, insbesondere die Verbrennung fossiler Energieträger und die Landwirtschaft zurückgeführt. Damit bleiben die menschlichen Aktivitäten vor der Industrialisierung unberücksichtigt, wenngleich sie einen Einfluss auf das Klima haben, der bis heute andauert. Schätzungen gehen davon aus, dass die vorindustriellen Emissionen aufgrund ihrer langen Verweildauer in der Atmosphäre zu etwa neun Prozent zur heutigen Erderwärmung beitragen.<sup>21</sup>

Klimaveränderungen seit Beginn der Industrialisierung werden nicht per se auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt, sondern gelten nur dann als menschengemacht, wenn ihnen ein Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten, hier also den anthropogenen Emissionen (bzw. den daraus resultierenden Veränderungen im Klimasystem) nachgewiesen werden kann. Bei der globalen Erwärmung ist dieser Zusammenhang inzwischen eindeutig. Inwiefern es sich bei klimatischen Veränderungen wie dem Auftreten einzelner Extremwetterereignisse um Folgen der Erwärmung handelt, ist hingegen noch oftmals unklar. Diesbezüglich gestaltet sich ein wissenschaftlicher Nachweis insbesondere aufgrund der Vielzahl von Faktoren und (chaotischen bzw. nichtlinearen und rückgekoppelten) Prozessen im Klimasystem schwierig (Teil II Kapitel 02.1).

#### Kasten 3

##### Industrialisierung als Referenzzeitpunkt zur Bestimmung des menschlichen Einflusses

Zur Quantifizierung des anthropogenen Einflusses auf das Klima werden typischerweise heutige Messwerte mit entsprechenden vorindustriellen Werten (Treibhausgas-Konzentrationen, Temperaturindikatoren etc.) verglichen. Die Stärke des anthropogenen Einflusses hängt somit wesentlich vom gewählten Referenzzeitpunkt ab. Trotz der großen Bedeutung existiert kein einheitlicher Referenzzeitpunkt, vielmehr variiert dieser je nach Fragestellung und Datenlage. Ein späterer Referenzzeitpunkt führt tendenziell zu einer Unterschätzung des anthropogenen Einflusses, da der Mensch infolge der dann schon eingesetzten Industrialisierung die Energiebilanz der Erde (z. B. durch Treibhausgas-Emissionen) bereits beeinflusst hat. Häufig dient ein Jahr oder ein Mehrjahresdurchschnitt zwischen 1750 und 1900 als Referenz. Da Wetteraufzeichnungen vielerorts erst seit Ende des 19. Jahrhunderts oder später vorliegen, greift die Wissenschaft zur Ermittlung von Klimadaten vor Beginn der Aufzeichnungen auf andere Quellen zurück (z. B. Eisbohrkerne, Baumringe).

#### Anthropogener Treibhauseffekt

Die durch menschliche Aktivitäten freigesetzten Treibhausgase verstärken den natürlichen Treibhauseffekt und tragen zur Erderwärmung bei. Die bedeutendsten anthropogenen Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O). CO<sub>2</sub> entsteht primär bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger wie Kohle, Erdölprodukten und Erdgas. Methan und Lachgas hingegen

resultieren vor allem aus landwirtschaftlichen Aktivitäten. Diese Emissionen stehen in engem Zusammenhang mit der Industrialisierung und der Intensivierung der Landwirtschaft, bspw. Lachgas-Emissionen infolge von Stickstoff-Düngung und Methan-Emissionen infolge der (Rind-) Viehhaltung.

Anders als bei den Treibhausgasen ist der anthropogene Einfluss auf die Bildung von Wasserdampf, der wichtigste Treiber des natürlichen Treibhauseffekts (Abbildung 4), klein. Dies liegt zum einen daran, dass anthropogene Wasserdampfemissionen (z.B. durch Bewässerungen) gegenüber der natürlichen Verdunstung relativ gering sind, und zum anderen daran, dass die Atmosphäre – abhängig von ihrer Temperatur – ohnehin nur eine bestimmte Menge an Wasserdampf aufnehmen kann. Zudem ist die Verweildauer von Wasserdampf in der Atmosphäre mit etwa zehn Tagen relativ kurz. Daher wird vom Menschen verursachter Wasserdampf in der Regel nicht als anthropogenes Treibhausgas betrachtet (anders bei Wasserdampf, der durch Oxidation von anthropogenem Methan entsteht).<sup>22</sup> Allerdings spielt Wasserdampf beim anthropogen verursachten Treibhauseffekt als (positiver) Rückkopplungsfaktor eine Rolle: Infolge der globalen Erwärmung verdunstet mehr Wasser (insbesondere über den Ozeanen), was zu einem Anstieg des Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre führt und damit den Treibhauseffekt bzw. die Erwärmung verstärkt.

Ebenfalls zu den Treibhausgasen gehören die sogenannten F-Gase, das sind teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) und Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>). Im Gegensatz zu den anderen Treibhausgasen kommen sie in der Natur praktisch nicht vor, sondern werden künstlich produziert. Sie kommen bspw. bei Kühlmitteln und Dämmstoffen zum Einsatz oder werden bei der Herstellung von Flachbildschirmen und Solarzellen emittiert. Die teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe dienen insbesondere als Ersatz für Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW), die inzwischen weltweit verboten sind, da sie die Ozonschicht schädigen, die das Leben auf der Erde vor zu starker UV-Strahlung schützt. Der mit dem Verbot von FCKWs<sup>23</sup> verbundene Rückgang des Ozonlochs zeigt die Effektivität globaler Vereinbarungen.

F-Gase haben zwar nur einen sehr geringen Anteil von rund zwei Prozent an den Treibhausgas-Emissionen,<sup>24</sup> sie verweilen aber extrem lange in der Atmosphäre und haben ein relativ hohes Erwärmungs- bzw. Treibhauspotenzial (global warming potential, GWP). Das GWP wird meist in wirkungsgleichen Mengen CO<sub>2</sub> über einen Zeitraum von 100 Jahren in der Atmosphäre angegeben (CO<sub>2</sub>-Äquivalent, CO<sub>2</sub>-Äq).<sup>25</sup> Das GWP eines CO<sub>2</sub>-Moleküls ist per Definition eins. Das GWP von Methan beträgt 28, das von Lachgas 265. Das GWP von F-Gasen liegt zwischen 100 und 23.500 für Schwefelhexafluorid SF<sub>6</sub>, welches als Isolationsgas bspw. in elektrischen Schaltanlagen eingesetzt wird. Während früher bei Arbeiten an den Schaltanlagen das Gas vollständig emittiert wurde, wird das SF<sub>6</sub> heutzutage evakuiert und wiederverwendet, wobei in der Regel nur minimale Mengen freigesetzt werden. Trotz ihrer starken Klimawirkung tragen die F-Gase aufgrund ihrer geringen Menge in der Atmosphäre sehr viel weniger zum anthropogenen Klimawandel bei als CO<sub>2</sub>.

#### Überblick über die Entwicklung der anthropogenen Treibhausgase

Der menschengemachte Anteil an den Treibhausgasen wird anhand ihrer Konzentrationen im Vergleich zur vorindustriellen Zeit bestimmt. Die heutigen Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre sind höher als jemals zuvor in den letzten 800.000 Jahren und der durchschnittliche Anstieg der Konzentrationen im vergangenen Jahrhundert ist einzigartig in den letzten 22.000 Jahren.<sup>26</sup> Seit Beginn der Industrialisierung im Jahr 1750 sind die Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, Methan und Lachgas deutlich gestiegen (Abbildung 7). Dabei hat sich das Wachstum der Konzentrationen in den vergangenen Jahrzehnten beschleunigt. Zwischen 1990 und 2015 betrug die Wachstumsrate bei CO<sub>2</sub> 13 Prozent und bei Methan und Lachgas rund sieben Prozent bzw. sechs Prozent.

<sup>22</sup> Myhre et al., 2007.

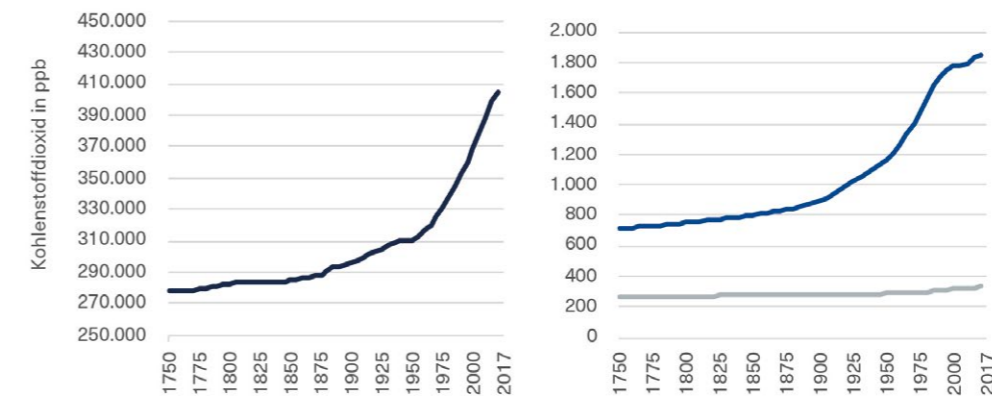
<sup>23</sup> Im Rahmen des Protokolls von Montreal verpflichteten sich 1987 196 Länder sowie die EU, die Produktion von FCKW bis 1999 zu halbieren. Im Sommer 1990 entschieden sie, die Produktion innerhalb von zehn Jahren (fast) komplett einzustellen (Spektrum, 2015).

<sup>24</sup> In Deutschland entfielen 2018 rund 88 Prozent der emittierten Treibhausgase auf CO<sub>2</sub>, sechs Prozent auf Methan, vier Prozent auf Lachgas und unter zwei Prozent auf die F-Gase (UBA, 2020f).

<sup>25</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalente beschreiben das Treibhausgas-Potenzial eines Gases in Relation zu dem am häufigsten vorkommenden Treibhausgas CO<sub>2</sub>. Faktoren zur Umrechnung des Treibhausgas-Potenzials eines Klimagases in CO<sub>2</sub>-Äquivalente sind vom UNFCCC festgelegt.

<sup>26</sup> IPCC, 2013.

Abbildung 7  
Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre, 1750–2017



Quelle: European Environment Agency (EEA); National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE); eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Quantifizierung der Haupttreiber des Klimawandels

Um die Wirkung der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Energiebilanz der Erde zu quantifizieren, bedarf es einer einheitlichen Rechengröße. Hierzu dient der Strahlungsantrieb („radiative forcing“) der einzelnen Einflussfaktoren. Vereinfacht ausgedrückt, misst der Strahlungsantrieb die Netto-Strahlungsenergie, die pro Sekunde und pro Quadratmeter durch die Tropopause (die Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre) hindurchkommt. Dabei wird u. a. berücksichtigt, dass der Beitrag der einzelnen Treibhausgase zum Treibhauseffekt zum einen von ihrer Konzentration in der Atmosphäre (Mengeneffekt) und zum anderen von ihrem Treibhauspotenzial (GWP) abhängt.

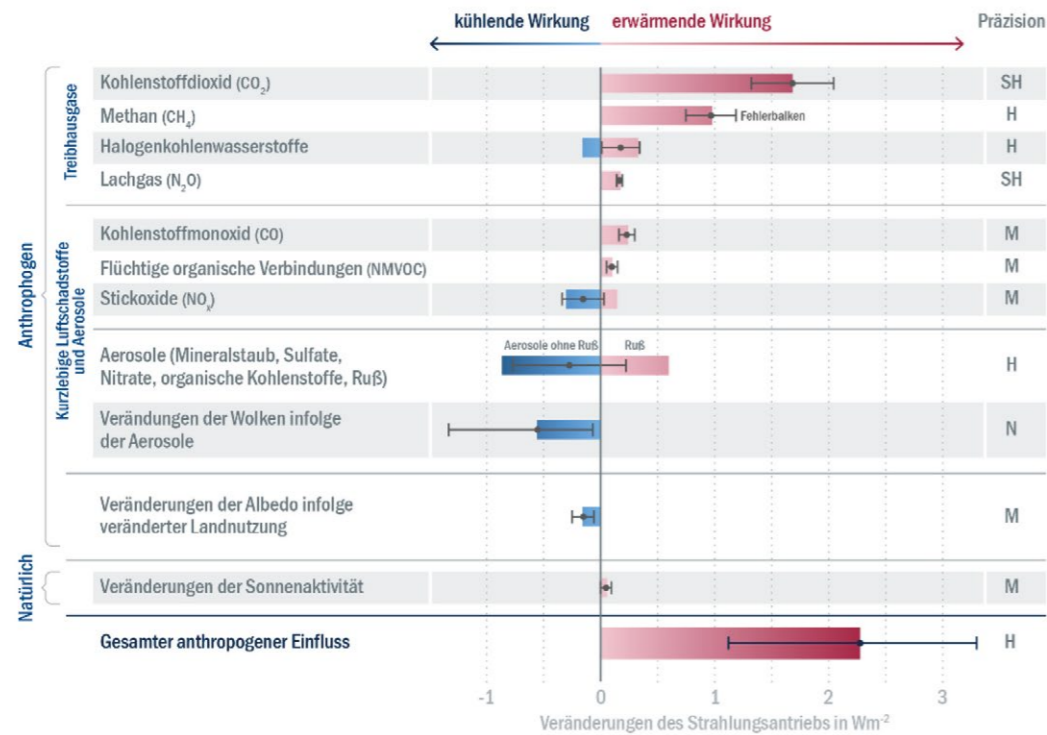
Abbildung 8 zeigt, welchen Einfluss anthropogene und natürliche Faktoren auf den Strahlungsantrieb haben und welche Faktoren als Haupttreiber des Klimawandels wirken. Der Fehlerbalken visualisiert bestehende Unsicherheiten, die insbesondere den Anteil bzw. Wirkungsgrad der Aerosole (relativ großer Fehlerbalken) betreffen. Dagegen ist die Wirkungsrichtung bei den meisten Einflussfaktoren eindeutig (Fehlerbalken reicht nicht in den negativen Bereich). Wegen seiner hohen Konzentration in der Atmo-

sphäre leistete CO<sub>2</sub> trotz seines vergleichsweise geringen GWP den mit deutlichem Abstand größten Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt. Im Jahr 2018 lag er bei 66 Prozent. Dahinter folgten Methan mit etwa 17 Prozent, Lachgas mit fünf Prozent sowie 17 weitere Treibhausgase mit zusammen knapp zwölf Prozent.<sup>27</sup> Ebenfalls deutlich erwärmend dürften Rußpartikel gewirkt haben, wobei hier die Unsicherheit relativ groß ist.

Eine stärkere Wolkenbildung und eine Änderung der Landnutzung haben insgesamt einen kühlenden Einfluss, der allerdings von den anthropogenen Treibhausgasen bei Weitem überkompensiert wird. Die kühlende Wirkung entsteht grundsätzlich dadurch, dass Wolken den Anteil reflektierter Sonnenstrahlung erhöhen, wodurch weniger Wärme in der Atmosphäre aufgenommen wird (Kasten 2). Ebenso hat eine veränderte Landnutzung bspw. von wenig reflektiven (dunkleren) Waldflächen hin zu stärker reflektierenden (helleren) landwirtschaftlichen Flächen oder Siedlungsflächen eine kühlende Wirkung. Bei dem kühlenden Einfluss aus der Änderung der Albedo wird allerdings nur die Reflektivität betrachtet und bspw. nicht das Potenzial eines Waldes als CO<sub>2</sub>-Senke.

<sup>27</sup> National Centers for Environmental Information, 2020

Abbildung 8  
Haupttreiber des Klimawandels



Schätzwerte zur globalen durchschnittlichen Veränderung des Strahlungsantriebs im Jahr 2011, bezogen auf 1750. Vereinfacht ausgedrückt gibt der Fehlerbalken bestehende Unsicherheiten an und die Präzision (Vertrauensniveau) die Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert innerhalb des Fehlerbalkens liegt (SH: sehr hoch, H: hoch, M: mittel, N: niedrig, SN: sehr niedrig). Die Veränderung der Albedo durch Ruß auf Schnee und Eis ist im Balken für Ruß-Aerosole enthalten. Vulkanische Aktivitäten sind nicht ausgewiesen, da sie infolge ihres episodischen Charakters mit den anderen Faktoren kaum vergleichbar sind. Ebenfalls nicht dargestellt sind die geringen Effekte von Kondensstreifen (0,05 W m<sup>-2</sup>) sowie von den F-Gasen H-FKW und PFC und SF<sub>6</sub> (insgesamt 0,03 W m<sup>-2</sup>).

Quelle: Vereinfachte Darstellung auf Basis IPCC, 2013; eigene Darstellung Prognos, 2020

**Einfluss des Menschen erklärt beobachtete Erderwärmung**

Die beobachtete Erderwärmung lässt sich ohne den Einfluss des Menschen seit Beginn der Industrialisierung nicht erklären. Abbildung 9 zeigt den modellierten Temperatureinfluss natürlicher und anthropogener Faktoren auf Grundlage ihres Strahlungsantriebs seit 1850. Der kumulierte Einfluss der natürlichen Faktoren wie Schwankungen in der Sonnenaktivität oder Vulkanismus bleibt nahe bei der Nulllinie. Sie können die Veränderung der gemessenen mittleren globalen Oberflächentemperatur also nicht erklären. Eine Erklärung liefern hingegen die menschlichen Einflussfaktoren, allen voran der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration. In Summe deckt sich der Temperatureinfluss der anthropogenen Faktoren recht gut mit der beobachteten Erwärmung. Gleichwohl gibt es teilweise noch deutliche Differenzen zwischen beobachteter und modellierter Temperatur (z. B. in den 1910er- und 1950er-Jahren), die auf bestehende Unsicherheiten und Forschungsbedarf hindeuten.

**Natürlicher Kohlenstoffkreislauf dämpft Einfluss des Menschen**

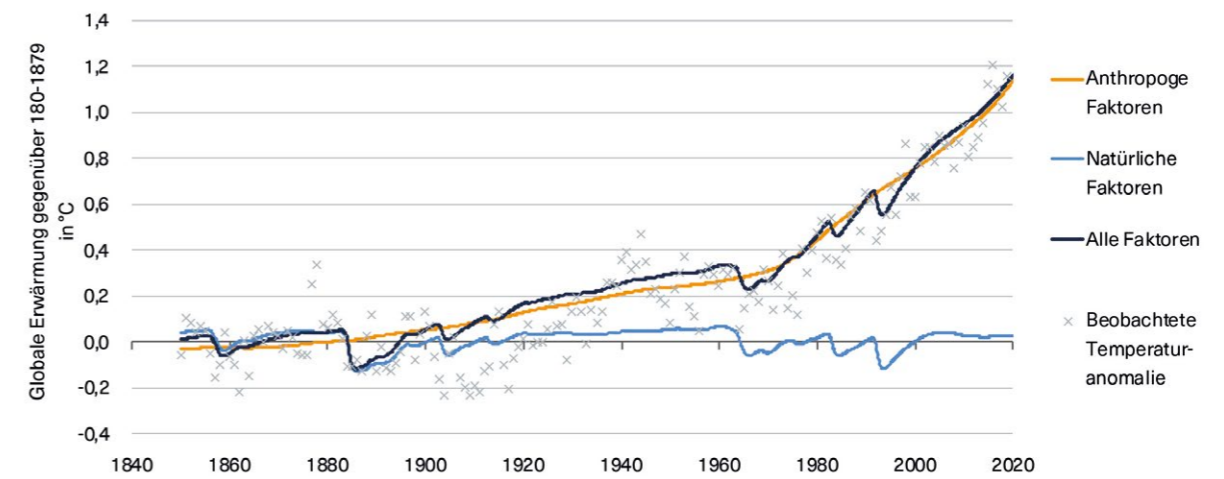
Das von Menschen emittierte CO<sub>2</sub> tritt in den komplexen Kohlenstoffkreislauf zwischen drei Kohlenstoff-Reservoiren ein:

- der Atmosphäre,
- den Ozeanen (Hydrosphäre) sowie
- den Böden und der Vegetation (Lithosphäre, Pedosphäre und Biosphäre).

Die Lithosphäre bindet über 99 Prozent des Kohlenstoffs auf der Erde, vor allem in Form von Carbonatgesteinen (z. B. Kalkstein, der als Rohstoff für Zement dient) und zu kleineren Teilen auch in Form von fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdgas und Erdöl. Die Atmosphäre stellt den kleinsten Kohlenstoffspeicher dar, hier hat bereits eine geringe CO<sub>2</sub>-Zufuhr eine deutliche Änderung der CO<sub>2</sub>-Konzentration zur Folge. Ähnliches gilt für die Ozeane.<sup>28</sup>

Der natürliche Kohlenstoffkreislauf ist relativ ausgeglichen, d.h. es werden in etwa die gleichen Menge CO<sub>2</sub> von den drei Reservoiren freigesetzt und aufgenommen. Das anthropogene CO<sub>2</sub> stört diesen natürlichen Kreislauf (Abbildung 10): Fast ein Viertel des menschengemachten CO<sub>2</sub> wird in den Ozeanen gebunden. Insgesamt führt dies zu einer Erwärmung und Übersäuerung insbesondere der oberen Meeresschichten, wodurch die Lebensbedingungen im größten Lebensraum für Tiere und Pflanzen verändert werden. Mit ihrer Erwärmung und Versauerung geht die Aufnahmefähigkeit der Ozeane für CO<sub>2</sub> zunehmend zurück. Damit könnten die Meere die Klimaveränderung in Zukunft weniger stark bremsen als bisher. Böden und Vegetation nehmen rund 29 Prozent des anthropogenen CO<sub>2</sub> auf, sodass etwa 44 Prozent in der Atmosphäre verbleiben.<sup>29</sup>

Abbildung 9  
Beitrag der kumulierten natürlichen und menschlichen Faktoren zur Erklärung der globalen Erwärmung, 1850-2020



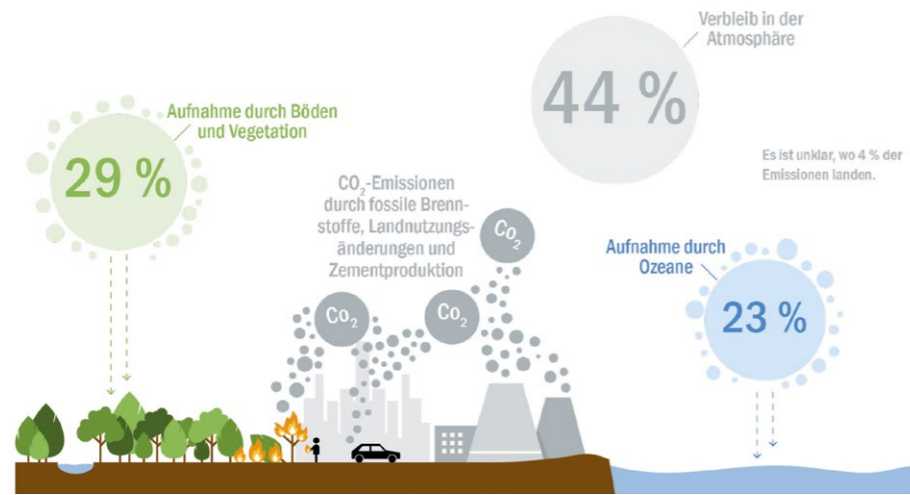
Die beobachtete Temperatur-anomalie ergibt sich aus dem jährlichen Durchschnitt gem. der instrumentellen Temperatureaufzeichnungen (HadCRUT4). Daten bis Februar 2020.

Quelle: Hausteijn et al., 2017; Global Warming Index; eigene Darstellung Prognos, 2020

<sup>28</sup> Spektrum, 2000.

<sup>29</sup> Friedlingstein, et al., 2019.

Abbildung 10  
Nettoaufnahme anthropogener CO<sub>2</sub>-Emissionen in den drei Reservoiren



Durchschnittliche Werte für die Dekade zwischen 2009 und 2018

Quelle: Friedlingstein et al., 2019; eigene Darstellung Prognos, 2020 (in Anlehnung an Nelles und Serrer, 2018)

### 01.4 Rückkopplungseffekte und Kippelemente im Erdsystem

#### Rückkopplungseffekte beschleunigen den Klimawandel

Wesentliche Elemente im Klimasystem der Erde reagieren ab einer bestimmten Erwärmung sehr sensitiv auf weitere klimatische Veränderungen. Diese Elemente werden als Kippelemente bezeichnet. Ihr Schwellenverhalten basiert im Wesentlichen auf Rückkopplungseffekten, die sich – einmal angestoßen – ohne weiteren externen Einfluss selbst verstärken. Dies kann zu abrupten und drastischen Änderungen im Klimasystem führen, die auch dann erhalten bleiben können, wenn die Ursachen nicht mehr vorhanden sind. Diese Veränderungen können irreversibel sein, eine Rückkehr in den alten Zustand ist dann nicht mehr möglich. Neben den Veränderungen, die bereits das Umkippen eines einzelnen Kippelementes mit sich bringen kann, besteht die Gefahr, dass infolge komplexer Wechselwirkungen weitere Kippelemente ausgelöst werden (Dominoeffekt) und sich der Klimawandel beschleunigt sowie Wirkungen verstärken.

#### Kippelemente im Erdsystem

Abbildung 11 zeigt wesentliche, in der Wissenschaft diskutierte Kippelemente im Klimasystem der Erde. Vereinfacht ausgedrückt führt bspw. das Abschmelzen von Eiskörpern (z. B. grönländisches Eisschild) u. a. dazu, dass die Albedo der Erde sich verringert und weniger Strahlung reflektiert wird, was zur weiteren Erderwärmung beiträgt und den Schmelzprozess beschleunigt. Das Abschmelzen des Grönlandeises führt zu einer Veränderung des Salzgehalts des Meeres und damit der atlantischen Zirkulation. Die klimatischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte deuten darauf hin, dass viele Kippelemente bereits angestoßen wurden. So sind bspw. die Eiskörper in Grönland, der Antarktis und im arktischen Meer bereits deutlich zurückgegangen, und die atlantische Zirkulation hat sich verlangsamt.<sup>30</sup>

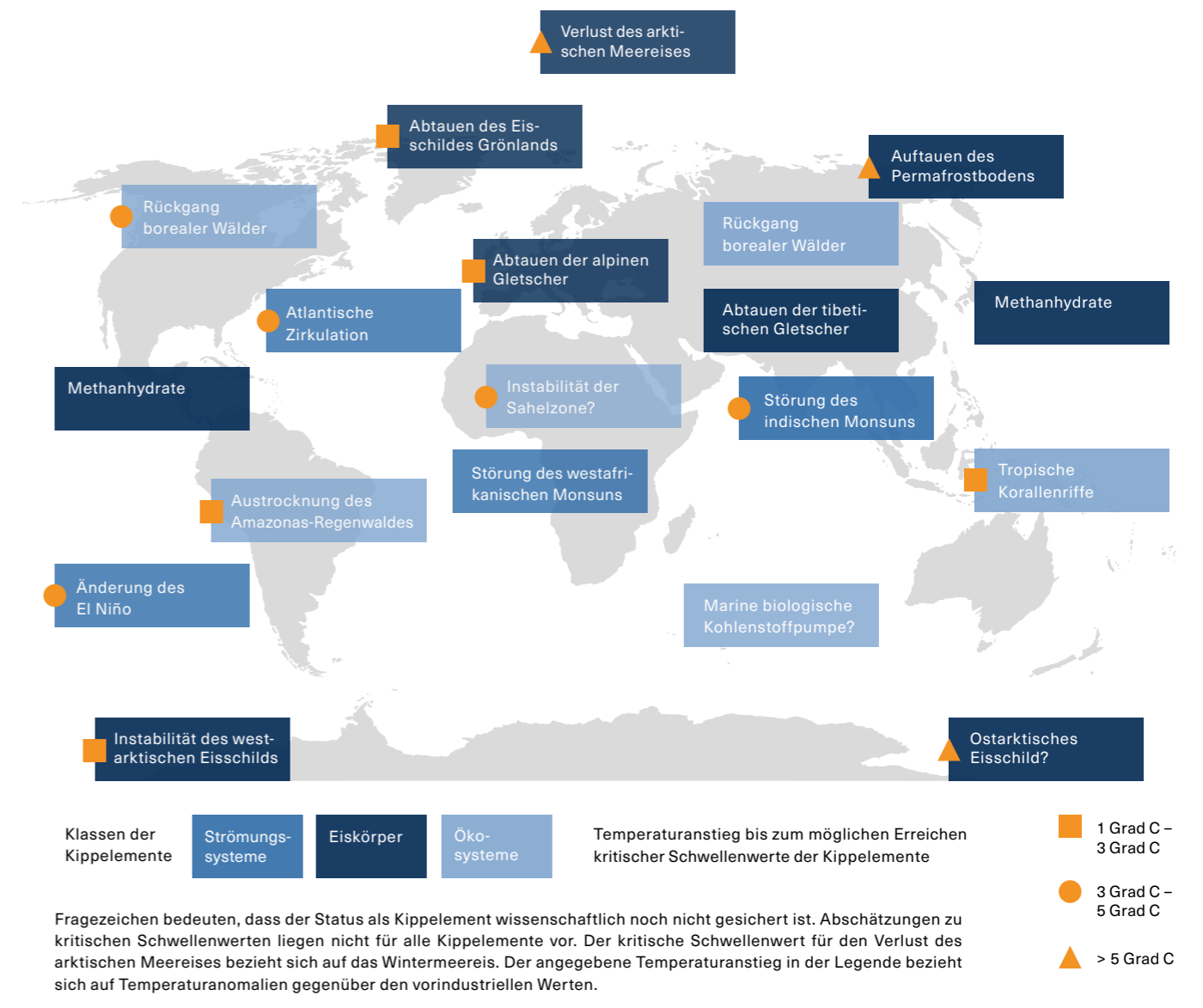
#### Kritische Schwellenwerte der Kippelemente

Viele Prozesse und Wechselwirkungen, die im Zusammenhang mit den Kippelementen stehen, sind noch nicht ausreichend bekannt. Deshalb lassen sich Wahrscheinlichkeiten und Zeitpunkte ihres Eintritts sowie ihre konkreten Auswirkungen nicht verlässlich vorhersagen. Dennoch gibt es wissenschaftliche Berechnungen möglicher kritischer Schwellenwerte, ab denen ein Umkippen einzelner Elemente droht. Diese könnten für einzelne Kippelemente bereits ab einem Temperaturanstieg von 1 Grad C gegenüber dem vorindustriellen Niveau vorliegen (Abbildung 11), einem Wert, der gegenwärtig erreicht ist.<sup>31</sup> Die Erkenntnisse zu möglichen kritischen Schwellenwerten waren nicht zuletzt Ausgangspunkt für das im Paris-Abkommen vereinbarte Klimaschutzziel, die globale Erderwärmung auf unter 2 Grad C zu begrenzen.

30 Lenton et al., 2019.

31 IPCC, 2018.

Abbildung 11  
Kippelemente und kritische Schwellenwerte im Erdsystem



Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

## 02 Folgen des Klimawandels

### Der Klimawandel wirkt sich in vielfältiger Art und Weise in allen Regionen der Erde aus – meist mit negativen Folgen für Mensch und Umwelt.

Der Klimawandel wirkt sich in vielfältiger Art und Weise in allen Regionen der Erde aus. Wenngleich die Intensität regional variieren kann, sind die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt überall deutlich. Die Auswirkungen des Klimawandels können dabei je nach Komplexität der Wirkungsbeziehung in direkte und indirekte Folgen unterteilt werden, wobei keine allgemeingültige Abgrenzung existiert. Direkte Folgen werden im Prinzip unmittelbar durch die globale Erwärmung hervorgerufen und umfassen neben den Kippelementen u. a. auch die Zunahme von Extremwetterereignissen sowie den Anstieg des Meeresspiegels. Indirekte Folgen resultieren infolge des Durchlaufens längerer Wirkungsketten (z. B. Folgen für Gesundheit durch eine schnellere Verbreitung bestimmter Krankheitserreger).

#### 02.1 Klimatische Veränderungen

##### 02.1.1 Extremwetterereignisse und Naturkatastrophen

Insgesamt ist die Zahl der erfassten Naturkatastrophen seit Anfang des 20. Jahrhunderts weltweit deutlich gestiegen. Die stärkste Zunahme ist bei Stürmen und Überschwemmungen zu verzeichnen. Der Anstieg der erfassten Naturkatastrophen steht primär im Zusammenhang mit der zunehmenden Berichterstattung im Laufe der Zeit, aber auch der Klimawandel dürfte eine Rolle spielen. Naturkatastrophen mögen zwar häufiger auftreten als früher, sie haben aber – trotz des Bevölkerungswachstums – weltweit immer weniger Todesopfer zur Folge. Während Dürren und Überschwemmungen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in einzelnen Jahren noch bis zu drei bzw. 3,7 Mio. Todesopfer forderten, lagen die Fallzahlen seit 1990 stets unter 150.000.<sup>32</sup> Zugleich sind die wirtschaftlichen Schäden infolge von Naturkatastrophen weiterhin enorm; sie dürften infolge des Klimawandels und der Intensivierung der globalen Wirtschaftsverflechtungen in Zukunft noch steigen. Zur Reduktion der Anzahl der Todesopfer und wirtschaftlichen Schäden wurde in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt (Teil III Kapitel 01).

Wissenschaftlich ist es (noch) nicht möglich, einzelne Extremwetterereignisse kausal dem Klimawandel zuzuschreiben, da diese von einer Vielzahl von Faktoren und

Inhalte		
<b>02.1</b>	<b>Klimatische Veränderungen</b>	<b>28</b>
02.1.1	Extremwetterereignisse und Naturkatastrophen	28
02.1.2	Regionale Klimaveränderungen in Deutschland und Bayern	29
<b>02.2</b>	<b>Anstieg des Meeresspiegels und Abtauen der Eisschilde</b>	<b>32</b>
<b>02.3</b>	<b>Folgen des Klimawandels für ausgewählte Lebens- und Wirtschaftsbereiche</b>	<b>32</b>
<b>02.4</b>	<b>Kosten des Klimawandels bzw. Nichthandelns</b>	<b>35</b>
02.4.1	Gesamtwirtschaftliche Kosten	35
02.4.2	Vulnerabilität und Klimaschäden im internationalen Vergleich	38

(chaotischen) Prozessen im Klimasystem der Erde abhängen. Es ist jedoch inzwischen gut belegt, dass die globale Erwärmung die Eintrittswahrscheinlichkeit für bestimmte Arten von Extremwetterereignissen erhöht.

Nach aktuellem Stand der Forschung sind insbesondere fundierte Aussagen darüber möglich, wie stark der menschengemachte Klimawandel Wahrscheinlichkeit und Intensität von Hitzewellen erhöht. Für Dürren, Starkregen und Fluten sind die Aussagen weniger verlässlich und für viele Sturmarten sind sie praktisch (noch) nicht möglich. Der Grund für die Zunahme bestimmter Extremwetterereignisse liegt u. a. darin, dass das Klimasystem wegen der höheren Temperaturen mehr Energie aufnehmen kann. Die Luft kann dadurch mehr Wasser aufnehmen und verdampfen. Dies kann Extremwetter wie Dürren und Gewitter begünstigen. Da die Niederschläge nicht zwangsläufig am Ort der Verdunstung erfolgen, können Gebiete mit viel Niederschlag noch feuchter und Gebiete mit wenig Niederschlag noch trockener werden. Infolge komplexer Wechselwirkungen des Klimasystems kann die globale Erwärmung allerdings auch dazu führen, dass Gebiete mit viel Niederschlag trockener und Gebiete mit wenig Niederschlag feuchter werden (z. B. Austrocknung des Amazonas-Regenwaldes bzw. des südamerikanischen Pantanals).

##### 02.1.2 Regionale Klimaveränderungen in Deutschland und Bayern

###### Erhöhte Exposition bestimmter Räume in Deutschland und Bayern

Dicht besiedelte urbane Gebiete sind in der Regel durch eine erhöhte Exposition gegenüber dem Klimawandel gekennzeichnet. Infolge des hohen Versiegelungsgrads fehlen Retentions- und Versickerungsflächen, um Starkregenereignisse abzufangen. Dies begünstigt lokale Überflutungen, die durch die Anhäufung von Infrastrukturen in den Städten hohe Schäden anrichten können. Zudem absorbieren Gebäude, insbesondere wenn sie in enger räumlicher Abfolge errichtet werden, die Sonneneinstrahlung und geben diese verzögert ab, sodass es nachts in den innerstädtischen Räumen zu einer geringeren Abkühlung kommt, was tagsüber wiederum eine schnellere Erwärmung der Umgebung begünstigt. Dieser sogenannte urbane Hitzeinseleffekt sorgt für Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Umland von bis zu zehn Grad C.<sup>33</sup>

In Bayern, dem mit rund 13 Mio. Einwohnern nach Nordrhein-Westfalen bevölkerungsreichsten Bundesland, lebt gegenwärtig etwa ein Drittel der Bevölkerung in einer der acht Großstädte. Von den 100 am dichtesten besiedelten Gemeinden und Städten in Deutschland befinden sich 18 in Bayern – nur in Nordrhein-Westfalen sind es mehr. Die bayerische Landeshauptstadt, in der über elf Prozent der Bayern leben, ist die am dichtesten besiedelte Großstadt Deutschlands. Der urbane Hitzeinseleffekt beträgt in München bis zu acht Grad C.<sup>34</sup>

Neben der Besiedelungsdichte können regional erhöhte Vulnerabilitäten durch die Nähe von Städten (Produktionsstätten, landwirtschaftliche Nutzflächen) zu Flüssen resultieren. Zum einen besteht die Gefahr von Flusshochwasser (bspw. durch Starkregenereignisse oder rasche Schneeschmelzen) mit negativen Auswirkungen auf flussnahe Gewerbe- und Industriebetriebe, private Haushalte und Verkehrsinfrastrukturen. Zum anderen können Niedrigwasserereignisse auftreten (bspw. durch Trockenheit und erhöhte Temperaturen), die für erhebliche Einschränkungen in der touristischen und gewerblichen Schifffahrt sorgen und sich neben Flüssen auch auf die Wasservorräte in Seen und Stauseen auswirken. Niedrigwasserereignisse gab es in Deutschland bspw. 2018 und 2019 an der Donau und am Rhein. Auch landwirtschaftliche Flächen sind in großem Maße vom natürlichen Wasserkreislauf abhängig und besonders sensitiv gegenüber seinen Veränderungen (z. B. Trockenheiten oder lokale Überschwemmungen).

###### Zukünftige klimatische Veränderungen in den Regionen Deutschlands

Abgesehen von einer generellen Erhöhung der Temperaturen variieren die erwarteten klimatischen Veränderungen zwischen den Regionen Deutschlands. Das Umweltbundesamt (UBA) unterteilt Deutschland in sechs Regionen, die zukünftig jeweils mit anderen klimatischen Herausforderungen konfrontiert sein werden (Abbildung 12), u. a.:

- Nordwesten Deutschlands: Zunahme von Flusshochwässern und Sturmfluten
- Ostdeutsche Bundesländer und Rheinland-Pfalz: starker Rückgang der Niederschläge
- Südliches Brandenburg, nördliches Sachsen sowie in den dicht besiedelten Gebieten entlang von Rhein und Ruhr: deutlich überdurchschnittliche Erwärmung
- Mittelgebirge von der Westeifel bis zum Fichtelgebirge: Erwärmung und Zunahme winterlicher (Regen-)Niederschläge
- Gebirgsvorland in Bayern und Baden-Württemberg: überdurchschnittliche Erwärmung
- Gebirgsregionen (Alpenraum, Schwarzwald und Bayerischer Wald): Abnahme sommerlicher und Zunahme winterlicher Niederschläge (v. a. Regen), überdurchschnittliche Erwärmungen, verstärkte Ungleichverteilung von Niederschlägen über das Jahr

Insgesamt wird für weite Teile Deutschlands eine Intensivierung der Niederschläge und eine Verringerung der Schneefälle erwartet. Dies hat eine Erhöhung des oberflächlichen Abflusses und damit eine Verringerung der Gesamthöhe der Grundwasserneubildung und ein Absinken des Grundwasserspiegels zur Folge. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die grundwasserabhängigen Ökosysteme.<sup>35</sup> Die erwarteten zukünftigen klimatischen Veränderungen in Bayern sind in Kasten 4 dargestellt.

<sup>33</sup> Birkmann et al., 2012.

<sup>34</sup> Hitzeinseleffekt gemäß Klimafunktionskarte München, abrufbar unter: <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Stadtklima/Stadtklimaanalyse.html>.

<sup>35</sup> Mosbrugger et al., 2014.



Kasten 4  
Zukünftige klimatische Veränderungen in Bayern

Prognosen gehen davon aus, dass sich der Klimawandel in Bayern zukünftig deutlich beschleunigt (zum bisherigen Temperaturanstieg siehe Teil II Kapitel 01.2). Dies spiegelt sich u. a. in einer weiteren Abnahme von Eis- und Schneedeckentagen sowie Zunahme von heißen Tagen in Bayern wider. Zudem werden längere Vegetationsperioden sowie steigende Wassertemperaturen und Hochwasserabflüsse im Gesamtjahr und im Winterhalbjahr erwartet; im Sommerhalbjahr ist tendenziell von einer Abnahme auszugehen.<sup>36</sup> Die klimatischen Veränderungen und die direkte Vulnerabilität Bayerns sind jedoch regional differenziert zu betrachten (Abbildung 12):

**Unterfranken**

Da es hier bereits heute ein im Bundesvergleich überdurchschnittlich warmes Klima gibt, wird im Sommer ein besonders starker Anstieg von heißen Tagen (Temperatur über 30 Grad C) und Tropennächten (Temperatur sinkt nachts nicht unter 20 Grad C) erwartet. Hiermit verbunden sind längere Trockenzeiten und mögliche Hitzewellen.

**Oberfranken**

Hier wird es ganzjährig zu erhöhten Durchschnittstemperaturen kommen, die nicht zwangsläufig mit verringerten Niederschlägen verbunden sind. Besonders in den Wintermonaten werden die Niederschläge eher zunehmen und infolge der mildereren Temperaturen seltener als Schnee auftreten.

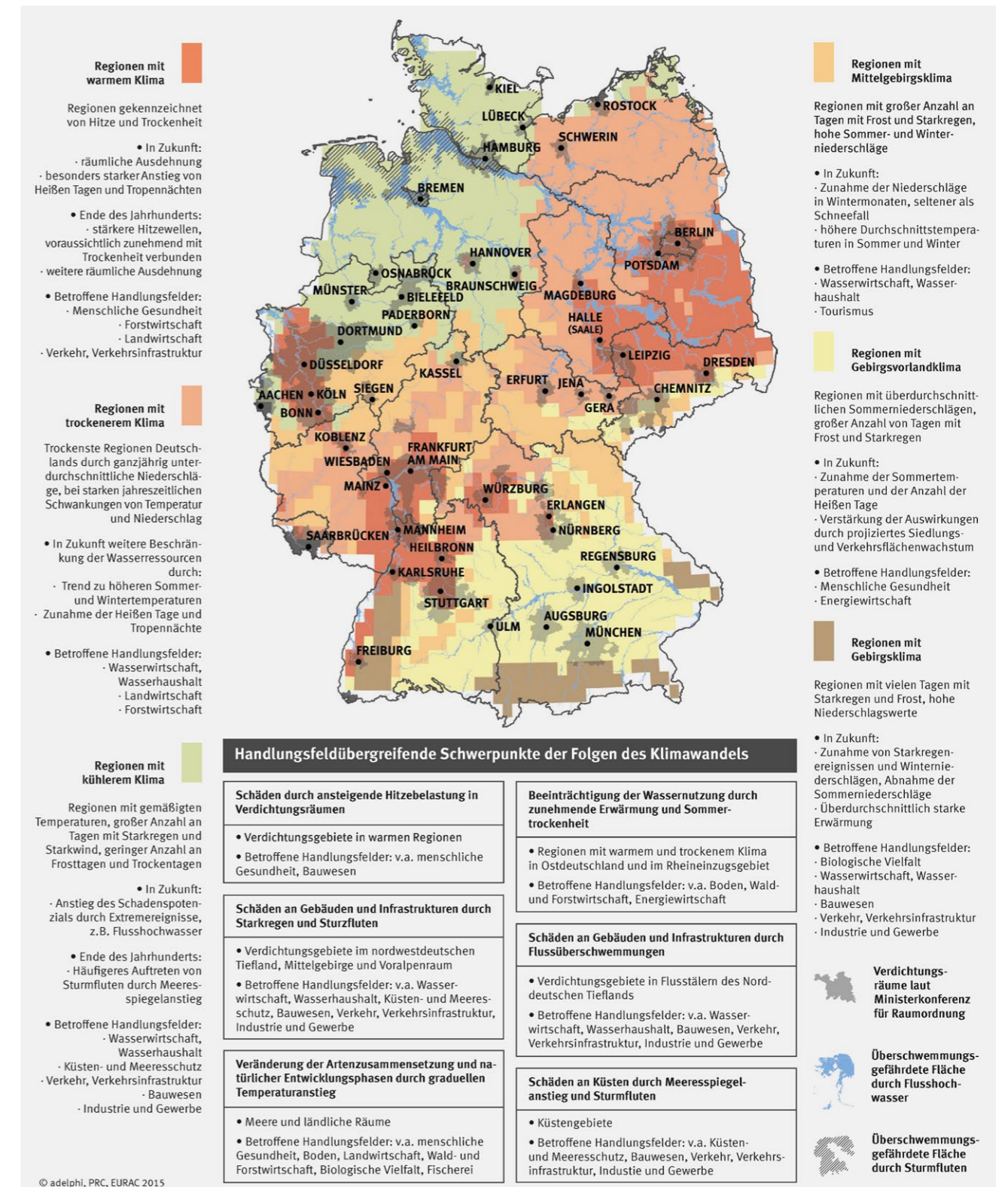
**Zentralbereiche Bayerns (Mittelfranken, nördliches Schwaben, nördliches Oberbayern, Niederbayern sowie die südliche Oberpfalz)**

Diese Gebiete sind gegenwärtig durch eine im deutschen Vergleich überdurchschnittliche Anzahl von Tagen mit (teilweise Stark-)Niederschlag und Frostvorkommen charakterisiert. In Zukunft werden insbesondere die sommerlichen Temperaturen stark zunehmen, was zu einer Zunahme von heißen Tagen und Tropennächten führen wird. Für das Alpenvorland wird durch das prognostizierte Wachstum von Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen sowie weiterer Infrastrukturen eine deutliche Verstärkung der oben beschriebenen Auswirkungen erwartet. Insbesondere in den Siedlungsbereichen ist mit besonders häufigen Überschwemmungen durch Starkregen sowie mit der Entstehung besonders ausgeprägter urbaner Hitzeinseln zu rechnen.

**Bayerischer Alpenraum**

Im durch seine Natur und die Artenvielfalt gekennzeichneten bayerischen Alpenraum zeichnen sich deutliche Klimaveränderungen ab. Die Temperaturen werden hier ganzjährig im Deutschlandvergleich überdurchschnittlich ansteigen, sodass die Schneefallgrenze steigen und die Schneeschmelze früher einsetzen wird. Weiterhin kommt es zu einer zunehmenden Ungleichverteilung der Niederschläge über das Jahr: Im Winter werden Niederschläge (v. a. Starkregeneignisse) zunehmen, im Sommer abnehmen.

Abbildung 12  
Erwartete klimatische Veränderungen und Handlungsfelder in den Regionen Deutschlands



## 02.2 Anstieg des Meeresspiegels und Abtauen der Eisschilde

Der Anstieg des Meeresspiegels resultiert zum einen aus der Erwärmung der Ozeane (warmes Wasser dehnt sich aus) und zum anderen aus dem Abtauen von Landeis, also von Gletschern und Eisschilden. Das Abtauen von Meer- und Schelfeis (z. B. in der Arktis) hat keinen wesentlichen Einfluss auf den Meeresspiegel, da es sich bereits im Wasser befindet. Im Jahr 2014 hatte die Ausdehnung des Meerwassers infolge der Erwärmung einen Anteil von 31 Prozent am gesamten Anstieg des Meeresspiegels und das Abtauen der Eiskörper einen Anteil von 62 Prozent. Die restlichen sieben Prozent resultierten aus Wasserspeichern an Land (z. B. Grundwasserentnahme). Insgesamt ist der Meeresspiegel zwischen 1880 und 2013 um 23 Zentimeter gestiegen, wobei sich die Geschwindigkeit des Anstiegs zunehmend erhöht hat.<sup>37</sup> Von dem Anstieg des Meeresspiegels grundsätzlich besonders gefährdet sind u. a. Tiefländer mit Meerzugang sowie Länder mit niedrig gelegenen Küstenebenen, küstennahen Senkungsgebieten oder großen Deltabereichen. Dies betrifft v. a. viele Küsten im asiatischen Raum, die Westküste Nordamerikas sowie die Nordküsten Europas.<sup>38</sup>

Der weltweit größte Eiskörper auf Land ist das antarktische Eisschild. Sein komplettes Abschmelzen würde den Meeresspiegel um etwa 58 Meter erhöhen. Insgesamt hat das Eisschild – insbesondere infolge von wärmerem Meerwasser – zwischen 2009 und 2017 jährlich rund 250 Mrd. Tonnen an Masse verloren, deutlich mehr als in den Jahren zuvor.<sup>39</sup> Während das Abschmelzen des gesamten antarktischen Eisschildes nicht absehbar ist, liegt der gegenwärtige Temperaturanstieg bereits am unteren Rand für den kritischen Schwellenwert des weltweit zweitgrößten Eisschildes (Grönland). Zwischen 2002 und 2016 betrug der jährliche Massenverlust des grönländischen Eisschildes rund 280 Mrd. Tonnen, was einen jährlichen Anstieg des Meeresspiegels von rund 0,8 Millimeter zur Folge hatte.<sup>40</sup> Damit hat sich der Massenverlust des grönländischen Eisschildes seit 1980 versechsfacht.<sup>41</sup> Das komplette Abtauen des grönländischen Eisschildes würde den Meeresspiegel um insgesamt etwa sieben Meter erhöhen,<sup>42</sup> ist aber auch in der längeren Frist nicht absehbar – zumal das Eisschild an einigen Stellen bis zu 3.000 Meter dick ist. Bereits von einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter wären allein in Europa rund 13 Mio. Menschen betroffen.<sup>43</sup>

Einige Studien erwarten bis 2030 einen Anstieg des Meeresspiegels um 0,09 bis 0,24 Meter und bis 2040 einen Anstieg von 0,13 bis 0,41 Meter. Bis zum Jahr 2100 wird ein globaler Anstieg des Meeresspiegels zwischen 0,3 und 2,5 Metern erwartet.<sup>44</sup> Die Schätzungen zeigen zwar eine große Bandbreite, sie kommen aber alle zum Ergebnis, dass der Meeresspiegel weiter ansteigen wird. Gleichwohl können die lokalen Anstiege des Meeresspiegels deutlich vom globalen Meeresspiegelanstieg abweichen.<sup>45</sup>

## 02.3 Folgen des Klimawandels für ausgewählte Lebens- und Wirtschaftsbereiche

Der Klimawandel wirkt sich in vielfältiger Art und Weise auf zahlreiche Lebens- und Wirtschaftsbereiche aus (Abbildung 13). Mit Fortschreiten der Erderwärmung werden die Folgen sowohl im Umfang als auch in der Intensität in Zukunft spürbar zunehmen. Nicht nur weltweit, sondern

auch in Deutschland und Bayern sind Folgen absehbar. Bspw. sind Dürreperioden und Starkregenereignisse in Deutschland in den vergangenen Jahren zunehmend ins öffentliche Bewusstsein gerückt.

37 Nelles und Serrer, 2018.

38 Kelletat, 1999; Germanwatch, 2013.

39 Rignot et al., 2019.

40 Nelles und Serrer, 2018.

41 Mougnot et al., 2019.

42 Nelles und Serrer, 2018.

43 International Ocean Institute, 2010.

44 NOAA, 2017.

45 IPCC, 2013.

Abbildung 13

### Vom Klimawandel betroffene Lebens- und Wirtschaftsbereiche



Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

Den Stand der Wissenschaft zu den Folgen des Klimawandels und seiner Wirkungsketten ausführlich darzustellen, würde den Umfang der vorliegenden Studie sprengen. Daher beschränken sich die Ausführungen auf die Nennung wesentlicher Lebens- und Wirtschaftsbereiche, die von Klimafolgen betroffen sind:

#### – Menschliche Gesundheit

Gefahren für die menschliche Gesundheit (z. B. vermehrte Todesfälle infolge der Zunahme starker Hitzeperioden und Extremwetterereignisse sowie der schnelleren Verbreitung bestimmter Krankheitserreger<sup>46</sup>)

#### – Landwirtschaftliche Produktivität

Beeinträchtigung der landwirtschaftlichen Produktivität (z. B. durch vermehrte Dürreperioden, stärkere Erosion infolge von Starkregen oder durch verbesserte Bedingungen für Schädlinge<sup>47</sup>)

#### – Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen

Bedrohung von Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen<sup>48</sup> (z. B. infolge der begrenzten Anpassungsfähigkeit und -geschwindigkeit der Tier- und Pflanzenwelt<sup>49</sup>)

#### – Ökosysteme

Bedrohung von Ökosystemen (z. B. Rückgang von Pilzen mit noch wenig absehbaren Folgen,<sup>50</sup> Absinken des Grundwasserspiegels aufgrund einer geringeren Grundwasserneubildung bei zunehmender Trockenheit in bestimmten Regionen<sup>51</sup>)

#### – Wasserwirtschaft

Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft (z. B. Sinken des Grundwasserpegels, Perioden geringer Flusstiefe und vermehrte Hochwasserereignisse<sup>52</sup>)

46 UBA, 2019c; Stark et al., 2009.

Unabhängig davon, ob der Klimawandel Einfluss auf die Verbreitung von Covid-19 hat, zeigt die aktuelle Corona-Pandemie, welche Folgen eine schnelle Verbreitung bisher unbekannter oder vernachlässigter Krankheiten haben kann.

47 UBA, 2019c.

48 Ökosystemdienstleistungen bezeichnet den Nutzen bzw. „Vorteile“, die Menschen (häufig auch unbewusst) aus den ökologischen Systemen ziehen, bspw. die Bestäubung durch Insekten, die natürliche Filtration von Wasser sowie die Bereitstellung von natürlichen Ressourcen (z. B. Holz, Nahrung).

49 The Economist Intelligence Unit, 2015.

50 Willis, 2018.

51 Mosbrugger et al., 2014; Cuthbert et al., 2019.

52 UBA, 2019c.

- **Bausektor und Infrastrukturen**  
Auswirkungen auf Bausektor und Infrastrukturen (z.B. Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Hagel, Starkregen und Stürme<sup>53</sup>)
- **Energiewirtschaft**  
Auswirkungen auf die Energiewirtschaft (z.B. erschwerte Kühlung von Großkraftwerken und Produktionsanlagen sowie sturmbedingte Beeinträchtigungen des Stromnetzes<sup>54</sup>)
- **Tourismus**  
Auswirkungen auf den Tourismus (z.B. Abnahme der Schneesicherheit in den Skigebieten und Anstieg des Tourismus an der Nord- und Ostseeküste<sup>55</sup>)
- **Finanzsektor**  
Auswirkungen auf den Finanzsektor sind in Kasten 5 dargestellt

Die Folgen des Klimawandels können regional und lokal sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Dies wird am Beispiel Tourismus deutlich. Hier können die Folgen an einem Ort zu einem Anstieg der Anzahl an Touristen (z.B. bestimmte deutsche Mittelgebirgs- und Küstenregionen) und an einem anderen Ort zu einem Verlust an Attraktivität für den Tourismus (z.B. Skigebiete im Alpenvorland) führen.

Die regionale Variation der Klimafolgen bedingt, dass bestimmte Länder eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels aufweisen (Teil II Kapitel 02.4.2). Dies kann u.a. Migrationsbewegungen auslösen bzw. verstärken. Insgesamt wird erwartet, dass die gesamtwirtschaftlichen Kosten mit zunehmendem Klimawandel steigen (Teil II Kapitel 02.4.1). Damit rücken vermehrt Maßnahmen zur Emissionsminderung bzw. -vermeidung sowie zur Anpassung an den Klimawandel und dessen Folgen in den Fokus (Teil III).

**Kasten 5  
Auswirkungen im Finanzsektor**

Im Finanzsektor bestehen Risiken des Klimawandels insbesondere durch „gestrandete Vermögenswerte“ (stranded assets), die vor Ende ihrer wirtschaftlichen Nutzungsdauer infolge des Klimawandels oder der politischen Klimamaßnahmen (z.B. Einführung eines CO<sub>2</sub>-Preises, Abschaltung von Kohlekraftwerken) deutlich an Wert verlieren. Dies betrifft vor allem Rohstoffunternehmen, die massiv an Wert verlieren könnten. Eine zunehmende Anzahl institutioneller Investoren hat sich bereits zum Desinvestment aus fossilen Anlagen bekannt. Die Auswirkungen „gestrandeter Vermögenswerte“ gehen aber über die Unternehmen hinaus und betreffen auch Staat und Gesellschaft, bspw.:

- Rückgang der Staatseinnahmen aus dem Verkauf fossiler Energieträger
- Rückgang der Gewinne von Unternehmen, deren Tätigkeiten stark mit fossilen Energieträgern verbunden bzw. emissionsreich sind (und Rückgang der öffentlichen Einnahmen aus der Besteuerung dieser Unternehmen)
- Abnahme der Rendite aus Investitionen in gestrandete Vermögenswerte
- Desinvestitionen aus gestrandeten Vermögenswerten, u.a. da diese mit erhöhten Risiken verbunden sind (z.B. Desinvestitionen von Pensionsfonds)

- Finanzierungsbedingungen für Unternehmen, deren Tätigkeiten stark mit fossilen Energieträgern verbunden bzw. emissionsreich sind

Vor diesem Hintergrund haben sich in den vergangenen Jahren finanzwirtschaftliche Ansätze und Instrumente zur (gezielten) Finanzierung grüner Investitionen entwickelt, die oftmals unter dem Stichwort „Green Finance“ – oder weiter gefasst „Sustainable Finance“ – diskutiert werden. In Deutschland variieren die Finanzierungsbedingungen für grüne Investitionen deutlich zwischen den Bereichen bzw. Sektoren (z.B. energetische Gebäudesanierung vs. Windparks).

In Deutschland entwickelt sich der Bereich **Green Bonds** etwas weniger dynamisch als in vielen anderen Ländern. Dies dürfte nicht zuletzt damit in Verbindung stehen, dass Green Bonds zuletzt vermehrt von Staaten begeben wurden (z.B. Polen, Frankreich, Irland, Belgien, Niederlande). Deutschland folgte erst im August 2020 mit einer grünen (Zwillings-)Anleihe. Um die hohe Bedeutung und Liquidität der Bundesanleihen nicht zu gefährden, wurde die Anleihe parallel zu einer konventionellen Anleihe emittiert und ist mit dieser konvertierbar.

53 UBA, 2019c.  
54 UBA, 2019c.  
55 OECD, 2007.

**02.4 Kosten des Klimawandels bzw. Nichthandelns**

**02.4.1 Gesamtwirtschaftliche Kosten**

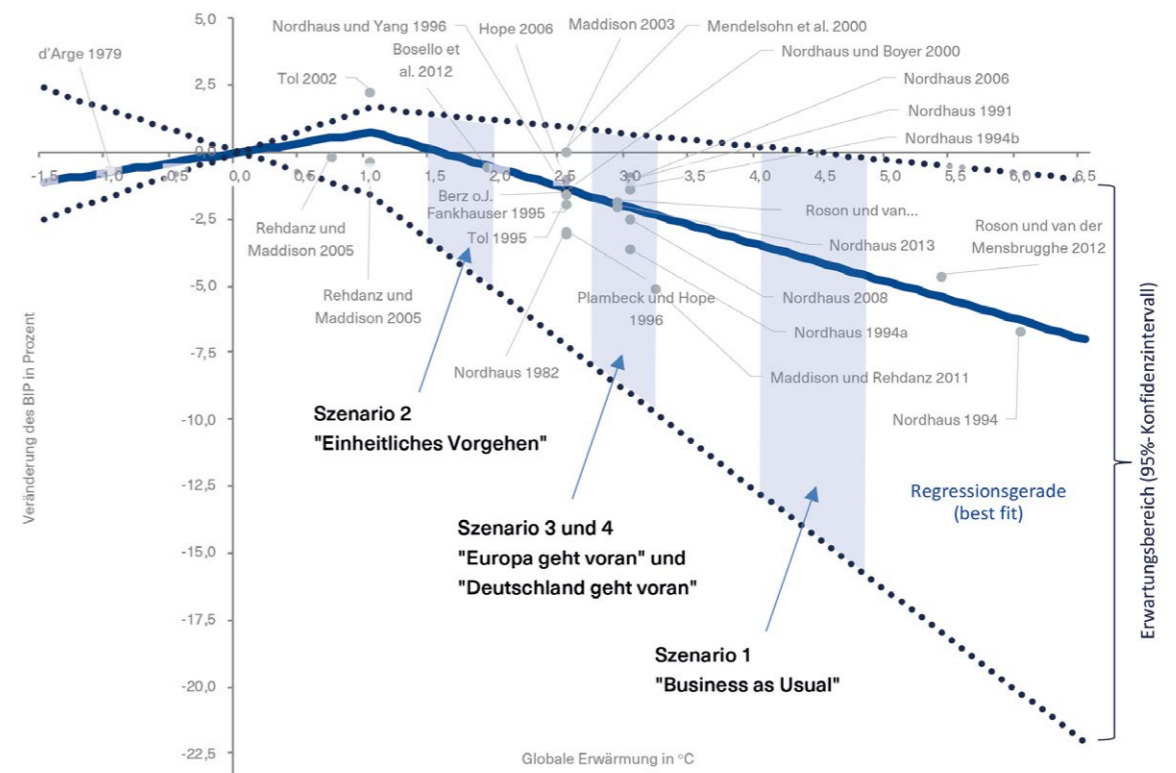
Angesichts der vielfältigen Folgen des Klimawandels in allen Lebens- und Wirtschaftsbereichen wird erwartet, dass die Kosten mit zunehmendem Klimawandel steigen. Allerdings sind die Kosten eines fortschreitenden Klimawandels aufgrund bestehender Unsicherheiten a priori nur schwer zu quantifizieren. Bspw. sind die regionalen Ausprägungen der Klimaveränderungen und die Eintrittswahrscheinlichkeiten von gewissen Klimaereignissen unsicher. Kostenschätzungen beruhen daher im Wesentlichen auf Annahmen über bestimmte Wahrscheinlichkeiten und stellen keine Kausalitäten dar. Damit können die Kosten des Klimawandels sinnvoll allenfalls in einer Bandbreite möglicher Erwartungen angegeben werden.

die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen einer geringen globalen Erwärmung zuerst positiv (z.B. infolge verbesserter Bedingungen für die Landwirtschaft) und ab etwa 1,5 bis 2 Grad C globaler Erwärmung negativ sind. Spätestens ab diesem Temperaturbereich steigen die gesamtwirtschaftlichen Kosten mit weiter fortschreitendem Klimawandel deutlich an. Klimaschutzmaßnahmen mit dem Ziel, die weltweite Erwärmung auf unter 2 Grad C zu begrenzen, dürften sich bei Betrachtung der Klimafolgekosten auf globaler Ebene also volkswirtschaftlich tendenziell „lohnen“. Allerdings betreffen die gesamtwirtschaftlichen Kosten des Klimawandels nicht alle Länder gleichermaßen. Vielmehr hängen sie u.a. von der Vulnerabilität der einzelnen Volkswirtschaften ab (siehe nächstes Kapitel).

Abbildung 14 zeigt den Erwartungsbereich der jährlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten des Klimawandels auf globaler Ebene. Grundlage bilden die Schätzwerte bestehender Studien. Die Ergebnisse sind von den getroffenen Annahmen abhängig (u.a. vom Ausmaß der erfassten Veränderungen wie bspw. Gesundheitsbeeinträchtigungen), mit Unsicherheiten behaftet und folglich mit Vorsicht zu interpretieren. Gleichwohl geben sie Hinweise darauf, dass

In Teil IV der vorliegenden Studie werden die Auswirkungen verschiedener **klimapolitischer Szenarien** analysiert. Eine globale Erwärmung von unter 2 Grad C wird dabei nur im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ erreicht; die anderen betrachteten Szenarien sind mit einer deutlich stärkeren globalen Erwärmung verbunden (um bis zu 4,8 Grad C im Szenario „Business as Usual“).

Abbildung 14  
Schätzwerte zu den gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels



Veränderung des Einkommens in Abhängigkeit von der Zunahme der globalen mittleren jährlichen Oberflächenlufttemperatur seit vorindustrieller Zeit. Die Schätzwerte der einzelnen Studien sind jeweils als Punkt dargestellt.

Quelle: Tol, 2018; eigene Darstellung Prognos, 2020

Die tatsächlichen Auswirkungen des Klimawandels sind hochgradig regionsspezifisch und hängen nicht nur von den zu erwartenden Temperaturen, den zu starken oder ausbleibenden Niederschlägen oder anderen Extremereignissen ab, sondern vor allem auch von der Exposition einzelner Regionen und ihrer Vulnerabilität. Erste detaillierte Untersuchungen sind für ausgewählte Regionen durchgeführt worden. Für die EU-Mitgliedstaaten sei hier besonders auf die Forschungsarbeiten in den Projekten PESETA<sup>66</sup> oder COACH verwiesen. In den PESETA-Projekten werden u. a. unter Einsatz einer Reihe von agrarwissenschaftlichen, hydrologischen und forstwissenschaftlichen Bottom-up-Modellen die Auswirkungen des Klimawandels für die Regionen Europas unter verschiedenen Klimawandelszenarien quantifiziert. Die letzte Ausgabe der PESETA-Untersuchungsreihe beschreibt die Ergebnisse wie folgt: „Die PESETA IV-Studie [...] zeigt, dass Ökosysteme, Menschen und Volkswirtschaften in der EU mit erheblichen Auswirkungen des Klimawandels konfrontiert sein werden, wenn wir nicht dringend die Treibhausgas-Emissionen verringern oder uns an den Klimawandel anpassen. Die Last des Klimawandels zeigt ein deutliches Nord-Süd-Gefälle, wobei die südlichen Regionen in Europa durch die Auswirkungen von extremer Hitze, Wasserknappheit, Dürre, Waldbränden und Verlusten in der Landwirtschaft viel stärker betroffen sind. Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad C würde die Auswirkungen des Klimawandels in Europa erheblich verringern. Die Anpassung an den Klimawandel würde die unvermeidbaren Auswirkungen auf kosteneffiziente Weise weiter minimieren, wobei die Lösungen, die auf der Natur basieren, beträchtliche Vorteile mit sich brächten.“

Für die Länder der EU sind die gesundheitlichen Schäden von größter Bedeutung, jedoch auch von der größten Unsicherheit gekennzeichnet, da die genaue Auswirkung etwa invasiver Krankheiten, wie man auch in der aktuellen Pandemie sieht, nur schwerlich antizipierbar sind. Neben Krankheiten wirken sich gestiegene Temperaturen vor allem auf die Arbeitsproduktivität von Menschen aus, wie die Hitzewellen der vergangenen Jahre eindrucksvoll ahnen ließen. Für die hier untersuchten Szenarien bedeutet dies, dass mit gleicher Beschäftigung in den Szenarien mit hohen Emissionen weniger Output produziert werden kann und somit die ohnehin nicht großen Wachstumsunterschiede dadurch noch nivelliert werden. Die ökonomischen Effekte des Klimawandels und der Klimawandelanpassung in Deutschland sind in Kasten 6 dargestellt.

#### Kasten 6 Ökonomische Effekte des Klimawandels und der Klimawandelanpassung in Deutschland

In den vergangenen 20 Jahren wurde Deutschland von zahlreichen Extremwetterereignissen wie Stürmen, Starkregenereignissen und extremen Hitzeereignissen getroffen. Beispiele sind der Sturm Kyrill (2007) mit 4,7 Mrd. Euro Schaden, das Unwetter Ela (2014) in Nordrhein-Westfalen und der Starkregen in Münster (2014), der das öffentliche Leben stark beeinträchtigt hat. Die geringen Niederschläge der Jahre 2018 und 2019 beeinträchtigten die Schifffahrt und vom Transport abhängige Industrien (z. B. BASF) sowie Kraftwerke und Produktionsanlagen, die Wasser zur Kühlung benötigen, landwirtschaftliche Erträge und die Hitze dieser Sommer nicht zuletzt die Gesundheit der Bevölkerung. Die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) will die Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt widerstandsfähiger gegenüber Klimaänderungen und deren Folgen machen und wird seit 2008 fortlaufend weiterentwickelt und ergänzt (Teil III Kapitel 01). Allerdings sind Anpassungen an die globale Erwärmung in der Regel teurer als verpasste Vermeidungsoptionen, die daher im Fokus der vorliegenden Studie stehen.

Anpassungsmaßnahmen haben zwei typische Effekte. Zum einen vermindern sie die durch das Extremereignis oder den graduellen Temperaturanstieg entstandenen Schäden und damit die Defensivausgaben, die nach Schadensereignissen ohne Anpassung fällig werden. Zum anderen erfordern sie oftmals regelmäßige Investitionen bspw. zur Ertüchtigung von Infrastruktur. Diese Effekte können im Zusammenspiel miteinander wie mit dem Rest der Ökonomie eine positive, neutrale oder negative Bilanz aufweisen; meistens überwiegen die positiven Effekte der Anpassung.

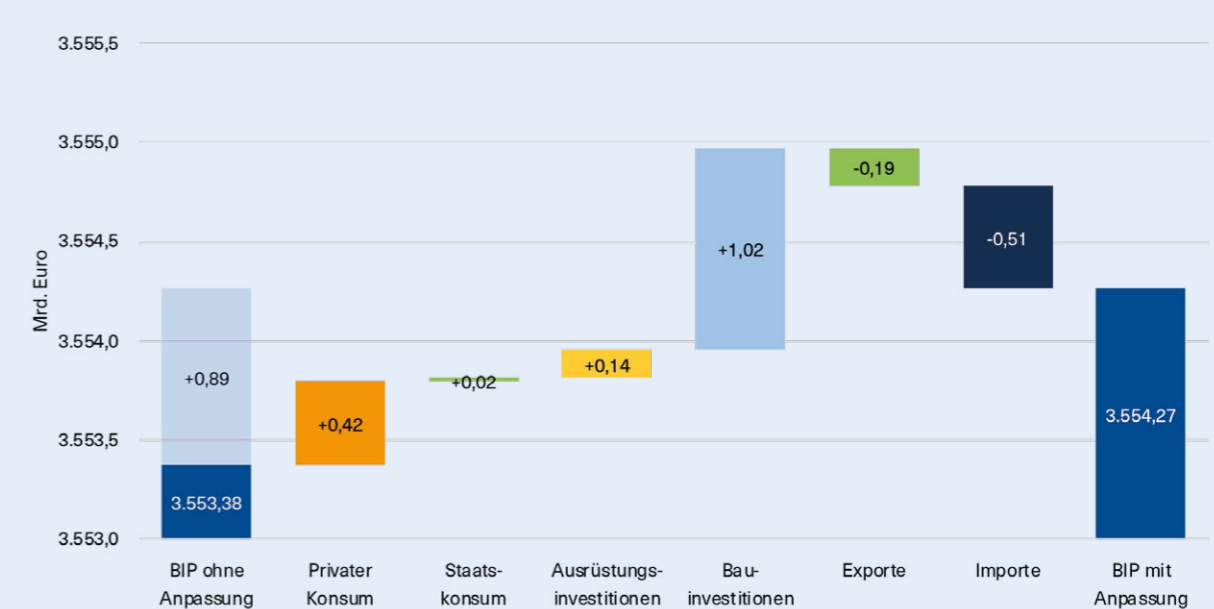
In der Untersuchung Lehr et al. (2020) werden ausgewählte Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel einer vertieften ökonomischen Analyse unterzogen. Es werden die ökonomischen Auswirkungen der Extremwetterereignisse Sturm, Starkregen und Hitzewellen, bezogen auf die Infrastruktur, die Arbeitsproduktivität, den Konsum und die Produktionsmöglichkeiten, untersucht und Schäden durch graduellen Temperaturanstieg in der Forstwirtschaft betrachtet. Anpassungsmaßnahmen, die von Lehr et al. (2020)

untersucht werden, umfassen die Ertüchtigung von Infrastruktur, naturnahe Wasserbewirtschaftung und Verbesserung des städtischen Klimas ebenso wie informatorische und planerische Instrumente.

Die mit Anpassungsmaßnahmen verbundenen notwendigen Investitionen bleiben im Volumen deutlich hinter den Investitionen in Klimaschutz zurück; sie sind eher durch einen steten Pfad und Aufwendungen gekennzeichnet, die sich gut in ohnehin anstehende Maßnahmen integrieren lassen. Die Anpassung von Verkehrsinfrastruktur an Sturm, Starkregen und Hitzewellen bspw. löst Bauinvestitionen, Arbeiten im Garten- und Landschaftsbau und in weiteren Sektoren aus. Die gesamtwirtschaftlichen Feedbackschlei-

fen umfassen zum Beispiel die Ertüchtigung von Stromnetzen und damit verbundene Investitionen, die erhöhte Abschreibungen im Energiesektor, höhere Stückkosten und letztlich höhere Energiepreise auslösen, die auf die Endprodukte überwälzt werden können. Bauinvestitionen führen zu einem Produktionsanstieg in vielen Sektoren und einem positiven Effekt auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP), zusätzliche Einkommen tragen zu diesem positiven BIP-Effekt bei. Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Veränderungen der Komponenten des BIP im Vergleich zu einem Szenario ohne Anpassung für die Maßnahmen am Stromnetz für ein Jahr, in dem es zu Sturmereignissen kommt. Durch die Anpassungsmaßnahmen werden die Schäden am Netz selbst ebenso gemindert wie die Ausfälle in der Industrie.

Abbildung 15  
BIP-Effekte durch Anpassung: Komponenten des BIP (real), Jahr 2033, Stromnetz



Quelle: GWS, Lehr et al. (2020)

### 02.4.2 Vulnerabilität und Klimaschäden im internationalen Vergleich

Das Konzept der Vulnerabilität dient der umfassenden Bewertung der Verwundbarkeit eines Landes gegenüber dem Klimawandel und dessen Folgen. Zur Bewertung können folgende drei Faktoren dienen:<sup>57</sup>

- **Exposition** gegenüber direkten Klimaveränderungen, die Länder nicht unmittelbar beeinflussen können (z.B. Extremwetter bzw. Naturgefahren),
- **Anfälligkeit** der (sozioökonomischen) Systeme gegenüber Störungen und
- **Bewältigungskapazität** der Systeme im Umgang mit den Folgen der Störungen bzw. der Kompensation ihrer Auswirkungen.

Die beiden letzteren Faktoren sind insofern relevant, als dass eine starke Exposition allein keine starke Vulnerabilität bedingt, sofern das System gut auf die jeweiligen Folgen ausgerichtet ist, also eine niedrige Anfälligkeit und hohe Bewältigungskapazität hat (Resilienz).<sup>58</sup> Die Anfälligkeit der Systeme gegenüber den Klimaveränderungen steht u. a. in engem Zusammenhang mit den menschlichen Siedlungs- und Wirtschaftsaktivitäten (z.B. Anzahl von Gebäuden, Infrastrukturen, versiegelten Flächen, Wirtschaftsstruktur) sowie den demografischen Faktoren (z.B. Alter der Einwohner, Bevölkerungsdichte).

#### Exposition gegenüber direkten Klimaveränderungen und Naturgefahren

Der Klimawandel führt praktisch in allen Regionen der Welt zu einem Anstieg der Temperaturen. Damit verändert sich die Anzahl klimatologischer Kenntage, an denen ein bestimmter Schwellenwert eines Klimaparameters überschritten wird. So ist in Deutschland und Bayern bspw. eine Zunahme der Hitzetage über 30 Grad C und eine Abnahme der Frosttage zu verzeichnen. Zudem haben die Häufigkeit und Intensität von Hitzeperioden zugenommen. Mit fortschreitendem Klimawandel wird sich die Anzahl von Kenntagen in Zukunft weiter verändern.<sup>59</sup>

Neben der Veränderung der Kenntage erhöht die globale Erwärmung die Eintrittswahrscheinlichkeit für bestimmte Arten von Extremwetterereignissen und Naturgefahren in bestimmten Regionen. Diesbezüglich kann die regionale

Exposition gegenüber Klimaveränderungen anhand der geografischen Verteilung der bisherigen erfassten Naturgefahren, wie Erdbeben, Wirbelstürme, Überschwemmungen, Dürren und dem Anstieg des Meeresspiegels, bestimmt werden (Daten hierzu bietet bspw. die UNEP/UNDRR Global Risk Data Platform). Eine relativ hohe Gefährdung der Bevölkerung durch Naturgefahren weisen demnach insbesondere viele Länder in Afrika, Asien und Ozeanien auf. (Mittel-)Europa und insbesondere Deutschland sind Naturgefahren hingegen tendenziell weniger ausgesetzt.<sup>60</sup>

In Deutschland und Bayern verursachen Extremwetterereignisse regelmäßig hohe Schadenskosten (Abbildung 16). Im Jahr 2018 betrug der Schadensaufwand durch Naturgefahren in der Sachversicherung 2,6 Mrd. Euro, davon entfielen Schäden in Höhe von 252 Mio. Euro auf Bayern.<sup>61</sup> Die Schadensstatistik wird zwar durch Ausreißer infolge singulärer Extremereignisse, wie bspw. die Hochwasser von 2002 und 2013, geprägt. In der längerfristigen Betrachtung zeigt sich aber zumindest seit 1995 ein Wachstumstrend der Sachversicherungsschäden. Eine Rolle dürfte dabei nicht zuletzt die steigende Absicherung gegen Schäden spielen. So wurden bspw. beim Elbehochwasser 2002 etwa 30 Prozent der Schäden von Versicherungen übernommen, beim Elbehochwasser 2013 waren es rund 45 Prozent.<sup>62</sup>

Im internationalen Vergleich sind die Schadenssummen durch wetterbedingte Ereignisse (u.a. Stürme, Überschwemmungen sowie Temperaturextreme) im Zeitraum von 1999 bis 2018 in Deutschland und anderen großen Volkswirtschaften relativ hoch. Dies ist nicht zuletzt auch drauf zurückzuführen, dass es in diesen Ländern relativ viele Infrastrukturen gibt, die Schaden nehmen können, und die Meldemechanismen gut funktionieren. Bei der Betrachtung der Schadenssummen in Verhältnis zum BIP relativiert sich das Bild etwas. Im Ranking der Schadensquotienten von 181 Ländern (von groß nach klein) liegt Deutschland auf Platz 85; einen höheren Quotienten haben u. a. die USA (Platz 48), Indien (Platz 58), China (Platz 59) und Australien (Platz 60).<sup>63</sup>

57 Birkmann und Fleischhauer, 2013.

58 Für eine Untersuchung der Resilienz der deutschen und bayerischen Wirtschaft siehe vbw / Prognos, 2020.

59 z. B. UBA, 2019c, StMUV, 2017a.

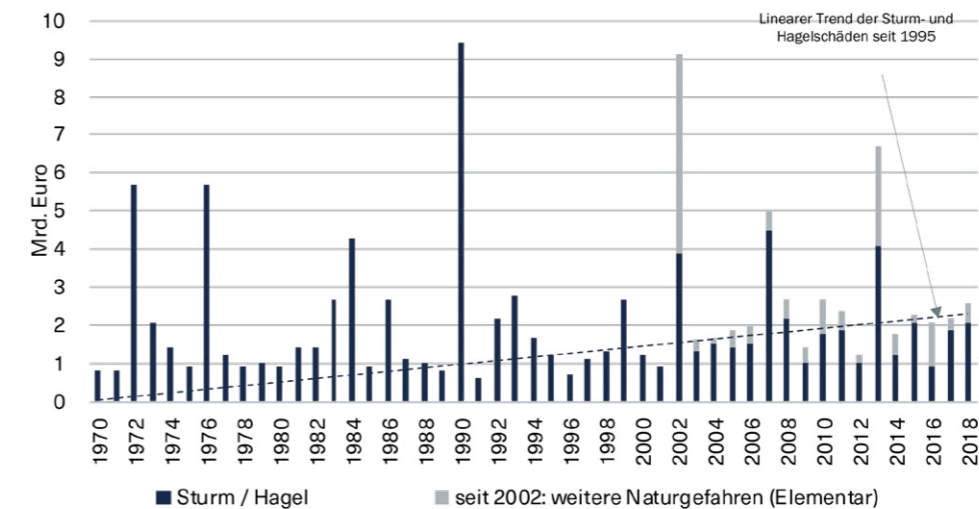
60 z. B. Fundación DARA Internacional, 2012; Bündnis Entwicklung Hilft, 2017.

61 Sachversicherung ohne Schäden in der KFZ-Versicherung (GDV, 2019).

62 DWD, 2017.

63 Germanwatch Global Climate Risk Index 2019 auf Basis der Naturkatastrophen-Datenbank von Munich Re.

Abbildung 16  
Entwicklung des jährlichen Schadensaufwands in der Naturgefahren-Sachversicherung seit 1970



Quelle: GDV, 2019; eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Indirekte Vulnerabilität durch globale Verflechtungen und Abhängigkeiten

Zur Beurteilung der Vulnerabilität reicht angesichts der globalen Verflechtungen die Betrachtung der länderspezifischen Exposition gegenüber Klimaveränderungen allein nicht aus. Vielmehr sind auch indirekte Effekte des Klimawandels einzubeziehen, die sich u. a. aus Verflechtungen bzw. Abhängigkeiten eines Landes mit anderen Ländern und den dortigen klimatischen Veränderungen ergeben (z. B. Störungen in Zulieferketten und auf Absatzmärkten).

Abbildung 17 zeigt den Transnational Climate Impacts (TCI) Index, der die indirekten Effekte umfassend abbildet. Der Index bewertet die indirekte Vulnerabilität anhand mehrerer Indikatoren zu den globalen Verflechtungen bzw. Abhängigkeiten eines Landes (Benzie et al. 2016). Dazu werden bspw. globale Handels- und Wertschöpfungsketten analysiert, entlang derer sich Klimafolgen über Ländergrenzen hinweg fortpflanzen können. Zudem umfasst der Index u. a. die Offenheit eines Landes für Asylsuchende, die Abhängigkeit von Getreide- und Wasserimporten, die Höhe der ausländischen Direktinvestitionen sowie den Anteil der Wasserversorgung, der aus grenzübergreifenden Flüssen bezogen wird.

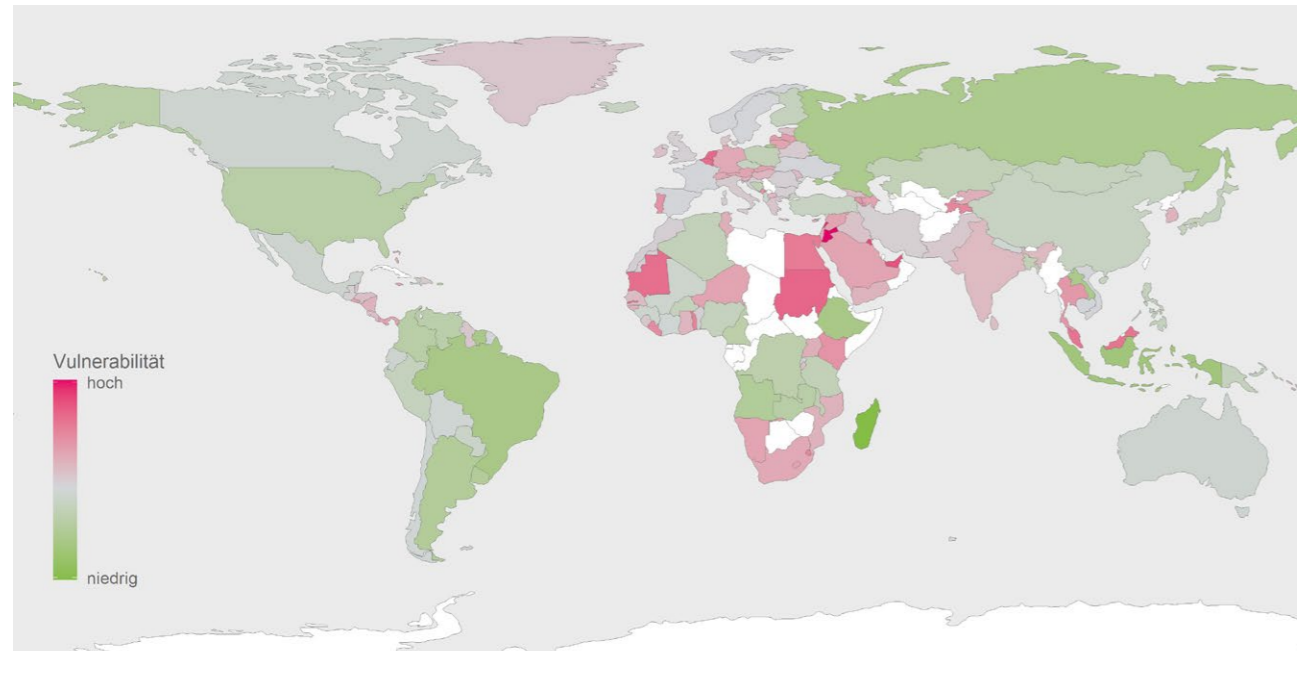
Im TCI werden 153 Länder von stark verwundbar bzw. vulnerabel (Rang 1) bis kaum verwundbar bzw. vulnerabel (Rang 153) bewertet. Insgesamt zeigt der Index eine besonders hohe indirekte Vulnerabilität in vielen Ländern Afrikas, des indischen Subkontinents sowie Europas und hier insbesondere auch Deutschlands (Abbildung 17). Deutschland liegt auf Rang 41 und schneidet damit deutlich schlechter ab als viele andere große Volkswirtschaften, bspw. Frankreich, Großbritannien, USA, China oder Russland. Die Gründe für die hohe indirekte Vulnerabilität Deutschlands liegen u. a. in den tiefen Verflechtungen Deutschlands mit globalen Wertschöpfungs- und Handelsketten, der hohen Abhängigkeit Deutschlands von ausländischen Wasserressourcen<sup>64</sup> sowie in der relativ hohen Offenheit Deutschlands für Asylsuchende.

Deutschlands Vulnerabilität resultiert also weniger aus seiner direkten Exposition gegenüber klimatischen Veränderungen bzw. Naturgefahren (wenngleich diese auch von Bedeutung sind) als vielmehr indirekt aus Veränderungen in den Regionen, mit denen es verbunden ist. Die Vulnerabilität kann die Resilienz<sup>65</sup> der deutschen Volkswirtschaft beeinträchtigen und ist durch staatliche und unternehmerische Maßnahmen zu adressieren.

64 Gemäß der AQUASTAT-Datenbank der UN Food and Agriculture Organization haben rund 30 Prozent der Wasserressourcen Deutschlands ihren Ursprung außerhalb des Landes.

65 Resilienz bezeichnet nicht das Streben nach Autarkie oder Renationalisierung, sondern „die Fähigkeit, tatsächliche oder potenziell widrige Ereignisse einzukalkulieren, sich darauf vorzubereiten, sie abzuwehren oder sie zu verkraften, sich davon zu erholen, aus den Erfahrungen zu lernen, sich anzupassen und sich deshalb immer erfolgreicher aufzustellen (Zukunftsrat der Bayerischen Wirtschaft, 2020: 3).

Abbildung 17  
Indirekte Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels



Quelle: Benzie et al., 2016; Stockholm Environment Institute (SEI) Transnational Climate Impacts Index; eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Klimawandelbedingte Risiken in den Lieferketten der Industrie in Bayern

Hinweise zu den klimawandelbedingten Risiken in den unternehmerischen Lieferketten können aus der Abhängigkeit von Importen bzw. Vorleistungen insgesamt sowie von Importen bzw. Vorleistungen aus bestimmten Ländern abgeleitet werden. In der Regel ist eine höhere Importabhängigkeit mit einer größeren Gefährdung durch andersorts auftretende Klimarisiken verbunden. Dies gilt grundsätzlich auch für den Export bzw. die Exportabhängigkeit. Die daraus resultierenden Risiken für Unternehmen sind aber tendenziell geringer als bei der Importabhängigkeit, da Unternehmen – anders als bei Vorleistungsimporten – häufig eine Vielzahl von Absatzmärkten bedienen und auch bei Störungen auf einem Markt weiter produzieren und exportieren können. So zeigt eine aktuelle Studie<sup>66</sup>, dass die Abhängigkeit deutscher Unternehmen von einem einzelnen Markt oder sehr wenigen zentralen Märkten bei den Vorleistungsexporten geringer ist als bei den Importen.

Abbildung 18 zeigt die drei Industriebranchen mit der höchsten Importabhängigkeit (definiert als Anteil der importierten Vorleistungen am Produktionswert) in Deutschland sowie die drei Branchen mit dem höchsten Produktionswert in Bayern. Insgesamt betrug der Produktionswert im verarbeitenden Gewerbe in Bayern im Jahr 2018 rund 260,3 Mrd. Euro. Die drei größten Industriebranchen in Bayern waren die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, der Maschinenbau sowie die Herstellung elektrischer Ausrüstungen, die zusammen über die Hälfte des gesamten Produktionswerts im verarbeitenden Gewerbe ausmachten. Die Importabhängigkeit dieser Branchen liegt zwischen 17 und 21 Prozent. Die Industriebranchen mit der größten Importabhängigkeit ist mit Abstand die Erzeugung von Kokerei- und Mineralölerzeugnissen mit 67,5 Prozent; es folgen die Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren mit 29,3 Prozent und chemische Erzeugnisse mit 25,2 Prozent.

Abbildung 18  
Branchen mit dem höchsten Produktionswert in Bayern und der höchsten Importabhängigkeit im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland

	Produktionswert (2018, Mrd. Euro)		Importabhängigkeit (2015)
	Bayern	Deutschland	Deutschland
<b>Verarbeitendes Gewerbe insgesamt</b>	<b>260,3</b>	<b>1.470,8</b>	<b>21,5%</b>
Herstellung von Kraftwagen und -teilen	77,9	289,8	21,1%
Maschinenbau	38,0	208,5	17,0%
Elektrische Ausrüstungen	19,8	77,7	20,9%
Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	2,4	26,2	67,5%
Gummi- und Kunststoffwaren	11,7	71,5	29,3%
Chemische Erzeugnisse	12,9	117,0	25,2%
<b>Restliche Branchen</b>	<b>97,6</b>	<b>680,1</b>	<b>18,6%</b>

Die Importabhängigkeit misst den Anteil der importierten Vorleistungen am Produktionswert.

Quelle: Statistisches Bundesamt und Statistisches Landesamt Bayern, Eigene Berechnungen Prognos, 2020

## 03 Treibhausgas-Emissionen

### Die weltweiten Treibhausgas-Emissionen sind seit der Industrialisierung deutlich angestiegen. Haupttreiber sind die Industrie- und Schwellenländer und der Energiesektor.

Die anthropogenen Treibhausgas-Emissionen sind Haupttreiber des Klimawandels und der globalen Erwärmung (Teil II Kapitel 01). Deshalb steht die Verringerung der Treibhausgas-Emissionen im Zentrum von Klimaschutzmaßnahmen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Entwicklung, Struktur und regionale Verteilung der globalen Treibhausgas-Emissionen. Ziel ist es, aus heutiger und historischer Perspektive aufzuzeigen, welche Staaten und Sektoren zu den bedeutendsten Emittenten gehören. Beleuchtet wird auch das Zusammenspiel von Treibhausgas-Emissionen und Wohlstand.

Gegenwärtig liegt der Anteil Deutschlands an den weltweiten Treibhausgas-Emissionen unter zwei Prozent. Damit sind die Möglichkeiten Deutschlands, den Klimawandel durch Reduktion der eigenen Treibhausgas-Emissionen direkt zu beeinflussen, gering. Es besteht jedoch die Möglichkeit für Deutschland zu zeigen, dass eine Transformation erfolgreich gelingen kann. Damit könnte Deutschland für den Klimaschutz relevante Technologiefelder (Teil IV Kapitel 04 und Teil V Kapitel 01) besetzen und sich neue Schlüsselkompetenzen erschließen, die bei fortschreitendem Klimawandel neue Export- und Wachstumsmöglichkeiten eröffnen.

#### CO<sub>2</sub> als Indikator für Treibhausgas-Emissionen

Daten zu den Treibhausgas-Emissionen sind (regional und zeitlich) nur eingeschränkt verfügbar und international nur bedingt vergleichbar, u. a. deshalb weil die Anzahl der erfassten Treibhausgase variiert. Daher werden üblicherweise die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die international vergleichbar sind und aktuell vorliegen, als Indikator für Treibhausgas-Emissionen verwendet (Kasten 7). Dieses Vorgehen wird insbesondere durch drei Aspekte legitimiert:

- CO<sub>2</sub> ist das bedeutsamste anthropogene Treibhausgas
- Länder, die viel (wenig) CO<sub>2</sub> emittieren, haben in der Regel auch einen höheren (geringeren) Ausstoß bei anderen Treibhausgasen
- Die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen wachsen deutlich schneller als die Emissionen anderer relevanter Treibhausgase wie Methan oder Lachgas, wodurch die Relevanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitverlauf tendenziell zunimmt. Bspw. waren Methan und Lachgas 2015 weltweit für rund ein Viertel des Treibhauseffekts verantwortlich, 1990 waren es noch rund 30 Prozent gewesen.

#### Inhalte

<b>03.1 Die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Überblick</b>	<b>44</b>
03.1.1 Historische Entwicklung der weltweiten CO <sub>2</sub> -Emissionen	44
03.1.2 Die weltweit bedeutendsten CO <sub>2</sub> -Emittenten	46
03.1.3 Globale und nationale Restbudgets	49
<b>03.2 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den bedeutendsten Emittentenländern</b>	<b>51</b>
03.2.1 Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen	51
03.2.2 Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Sektoren	54
03.2.3 Emissionen in Deutschland und seinen Ländern	57
<b>03.3 Emissionen und Wohlstand</b>	<b>61</b>
03.3.1 Zusammenhang zwischen Emissionen und BIP	61
03.3.2 Bestimmungsfaktoren des Zusammenhangs zwischen Emissionen und BIP	63

#### Kasten 7

#### EDGAR-Datensatz und die Bedeutung von (nicht erfassten) Waldbränden

##### EDGAR-Datensatz

Die Auswertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgt maßgeblich auf Basis des EDGAR-Datensatzes (Emission Database for Global Atmospheric Research). Der Datensatz enthält u. a. international vergleichbare Daten zu den fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen in über 200 Ländern bzw. Emittenten.<sup>67</sup> Die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen umfassen zum einen energiebedingte Emissionen aus der Umwandlung fossiler Energieträger (Verbrennung von Kohle, Erdgas oder Erdöl) in bspw. elektrische oder thermische Energie (z. B. im Verkehr) und zum anderen nicht energiebedingte Emissionen aus industriellen Prozessen (z. B. Zement- und Stahlerzeugung) und aus der Produktverwendung.<sup>68</sup> Im Datensatz nicht enthalten sind bspw. die Emissionen durch Landnutzungsveränderung oder Verbrennung von Biomasse (z. B. durch Wald- oder Torfbrände). Die regionale Zuteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgt in dem Datensatz gemäß des Produktionsprinzips. Danach werden jedem Land diejenigen Emissionen zugerechnet, die auf seinem Staatsgebiet ausgestoßen werden.

##### CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Waldbränden

In den letzten 20 Jahren gab es in den tropischen Wäldern Südostasiens und Südamerikas vermehrt große Waldbrände, v. a. in Indonesien und Brasilien. Im Jahr 2020 wüteten im brasilianischen Bundesstaat „Amazonas“ (für andere Regionen Brasiliens gibt es kaum belastbare Daten) mit über 7.000 Bränden mehr Feuer als jemals zuvor seit Beginn der Erhebungen im Jahr 1998.<sup>69</sup> Die Feuer sind in der Regel auf menschliche Eingriffe zurückzuführen (v. a. Brandrodung und Schädigung der Wälder durch Holzeinschlag) und werden durch den Klimawandel (insbesondere Dürren) begünstigt.<sup>70</sup>

Die Brände tragen auch selbst in erheblichem Umfang zur globalen Erwärmung bei, v. a. indem sie den in der Biomasse gebundenen Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> freisetzen.<sup>71</sup> Zwar nimmt die nachwachsende Vegetation wieder Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf, dies kann aber je nach Landschaft bis zu mehreren Jahrhunderten dauern. Besonders lange

dauert der Prozess bspw. in tropischen Moor- bzw. Torflandschaften, bei denen mit dem Torf (Vorstufe zu Kohle) besonders viel Biomasse verbrennt.<sup>72</sup> Studien weisen darauf hin, dass die durch alle Arten von Waldbränden weltweit freigesetzte Menge an CO<sub>2</sub> gegenwärtig etwa halb so groß ist wie die Menge der Emissionen, die auf fossile Brennstoffe zurückgeht.<sup>73</sup>

Bei Einbezug von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Waldbränden wäre bspw. Indonesien infolge großer Brände in den ausgetrockneten Torfsumpfwäldern in den Jahren 1997, 2005, 2006, 2015 und 2019 einer der weltweit größten CO<sub>2</sub>-Emittenten. Allein im Jahr 1997 betrug die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus (Torf-) Waldbränden in Indonesien schätzungsweise zwischen 2,9 und 9,1 Gigatonnen, was rund 13 bis 40 Prozent der damaligen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger entspricht<sup>74</sup> und im Jahr 2006 verursachten Torfbrandbrände in Indonesien Emissionen von schätzungsweise zwischen 98 und 180 Megatonnen, was rund zehn bis 33 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Verkehr in der gesamten EU im Jahr 2006 entspricht (dabei erfasst diese Schätzung nur etwa 13 Prozent des indonesischen Torflandes).<sup>75</sup>

Feuer im Torf sind Schwelbrände mit sehr niedriger Temperatur, die mit den bisherigen Thermalsatelliten in der Regel nicht erkannt werden können. Damit könnten neue Technologien zur (automatisierten) Früherkennung von Wald- und Torfbränden einen bedeutenden Beitrag zur Bekämpfung der Feuer und damit des Klimawandels leisten. Unternehmen und Institutionen aus Bayern arbeiten derzeit an vielversprechenden Lösungen für ein effizientes Monitoring, bspw. das FireBIRD-Satellitensystem des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Verfahren zur Kartierung von Torfflächen und zur Berechnung der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Satellitendaten von Remote Sensing Solutions (RSS) sowie die Satellitentechnik zur Früherkennung von Feuern von OroraTech (Spinn-off der Technischen Universität München).

67 Im EDGAR-Datensatz sind einige wenige Länder in Ländergruppen zusammengefasst (z. B. Frankreich und Monaco, Schweiz und Liechtenstein, Spanien und Andorra, Serbien und Montenegro, Italien, San Marino und Vatikanstadt). Zudem enthält der Datensatz einige Emittenten, die nach dem Produktionsprinzip keinen Ländern zugerechnet werden können (z. B. internationaler Schiffsverkehr, internationaler Flugverkehr). Dies ist insbesondere relevant bei der Interpretation von Länderrankings. Die vollständige Liste der 208 abgebildeten Länder ist hier einsehbar: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2019>. Die Werte für Deutschland vor der Einheit umfassen auch die DDR.

68 In Deutschland machen die energiebedingten Emissionen etwa 90 Prozent des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes aus.

69 gem. Erhebungen des Nationalen Instituts für Weltraumforschung (INPE).

70 z. B. Spektrum, 2004, Siegert et al., 2001; Konecny et al., 2016.

71 Ein Teil des Kohlenstoffs entweicht allerdings nicht in die Atmosphäre, sondern bleibt langfristig als Holzkohle im Boden gebunden (Jones et al., 2019). Zudem setzen die Waldbrände u. a. das Treibhausgas Methan frei. Die Rußpartikel, die bei unvollständiger Verbrennung von Biomasse entstehen, tragen wohl ebenfalls zur Klimaerwärmung bei (Teil II Kapitel 01.1).

72 Jones et al., 2019.

73 Bowman et al., 2009.

74 Page et al., 2002.

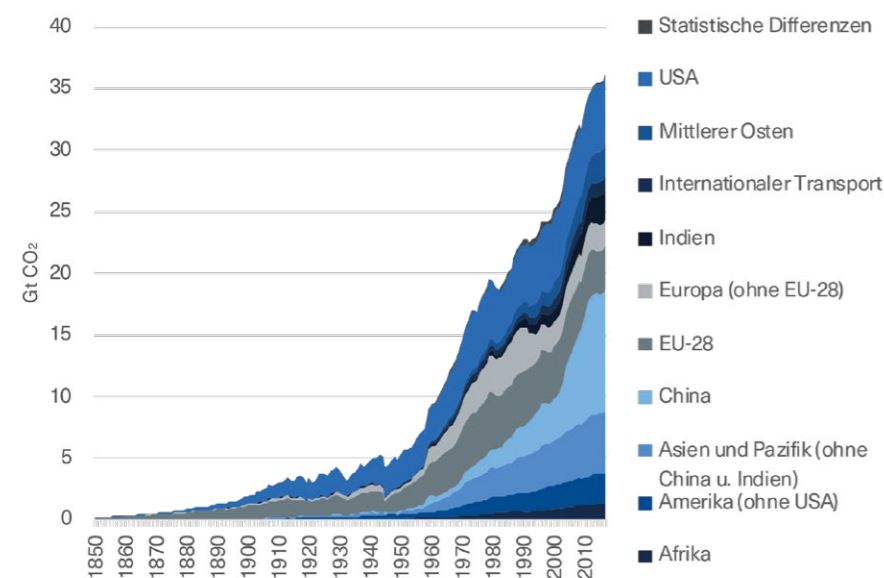
75 Ballhorn et al., 2009.

### 03.1 Die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Überblick

#### 03.1.1 Historische Entwicklung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind seit Beginn der Industrialisierung deutlich und fast stetig gestiegen. Dazu haben einzelne Länder und Regionen zu verschiedenen Zeitpunkten in unterschiedlichem Maße beigetragen (Abbildung 19). Eine erste deutliche Zunahme der Emissionen ist ab dem Jahr 1850 und damit fast 100 Jahre nach Beginn der Industrialisierung (in England) zu verzeichnen. Bis Anfang des 19. Jahrhunderts waren Europa und die USA die mit Abstand bedeutendsten Emittenten, wobei der Anteil der USA in diesem Zeitraum nahezu kontinuierlich gestiegen ist. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts gewann der Anstieg der Emissionen deutlich an Dynamik. Der Anstieg der Emissionen in den vergangenen Dekaden steht in engem Zusammenhang mit neuen bedeutenden Emittenten in Asien und hier v. a. China. Die afrikanischen Staaten verzeichneten hingegen bis zuletzt nur geringe Zuwächse. Insgesamt lagen die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Daten der Internationalen Energieagentur (IEA) auch in 2018 und 2019 höher als in allen vorangegangenen Jahren.

Abbildung 19  
Entwicklung der weltweiten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen, 1850–2017



Quelle: Ritchie und Roser, 2020e; eigene Darstellung Prognos, 2020

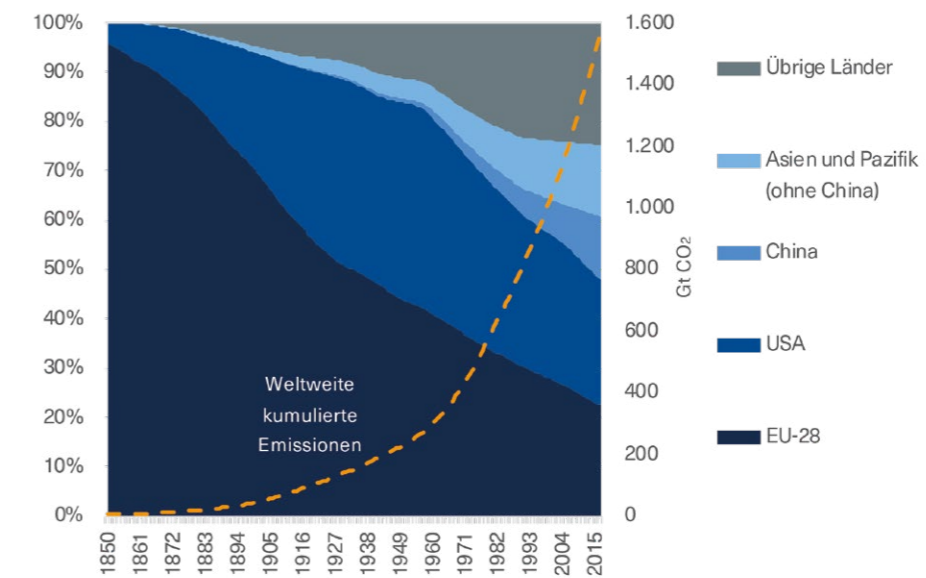
#### Kumulierte Emissionen nach Ländern und Regionen

Abbildung 20 zeigt den Anteil einzelner Länder und Regionen an den gesamten seit Beginn der Industrialisierung emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dazu wurden die jeweiligen jährlichen Emissionen von 1751 bis 2017 aufaddiert. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die Gesamtemissionen bis Mitte des 20. Jahrhunderts (kumuliert ca. 230 Gigatonnen CO<sub>2</sub>) im Vergleich zu den letzten rund 70 Jahren (kumuliert ca. 1.338 Gigatonnen CO<sub>2</sub>) relativ niedrig waren. Von den weltweit aufsummierten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden über die Hälfte erst nach 1990 ausgestoßen.

Infolge der Industrialisierung war Europa bis Anfang des 19. Jahrhunderts (fast) für die gesamten weltweiten Emissionen verantwortlich. Bis Beginn des 20. Jahrhunderts sank der Anteil Europas an den kumulierten Emissionen auf unter zwei Drittel. Gleichzeitig nahm der Anteil der USA infolge der dort schnell fortschreitenden Industrialisierung rasch zu. Im Jahr 1950 waren die USA bereits für 40 Prozent des gesamten seit der Industrialisierung emittierten CO<sub>2</sub> verantwortlich, Europa noch für 50 Prozent. Infolge der seitdem schnell wachsenden und inzwischen sehr hohen

Emissionen in Asien und hier v.a. in China sind die Anteile der USA und Europas an den kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf zuletzt rund 25 Prozent bzw. 23 Prozent gesunken. Als Folge des rasanten wirtschaftlichen Wachstums sind China und Indien mittlerweile rund 13 Prozent bzw. drei Prozent des gesamten seit der Industrialisierung emittierten CO<sub>2</sub> zuzurechnen. Allerdings zeigt Abbildung 20 auch, dass auf die Industrienationen nach wie vor ein wesentlicher (wenngleich rückläufiger) Anteil an den kumulierten Emissionen entfällt.

Abbildung 20  
Entwicklung der Anteile an den seit 1750 kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen



Die Abbildung umfasst die CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1751 und 2017. Aufgrund der sehr geringen Emissionen in den ersten 100 Jahren ist die Entwicklung erst ab 1850 dargestellt.

Lesehilfe: Die Abbildung zeigt anhand der Flächen den Anteil der einzelnen Länder bzw. Regionen an den gesamten seit Beginn der Industrialisierung emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen (linke Achse). Bspw. lag der Anteil Europas an sämtlichen seit der Industrialisierung emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 1800 bei fast 100 Prozent und 2017 bei etwa 23 Prozent. Die gestrichelte Linie zeigt die Entwicklung der kumulierten Emissionen seit 1751 (rechte Achse). Bspw. betragen die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen seit 1751 im Jahr 1950 rund 230 Gigatonnen und im Jahr 2017 etwa 1.568 Gigatonnen.

Quelle: Ritchie und Roser, 2020e; eigene Darstellung Prognos, 2020

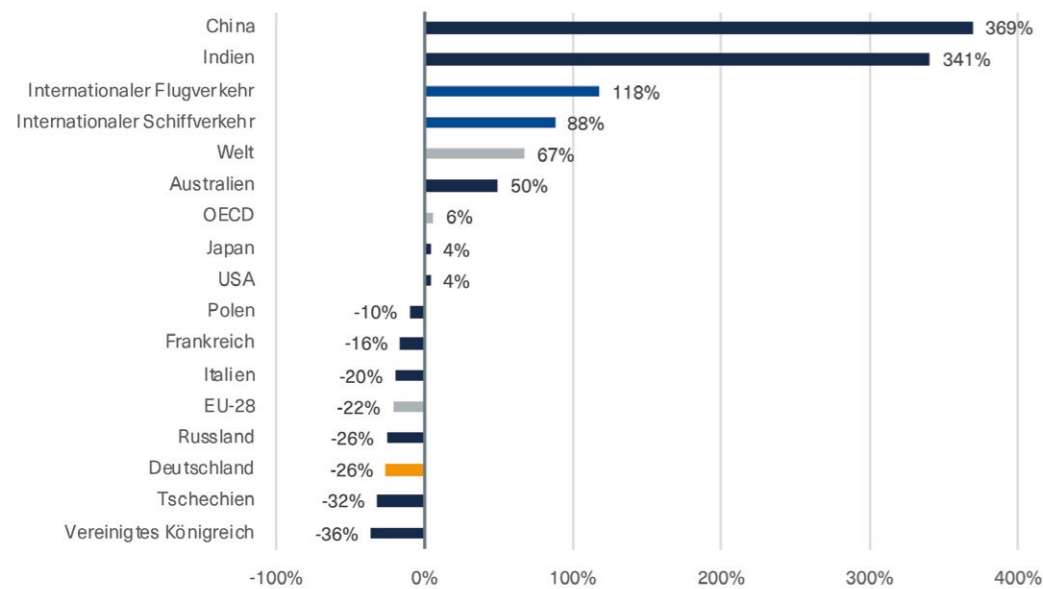
#### Rückgang der Emissionen in einzelnen Ländern

Die weltweit steigenden Emissionen verdecken, dass einzelne Länder ihre Emissionen in den vergangenen Jahren deutlich reduzieren konnten (Abbildung 21). Zwischen 1990 bis 2018 sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen über alle Länder hinweg zwar um etwa zwei Drittel gewachsen, gleichzeitig gingen die Emissionen in vielen bedeutenden Emittenteländern jedoch zurück (Abbildung 21). Besonders starke prozentuale Rückgänge sind vor allem im Gebiet der ehemaligen Sowjetunion (z. B. Ukraine -75 Prozent, Russland -26 Prozent) und in einigen europäischen Staaten (z. B. Vereinigtes Königreich -36 Prozent, Deutschland -26 Prozent, Italien

-20 Prozent, Frankreich -16 Prozent, Polen -10 Prozent) zu verzeichnen. Deutliche Steigerungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1990 bis 2018 gab es insbesondere im ostasiatischen Raum (z. B. China +369 Prozent und Indien +341 Prozent). Die internationalen Verkehrsemissionen haben sich in diesem Zeitraum etwa verdoppelt (Luftverkehr +118 Prozent, Schiffsverkehr +88 Prozent). In Japan (+4 Prozent) und den USA (+4 Prozent) sowie in den OECD-Ländern insgesamt (+6 Prozent) sind die Emissionen nur geringfügig angestiegen.



Abbildung 21  
Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1990 und 2018 in ausgewählten Ländern



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung für ausgewählte Länder mit relevanten Anteilen an den globalen Emissionen.

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

### 03.1.2 Die weltweit bedeutendsten CO<sub>2</sub>-Emittenten

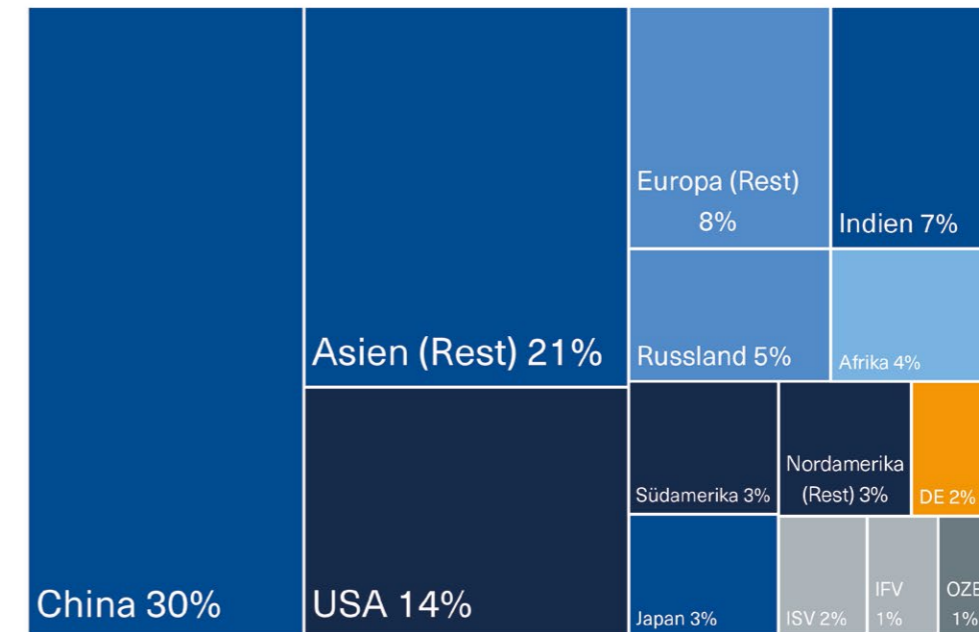
Die bedeutendsten CO<sub>2</sub>-Emittenten werden in der Regel entweder anhand der absoluten oder der einwohnerbezogenen aktuellen Emissionen identifiziert. Die Methoden führen teilweise zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen, v. a. für China, Indien und Europa.

#### Bedeutendste Emittenten bei Betrachtung absoluter CO<sub>2</sub>-Emissionen

Mit 30 Prozent der weltweiten Emissionen wies China im Jahr 2018 den mit Abstand höchsten CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf. Die USA folgten mit 14 Prozent. Ebenfalls bedeutende Emittenten waren Indien mit sieben Prozent, Russland mit fünf Prozent sowie Japan und Deutschland mit drei respektive zwei Prozent (Abbildung 22). Damit waren die sechs bedeutendsten Emittentenländer, die zusammen rund 45 Prozent der Weltbevölkerung beheimateten, für etwa 61 Prozent des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich. Ebenfalls nicht unbedeutende Emittenten sind Iran, Südkorea, Saudi-Arabien, Kanada, Indonesien, Brasilien, Mexiko, Südafrika, Türkei, Australien und das Vereinigte Königreich, die im Jahr 2018 jeweils etwa ein bis zwei Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantworteten. Alle anderen Staaten der Erde haben einen Anteil von unter einem Prozent.

Ein etwas anders Bild ergibt sich, wenn die Emissionen nicht nach dem Territorial- bzw. Produktionsprinzip (jedem Land werden die auf seinem Staatsgebiet ausgestoßenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zugerechnet), sondern nach dem Konsumprinzip ermittelt werden. Dabei werden die Emissionen demjenigen Land zugerechnet, in dem die jeweiligen Waren und Dienstleistungen konsumiert werden. Dadurch sinken tendenziell die Emissionen in den Entwicklungsländern und ölfreien Staaten (z. B. in 2018: China -15 Prozent, Indien -8 Prozent, Russland -19 Prozent) und steigen in den Industrieländern (z. B. in 2018: USA +7 Prozent, Japan +15 Prozent, Deutschland +11 Prozent). Insgesamt ändert sich die Reihenfolge der bedeutenden Emittenten durch die Veränderung des Anrechnungsverfahrens jedoch kaum. So sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen nach dem Konsumprinzip in China weiterhin am höchsten, gefolgt von den USA.<sup>76</sup>

Abbildung 22  
CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Ländern und Regionen, 2018



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung. Werte gerundet. DE: Deutschland (2,0 %), OZE: Ozeanien (1,2 %), ISV: Internationaler Schiffverkehr (1,8 %), IFV: Internationaler Flugverkehr (1,5 %).

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

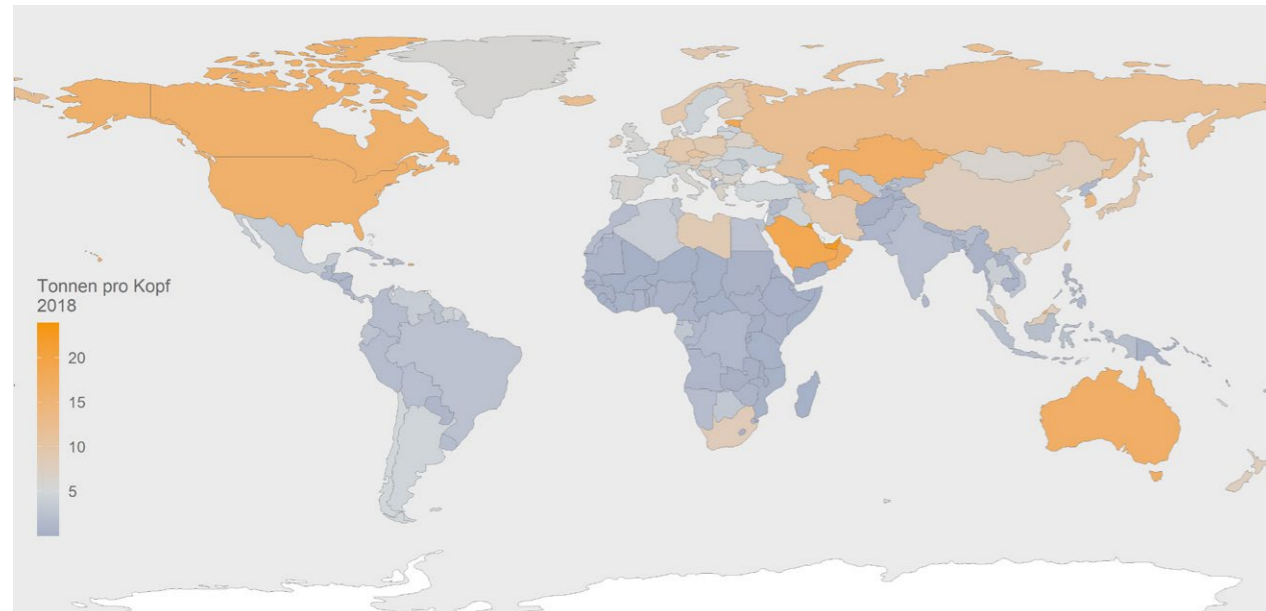
#### Bedeutendste Emittenten bei Betrachtung der Pro-Kopf-Emissionen

Das Bild von Chinas als das mit Abstand bedeutendste Emittentenland relativiert sich, wenn die Gesamtemissionen ins Verhältnis zur Bevölkerung gesetzt werden. Bei den Emissionen pro Kopf lagen die meisten der bedeutenden Emittentenländer im Jahr 2018 relativ eng beisammen. Eine Ausnahme stellen u. a. die USA dar, die mit rund 16 Tonnen pro Kopf im Jahr 2018 einen deutlich höheren Wert aufwiesen als die meisten anderen Industrienationen. Auffällig sind zudem die vergleichsweise niedrigen Pro-Kopf-Emissionen in den meisten Entwicklungsländern sowie in vielen Ländern Europas (Abbildung 23).

Beim Ranking der Pro-Kopf-Emissionen von gering nach hoch landen die USA auf Rang 193 von 208 Ländern. China stieß mit etwa acht Tonnen (Rang 164) pro Kopf weniger als halb so viel CO<sub>2</sub> aus wie die USA. In der EU-28 lag der Pro-Kopf-Ausstoß 2018 bei knapp sieben Tonnen, in Deutschland bei etwa neun Tonnen (Rang 173). Japan (Rang 177) lag mit 9,4 Tonnen knapp hinter Deutschland und Russland folgte mit 12,1 Tonnen auf Rang 186. Die geringsten Pro-Kopf-Emissionen unter den bedeutenden Emittentenländern wies Indien mit 1,9 Tonnen auf (Rang 84). Bei den Ländern mit den höchsten Pro-Kopf-Emissionen ordnen sich vor allem die Golfstaaten ein, wie Katar (mit 38 Tonnen auf Rang 206), Kuwait (mit 24 Tonnen auf Rang 203), die Vereinigten Arabischen Emirate (mit 22 Tonnen auf Rang 202), Bahrain (mit 22 Tonnen auf Rang 201), Saudi-Arabien (mit 19 Tonnen auf Rang 199) und der Oman (mit 18 Tonnen auf Rang 197).<sup>77</sup>

<sup>77</sup> Auf dem ersten Rang liegt Burundi mit 0,03 Tonnen pro Kopf. Die vollständige Liste der 208 Länder ist hier einsehbar: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2019>.

Abbildung 23  
CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf nach Ländern, 2018



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung. Um Verzerrungen zu vermeiden, sind die hohen Werte für Katar und Trinidad und Tobago nicht dargestellt.

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

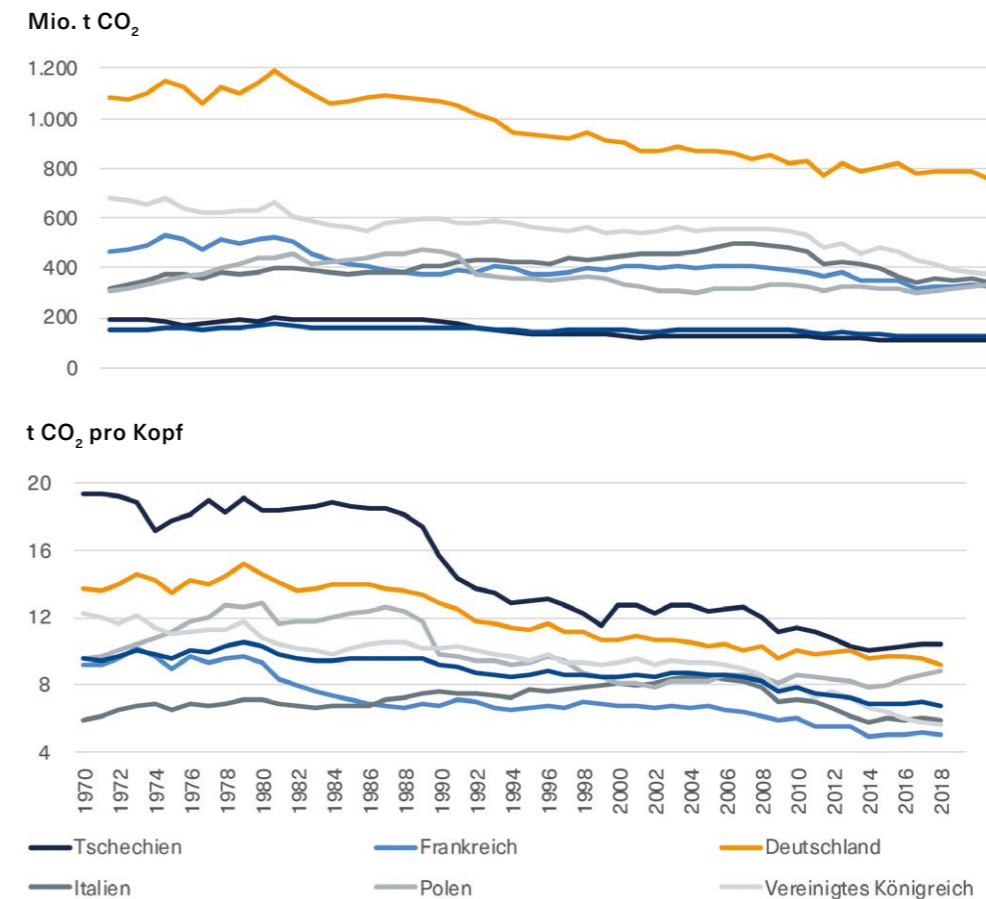
#### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa

Europa ist zusammen mit Deutschland für etwa zehn Prozent bzw. ohne Deutschland für 8 Prozent des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich. Innerhalb Europas zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen (Abbildung 24). Der größte Emittent ist Deutschland mit einem Anteil von rund 22 Prozent an den gesamten europäischen Emissionen in 2018, gefolgt vom Vereinigten Königreich, Italien, Polen, Frankreich (jeweils 9–11 Prozent), Spanien (8 Prozent), den Niederlanden (5 Prozent) und Tschechien (3 Prozent). Dabei sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den meisten Ländern seit 1990 rückläufig. Auf Ebene der EU-28 waren die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2018 rund 22 Prozent niedriger als im Jahr 1990. Eine besonders starke Reduktion ist in diesem Zeitraum im Vereinigten Königreich zu verzeichnen (-36 Prozent Emissionen), was nicht zuletzt mit der Reduktion von Kohle als Energieträger in der Stromerzeugung (v. a. ersetzt durch Erdgas) und relativ starken Kriseneinbußen in Verbindung steht. Wird das Vereinigte Königreich herausgerechnet, sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EU-27 seit 1990 nur um 19 Prozent gesunken.

Neben den absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auch die Pro-Kopf-Emissionen in Europa und Deutschland seit einigen Jahren rückläufig. In 2018 beliefen sich die durchschnittlichen Emissionen pro Einwohner in der EU-28 auf rund sieben Tonnen CO<sub>2</sub>. In Deutschland lagen die Emissionen mit rund neun Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf deutlich darüber. Geringere Pro-Kopf-Emissionen als im EU-Durchschnitt verzeichneten bspw. das Vereinigte Königreich und Italien (unter sechs Tonnen CO<sub>2</sub>) sowie Frankreich (unter 5 Tonnen CO<sub>2</sub>).

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen stehen grundsätzlich in einem starken Zusammenhang mit dem Energiesektor der jeweiligen Länder. Länder mit einem größeren Kohlestromanteil im Energiemix (z. B. Polen, Tschechien, Deutschland) haben tendenziell höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf als Länder mit einem größeren Anteil erneuerbarer Energien oder Kernenergie (z. B. Frankreich).

Abbildung 24  
Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt und pro Kopf in ausgewählten europäischen Ländern



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung.

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

#### 03.1.3 Globale und nationale Restbudgets

##### Globale Restbudgets

Die globale Erwärmung ist im Wesentlichen von der Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre abhängig. Die Erhöhung der Treibhausgase in der Atmosphäre um eine bestimmte Menge führt zu einer durchschnittlichen Erderwärmung um eine entsprechende Temperatur. Deshalb kann – u. a. unter Beachtung des Kohlenstoffkreislaufes (Abbildung 10) – grundsätzlich modelliert werden, welche Menge an Treibhausgasen global noch emittiert werden darf, wenn die Erderwärmung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Temperatur bzw. Erwärmung nicht übersteigen soll. Diese Menge an Treibhausgasen wird als globales (Rest-)Budget bezeichnet.<sup>78</sup>

<sup>78</sup> Die Menge würde höher ausfallen, wenn neue Treibhausgas-Senken in messbarem Umfang erschlossen werden würden. Als Senken für Treibhausgase werden Systeme bezeichnet, die in der Lage sind, der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen und zu speichern (z. B. Wälder, Böden, Meere). Der Entzug und die Speicherung können grundsätzlich auch technisch erfolgen, bspw. mittels CCS (Teil III Kapitel 04.3).

Aufgrund der Komplexität des Klimasystems sind Abschätzungen zum globalen Restbudget zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet und variieren je nach getroffenen Annahmen und Berechnungsmethodik. Die ermittelten Restbudgets müssen immer vor dem Hintergrund ihrer spezifischen Annahmen und Berechnungsmethoden interpretiert werden. Obwohl die Aussagekraft absoluter Restbudgets begrenzt ist, zeigen sie, wie dringlich die Verringerung der Treibhausgas-Emissionen ist.

Der Weltklimarat (IPCC) liefert Schätzungen zum globalen Restbudget für verschiedene Klimaziele und Wahrscheinlichkeiten für deren Erreichung, u. a. auf Basis der durchschnittlichen Erdoberflächentemperatur und ohne Berücksichtigung von Kippelementen.<sup>79</sup> Demzufolge verbleibt ein globales Restbudget von rund 420 Gigatonnen CO<sub>2</sub>, wenn die Erderwärmung gegenüber vorindustriellen Werten mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent auf 1,5 Grad C begrenzt werden soll. Bleiben die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen von jährlich etwa 39 bis 45 Gigatonnen CO<sub>2</sub> unverändert, ist das globale Restbudget von 2018 an in etwa zehn Jahren, also 2028, aufgebraucht. Danach dürfte weltweit also kein zusätzliches CO<sub>2</sub> mehr emittiert werden. Bei Lockerung der Annahmen (niedrigere Wahrscheinlichkeit oder weniger ambitioniertes Klimaziel) verlängert sich zwar die Reichweite des Restbudgets, die grundsätzliche Botschaft der Dringlichkeit eines schnellen Umsteuerns bleibt aber erhalten. Soll bspw. das 2-Grad-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent erreicht werden, beträgt die Reichweite des globalen Restbudgets von 1.170 Gigatonnen CO<sub>2</sub> von 2018 an noch 26 bis 30 Jahre.

#### Methoden zur Berechnung nationaler Restbudgets

Durch die Aufteilung des globalen Restbudgets auf die einzelnen Staaten der Welt können nationale Restbudgets konstruiert werden. Die nationalen Budgets hängen von dem zugrunde liegenden globalen Restbudget sowie von den Annahmen und Methoden zur Aufteilung ab. Zur (politischen) Aufteilung des globalen Restbudgets dient üblicherweise ein oder mehrere der folgenden Kriterien:<sup>80</sup>

- Anteil eines Landes an der weltweiten Bevölkerung
- Anteil eines Landes am weltweiten BIP
- Anteil eines Landes an den globalen Emissionen

Dabei können entweder die gegenwärtigen Werte genutzt (z. B. Bevölkerung im Jahr 2019) oder erwartete zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden (z. B. künftige Bevölkerung). Zudem kann der Zeitpunkt der Aufteilung, der bestimmt, inwieweit historische Emissionen einbezogen werden, variiert werden.

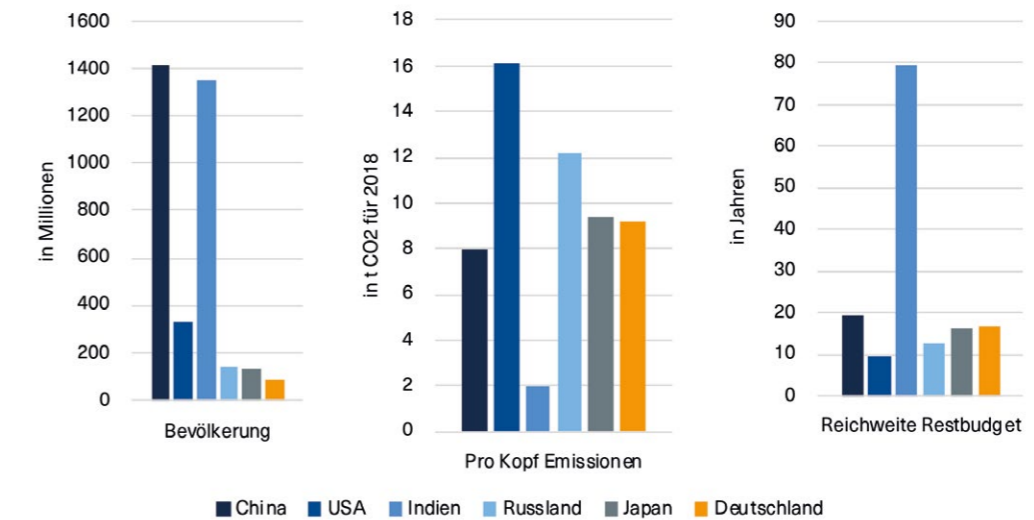
Insgesamt stellt die Aufteilung des globalen Restbudgets nach der Bevölkerung sowie der Einbezug historischer Emissionen die Industrieländer vor große Herausforderungen, während die Entwicklungsländer von einer solchen Aufteilung eher profitieren, da ihnen dadurch in der Regel höhere Restbudgets „zustehen“ würden. Umgekehrt gilt bei einer Aufteilung anhand der gegenwärtigen Wirtschaftsleistung oder der aktuellen Emissionen. Hiervon würden eher die Industrieländer profitieren, da ihnen infolge ihrer größeren Wirtschaftsleistung bzw. höheren Emissionen umfangreichere Restbudgets „zustehen“ würden. Inzwischen wurden verschiedene „Kompromiss-Ansätze“ entwickelt, die durch gewichtete Verteilungsschlüssel einerseits den Entwicklungsländern noch eine Ausweitung ihrer Emissionen „ermöglichen“ und andererseits die Industrieländer nicht „überfordern“ sollen.

#### Nationale Restbudgets im internationalen Vergleich

Im Folgenden werden die nationalen Restbudgets anhand einer verbreiteten Aufteilungsmethode für das 2-Grad-Ziel des Paris-Abkommens beispielhaft berechnet. Soll das 2-Grad-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent erreicht werden, verbleibt gemäß IPCC (2018) ein globales Restbudget von 1.170 Gigatonnen CO<sub>2</sub>. Die Aufteilung des Restbudgets erfolgt auf Grundlage der Bevölkerung, was für Entwicklungsländer tendenziell vorteilhaft ist. Dabei wird jedem Land pro Einwohner die gleiche Restmenge zugewiesen. Die nationalen Budgets ergeben sich dann aus dem Produkt von Restmenge pro Kopf und der Einwohnerzahl des Landes. Als Startpunkt für die Verteilung dient das Jahr 2018, d. h., vorherige Emissionen werden nicht berücksichtigt, was sich für Industrieländer vorteilhaft auswirkt.

Für Deutschland ergibt sich bei Aufteilung nach Bevölkerungsanteil ein Restbudget von 12,6 Gigatonnen. Bei unveränderten Emissionen pro Kopf würde das deutsche Restbudget noch rund 16,8 Jahre reichen. Ähnliche Reichweiten ergeben sich in vielen anderen Industrienationen. Indien hätte bei einer Aufteilung nach Bevölkerungsanteil ein Restbudget von 207,7 Gigatonnen, was aufgrund seiner geringen Emissionen pro Kopf noch fast 80 Jahre reichen würde – vorausgesetzt, die Emissionen pro Kopf bleiben unverändert (Abbildung 25).

Abbildung 25  
Reichweite der nationalen CO<sub>2</sub>-Budgets zur Erreichung des 2-Grad-Ziels bei Aufteilung nach Bevölkerungsanteil



Berechnung der nationalen Budgets auf Grundlage der IPCC-Schätzungen zum globalen Restbudget (2-Grad-Ziel, 66 Prozent Wahrscheinlichkeit). Reichweite bei unveränderten Emissionen pro Kopf.

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

## 03.2 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den bedeutendsten Emittentenländern

### 03.2.1 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

#### Entwicklung der Emissionen insgesamt

Die bedeutendsten Länder bei der Emission von CO<sub>2</sub> umfassen China, die USA, Indien, Russland, Japan und Deutschland, auf die zusammen etwa 61 Prozent der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2018 entfielen (Tabelle 1). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der heute bedeutendsten sechs Emittentenländer haben sich in den vergangenen Jahrzehnten unterschiedlich entwickelt. In China sind die absoluten Emissionen infolge des wirtschaftlichen Aufholprozesses in den letzten 20 Jahren um über 220 Prozent gestiegen. Im Jahr 2005 hat China die USA als weltweit bedeutendsten

Emittenten abgelöst. Im Jahr 2018 emittierte China annähernd die gleiche Menge CO<sub>2</sub> wie die USA, Japan, Russland, Indien und Deutschland zusammen. Indien zeigt grundsätzlich eine ähnliche Entwicklung wie China, allerdings ist der Anstieg der Emissionen deutlich schwächer und erfolgt zeitversetzt (aufgrund des späteren Beginns des wirtschaftlichen Aufholprozesses). Im Jahr 2018 lag Indien hinter China und den USA auf Platz drei der weltweit bedeutendsten Emittenten (Tabelle 1).

<sup>79</sup> IPCC, 2018.

<sup>80</sup> Marktliche Mechanismen zur Aufteilung des globalen Restbudgets werden an dieser Stelle nicht betrachtet, da davon auszugehen ist, dass einheitliche marktliche Mechanismen auf globaler Ebene vorerst schwierig zu realisieren und durchzusetzen sind.

Tabelle 1  
CO<sub>2</sub>-Emissionen in den bedeutendsten Emittentenländern 2018

Werte gerundet	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	Anteil
<b>6 bedeutendste Emittentenländer:</b>	<b>22.850</b>	<b>61 %</b>
davon		
China	11.260	30 %
USA	5.280	14 %
Indien	2.620	7 %
Russland	1.750	5 %
Japan	1.200	3 %
Deutschland	750	2 %
Rest der Welt	15.030	39 %
<b>Gesamt</b>	<b>37.890</b>	<b>100 %</b>

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

Nach Phasen leicht steigender und leicht sinkender Emissionen lagen die Emissionen in den USA zuletzt auf einem ähnlichen Niveau wie Anfang der 1990er-Jahre. Dabei konnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen seit der Jahrtausendwende um ca. 13 Prozent reduziert werden. Deutschland zeigt eine grundsätzlich ähnliche Entwicklung, wobei die deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits seit Ende der 1970er-Jahre nahezu stetig sinken. Zudem bestehen beträchtliche Niveauunterschiede zwischen Deutschland auf der einen Seite und den USA auf der anderen Seite. Deutschland hatte 2018 unter den sechs bedeutendsten Emittenten die geringsten Emissionen, die USA die zweithöchsten. Seit 1990 sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland um rund 26 Prozent gesunken. Einen ähnlich starken Rückgang weist unter den sechs Ländern nur Russland auf. Anders als in Deutschland gingen die russischen Emissionen seit 1990 nicht kontinuierlich zurück. Vielmehr war in der Dekade nach dem Zerfall der Sowjetunion und dem damit verbundenen Einbruch der russischen Wirtschaft ein drastischer Rückgang der Emissionen zu verzeichnen. In den anderen betrachteten Ländern haben die Emissionen gegenüber 1990 zugenommen, was nicht zuletzt mit dem Wachstum von Wirtschaft und Wohlstand auf der einen Seite sowie mangelnden bzw. nicht kompensierenden Klimaschutzmaßnahmen auf der anderen Seite in Zusammenhang steht. In den USA und Japan sind die Emissionen gegenüber 1990 um jeweils ca. vier Prozent und in China und Indien um jeweils über 300 Prozent gestiegen.

Da die Emissionen bestimmter Regionen innerhalb eines Landes nur eine beschränkte Aussagekraft haben, sind die Werte für Bayern in Abbildung 26 nur nachrichtlich ausgewiesen. Für eine Diskussion der bayerischen Emissionen wird auf Teil II Kapitel 03.2.3 verwiesen.

**Entwicklung der einwohnerbezogenen Emissionen**

Werden die absoluten Emissionen mit der jeweiligen Einwohnerzahl gewichtet, zeigt sich ein etwas anderes Bild (Abbildung 26, Mitte). In dieser Definition weisen die USA den höchsten Wert der sechs betrachteten Länder auf. Hier liegen die Pro-Kopf-Emissionen bereits seit einigen Jahrzehnten deutlich höher als in den anderen fünf Ländern. Infolge des starken Wirtschaftswachstums sind die Emissionen je Einwohner in China und Indien im vergangenen Jahrzehnt zwar angestiegen, liegen aber weiterhin deutlich unter den Werten der anderen Länder. Anders als China und Indien verzeichnen die USA und Deutschland sinkende pro-Kopf-Emissionen. In den USA liegt das insbesondere ab 2006 an dem vermehrten Einsatz von Fracking und der Nutzung von Schiefergas, welches den Kohleeinsatz senkt (aufgrund der Auswirkungen auf die Umwelt und insbesondere auf das Grundwasser ist Fracking allerdings umstritten). Die Pro-Kopf-Emissionen Japans haben sich seit 1970 nur wenig verändert. In Russland sind die einwohnerbezogenen Emissionen bis zum Zerfall der Sowjetunion stark gewachsen und anschließend bis Mitte der 1990er-Jahre deutlich gesunken. Seitdem haben sich die Emissionen relativ wenig verändert.

**Entwicklung der auf die Wirtschaftsleistung bezogenen Emissionen**

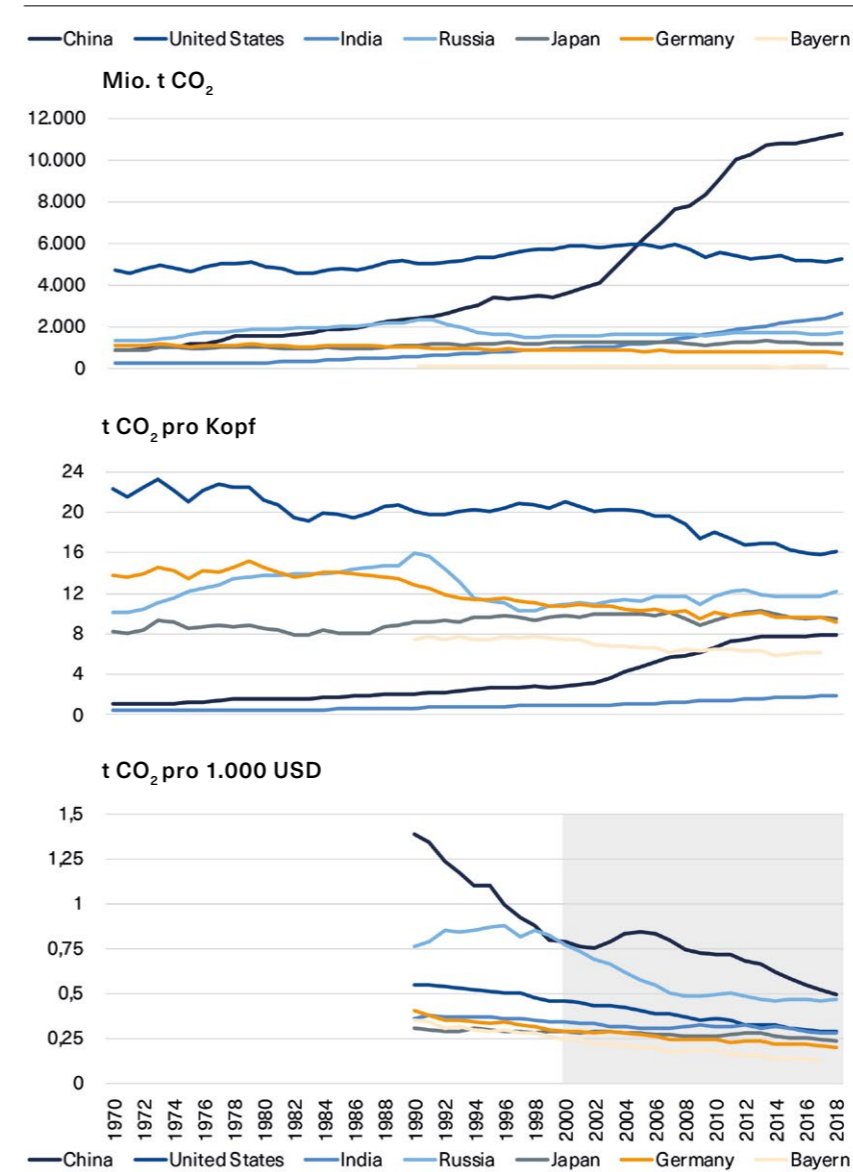
Das Verhältnis von Emissionen zum BIP wird als Emissionsintensität bezeichnet. Es gibt Auskunft darüber, wie viel CO<sub>2</sub> pro Einheit Wertschöpfung bzw. BIP emittiert wird. Die Emissionsintensität ist seit 1990 in allen sechs betrachteten Ländern rückläufig (Abbildung 26, unten). Diese Entwicklung beruht insbesondere auf drei Effekten:

- Reduktion der Emissionsintensität durch die Nutzung emissionsärmerer Energieträger, vor allem in der Energiewirtschaft

- Verringerung des Energieverbrauchs durch Steigerung der Energieeffizienz
- Erhöhung der Wertschöpfung bei gleichzeitig sinkendem oder zumindest weniger stark anwachsendem Energieverbrauch

Im Zeitraum von 1990 bis 2018 konnten alle sechs Länder ihre Emissionsintensität deutlich reduzieren. China verzeichnet in diesem Zeitraum zwar den stärksten Rückgang der Emissionen pro BIP (-64 Prozent seit 1990), weist aber weiterhin den höchsten Wert unter den sechs Ländern auf (0,5 Tonnen CO<sub>2</sub> pro 1.000 USD Wertschöpfung). Auf Rang zwei folgt Russland, dessen Emissionsintensität seit 1990 um etwa 39 Prozent zurückgegangen ist. In den anderen vier Ländern war die Emissionsintensität bereits 1990 niedriger als heute in China. Die USA und Deutschland haben ihre Emissionsintensität in den vergangenen 30 Jahren um rund 47 Prozent bzw. 52 Prozent reduziert. In Indien und Japan ist der Rückgang weniger stark ausgeprägt (-21 Prozent seit 1990).

Abbildung 26  
Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der bedeutendsten Emittenten, nach Indikatoren



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung. Für Bayern (nachrichtlich dargestellt) sind infolge eingeschränkter Datenverfügbarkeit nur die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen abgebildet.

Quelle: EDGAR-Datensatz; Länderarbeitskreis Energiebilanzen; eigene Darstellung Prognos, 2020

### 03.2.2 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Sektoren

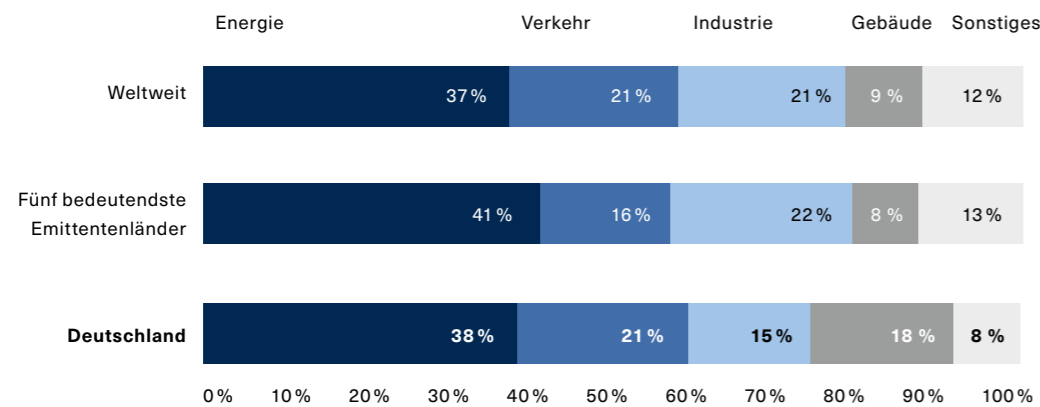
#### Überblick über die sektorale Struktur der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Bei der Verteilung von CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die einzelnen Sektoren, in denen sie auftreten, kann zwischen dem Energie(erzeugungs)sektor und den End(energie)verbrauchssektoren (EEV-Sektoren) unterschieden werden. Diese Unterscheidung ist sinnvoll, da der Energiesektor den Bedarf an Strom und Wärme generieren muss, den die Verbrauchssektoren benötigen. Insofern führt ein sinkender Energiebedarf bspw. beim Verkehr oder bei den Gebäuden auch zu einer Reduktion in dem „zuliefernden“ Energiesektor. Die produzierte Energie hat im Energiesektor keinen direkten „Selbstzweck“ wie bspw. Fortbewegung oder Warmwasser in den Verbrauchssektoren. Der Energiesektor umfasst im Wesentlichen Emissionen, die in der Energiewirtschaft bei der Erzeugung von Strom und Wärme freigesetzt werden.<sup>81</sup> Die Endverbrauchssektoren werden im zugrunde liegenden Datensatz (EDGAR) aufgeteilt in Industrie (inklusive Verbrennung für industrielle Prozesse und Treibstoffproduktion), Transport (ohne internationalen Flugverkehr und internationale Schifffahrt), Gebäude und andere Sektoren (industrielle Prozessemissionen<sup>82</sup>, indirekte Emissionen, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft).

Die meisten Emissionen entstehen nach wie vor bei der Energieerzeugung. Der Anteil des Energiesektors an den gesamten globalen Emissionen im Jahr 2018 beträgt rund 37 Prozent. Die restlichen 63 Prozent verteilen sich auf die Endverbrauchssektoren: Verkehr und Industrie mit jeweils 21 Prozent, Gebäudesektor mit neun Prozent und restliche Sektoren mit zusammen zwölf Prozent. Eine ähnliche Verteilung ergibt sich auf Ebene der fünf bedeutendsten Emittenten: Verkehr und Industrie mit 16 bzw. 22 Prozent, Gebäudesektor mit acht Prozent und restliche Sektoren mit zusammen 13 Prozent. In Deutschland liegt der Anteil der Industrie (15 Prozent) etwas niedriger und der Anteil des Gebäudesektors (18 Prozent) etwas höher als im globalen Durchschnitt (Abbildung 27). Das liegt vor allem daran, dass die Verteilung der bedeutendsten Emittenten von der chinesischen Verteilung dominiert wird. In China hat die Industrie einen sehr hohen Anteil an den Emissionen, während Gebäude und Verkehr einen entsprechend kleineren Anteil haben. Hinzu kommt, dass China und Indien u. a. beim Individualverkehr anders aufgestellt sind als Deutschland oder die USA, die beide eine hohe Quote an Autos pro Kopf mit entsprechend hohen Fahrleistungen haben.

Abbildung 27

#### Anteile der Sektoren an den CO<sub>2</sub>-Emissionen 2018



Die fünf bedeutendsten Emittenten umfassen die USA, China, Russland, Indien und Japan.

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

<sup>81</sup> Die Emissionen im Energiesektor sind nicht zu verwechseln mit den energiebedingten Emissionen. Diese umfassen alle Emissionen, die infolge der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen. Dies ist unabhängig davon, ob die Verbrennung in der Energiewirtschaft oder in den Endverbrauchssektoren Industrie, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, private Haushalte oder Verkehr stattfindet.

<sup>82</sup> Prozessemissionen bezeichnen Emissionen, die bei bestimmten industriellen Prozessen (infolge chemischer Reaktionen) praktisch als „Abfallprodukt“ entstehen. Hohe Prozessemissionen entstehen insbesondere bei der Erzeugung von Stahl, Zement, Kalk sowie Ammoniak und Aluminium. In Deutschland hatten die Prozessemissionen im Jahr 2015 einen Anteil von rund sieben Prozent an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen (IREES 2018).

#### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Energiesektor

In allen sechs Ländern hat der Energiesektor einen deutlich größeren Anteil an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen als die einzelnen anderen vier Sektoren. Analog zu den Gesamtemissionen sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Energiesektor gegenwärtig in China mit Abstand am höchsten. Es folgen die USA, Russland, Indien, Japan und Deutschland. Dabei haben sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Energiesektor in den einzelnen Ländern seit 1970 sehr unterschiedlich entwickelt (Abbildung 28 oben rechts)

- In China sind die Emissionen im Energiesektor infolge des rasanten Wirtschaftswachstums seit 1970 sehr deutlich und fast kontinuierlich gestiegen. In den vergangenen Jahren hat sich das Wachstum zwar sichtbar verlangsamt, die Nettoveränderung bei den chinesischen Kohlekraftwerkskapazitäten ist aber weiterhin positiv (Abbildung 29).
- Indien zeigt eine ähnliche Entwicklung der Emissionen im Energiesektor wie China, wenngleich die Dynamik deutlich geringer ist.
- In den USA sind die Emissionen im Energiesektor bis Ende der 1990er-Jahre deutlich gestiegen und ab 2006 wieder gesunken. Der Rückgang der amerikanischen

Emissionen lässt sich auf die verstärkte Förderung von Schiefergas durch Fracking zurückführen. Das Schiefergas hat die emissionsintensivere Kohle in der Stromerzeugung verdrängt. Gleichwohl ist Fracking aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Umwelt und insbesondere auf das Grundwasser umstritten.

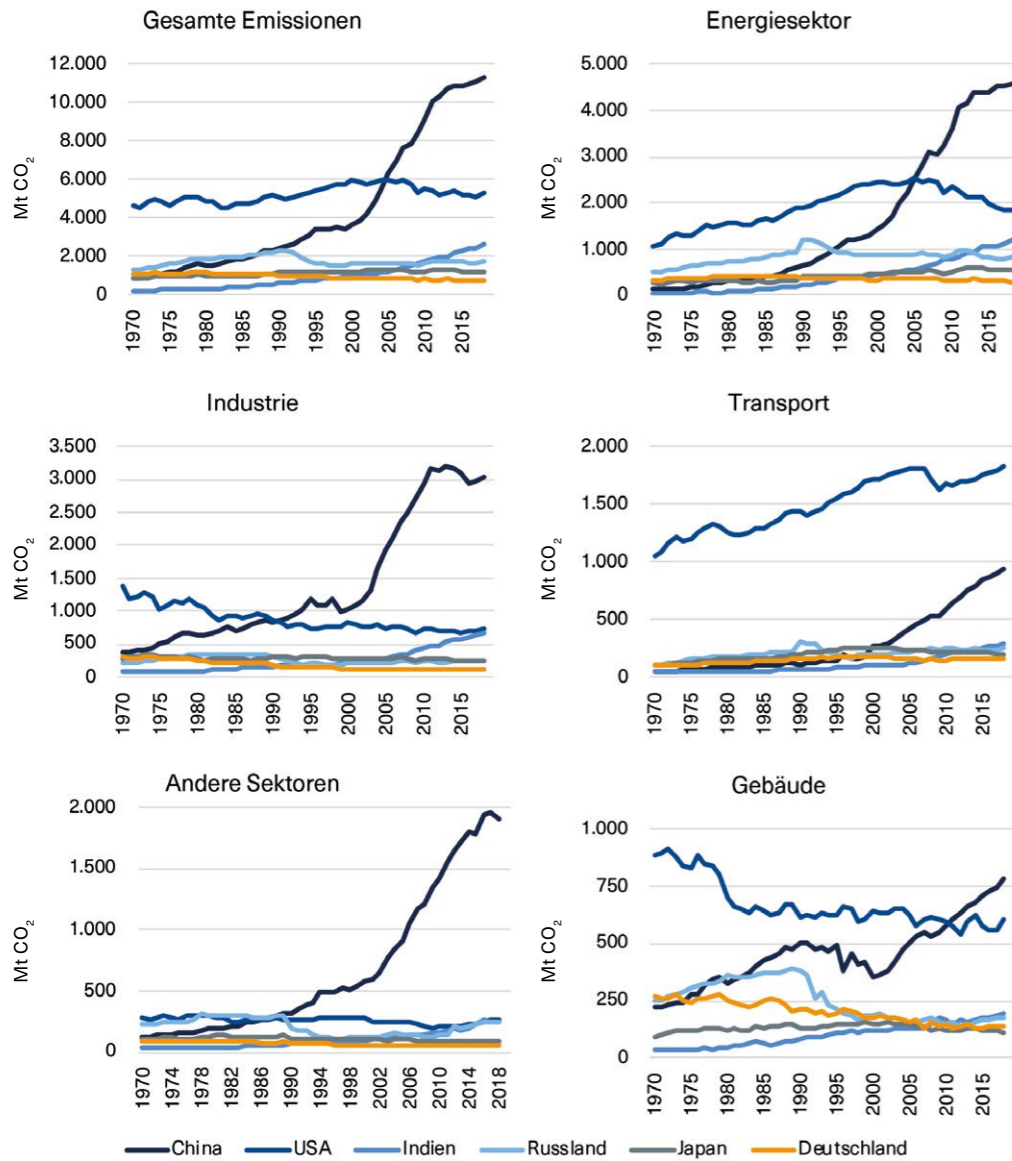
- In Russland sind die Emissionen der Energiewirtschaft bis zum Zusammenbruch der Sowjetunion gestiegen und sind seitdem leicht rückläufig (v. a. infolge des wirtschaftlichen Einbruchs).
- In Deutschland sind die Emissionen der Energiewirtschaft seit 1990 leicht rückläufig, was insbesondere auf die Stilllegung oder Modernisierung emissionsintensiver Kohlekraftwerke in den 1990er-Jahren sowie den Ausbau der erneuerbaren Energien und den Wechsel hin zu emissionsärmeren Energieträgern (Erdgas) zurückzuführen ist.
- In Japan sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energiewirtschaft bis zur Jahrtausendwende leicht gestiegen und danach wieder gesunken. Das liegt unter anderem daran, dass Erdöl teilweise durch Erdgas ersetzt wurde und ab der Jahrtausendwende erneuerbare Energieträger verstärkt genutzt wurden.

#### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Energieverbrauchssektoren

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen haben sich in den einzelnen EEV-Sektoren und Ländern seit 1970 unterschiedlich entwickelt (Abbildung 28, Mitte und unten). Ein einheitlicher Trend ist nur im Transportsektor ersichtlich. Hier sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen seit 1970 in allen Ländern gestiegen. Ein besonders deutlicher Zuwachs ist v. a. in China und Indien zu verzeichnen. In den USA waren die Emissionen bereits vor 1970 auf hohem Niveau. Die Emissionen im Transportsektor werden nicht zuletzt durch Inlandsflüge getrieben – insbesondere in Ländern mit großen Staatsgebieten. Abgesehen vom Transportsektor unterscheiden sich die Trends in den anderen EEV-Sektoren zwischen den einzelnen Ländern:

- In China sind die Emissionen in allen vier EEV-Sektoren ab dem Jahr 2000 deutlich gestiegen, sodass China mittlerweile in fünf der sechs Sektoren die höchsten Emissionen aufweist. Nur im Transportsektor liegen die Emissionen der USA noch (deutlich) höher als die Chinas. Eine nennenswerte Reduktion erfolgte in China in den vergangenen Jahren nur in der Industrie. Indien zeigt insgesamt eine ähnliche Entwicklung wie China. Der Anstieg der indischen Emissionen ist zwar sehr viel schwächer als in China, dennoch hat Indien mittlerweile in allen vier EEV-Sektoren die dritthöchsten Emissionen der sechs Länder.
- In den USA und Deutschland haben die Emissionen seit 1970 in allen EEV-Sektoren deutlich abgenommen, nur im Transportsektor kam es zu einer Zunahme. Insgesamt sind die deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1970 und 1990 im Gebäudesektor um 49 Prozent, in der Industrie um 63 Prozent, im Energiesektor um 31 Prozent und in den anderen Sektoren um 37 Prozent gesunken. Viele dieser Reduktionen lassen sich auf eine verbesserte Energieeffizienz und teilweise Energieträgerwechsel zurückführen. In den USA sind die Reduktionsraten in allen Sektoren deutlich geringer. Im Transportsektor werden Effizienzgewinne häufig durch schwerere Fahrzeuge und höhere Fahrleistungen überkompensiert. Hier sind die Emissionen in Deutschland um 66 Prozent gestiegen.
- In Japan und Russland sind die Veränderungen der Emissionen seit 1970 im Vergleich zu den anderen Nationen gering. In Japan waren die Emissionen zwischen 1970 und 2018 nur in der Industrie und in den anderen Sektoren rückläufig und in Russland nur im Gebäudesektor. Seit dem Zusammenbruch der Sowjetunion sind die russischen Emissionen in fast allen Sektoren gesunken.

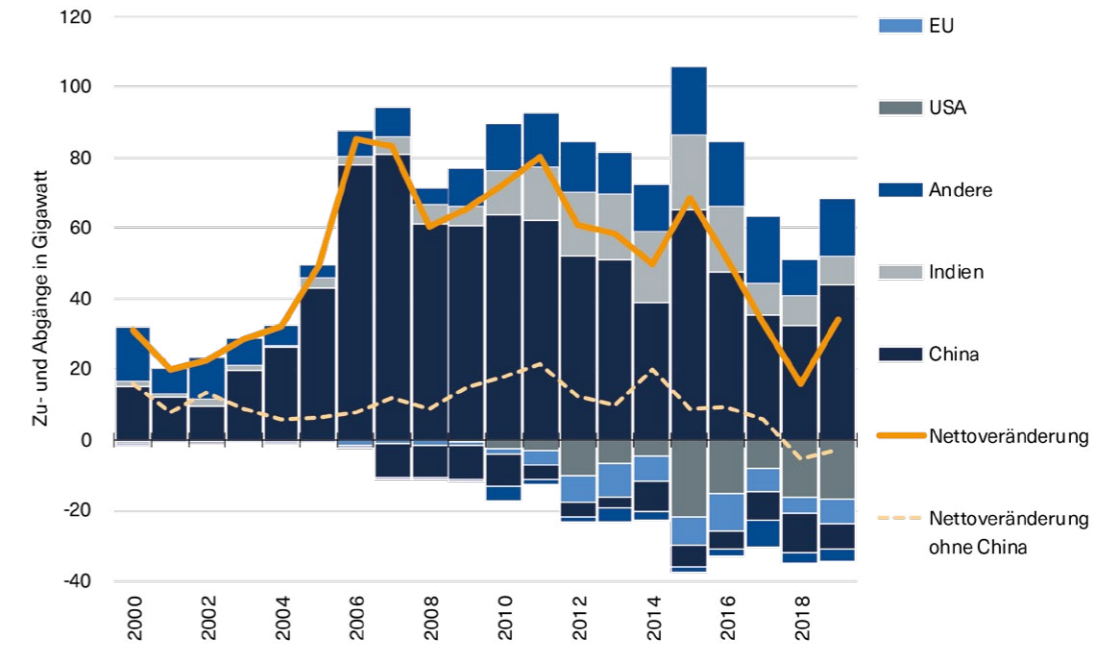
Abbildung 28  
CO<sub>2</sub>-Emissionen der bedeutendsten Emittenten nach Sektoren



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung.

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

Abbildung 29  
Veränderungen in den Kohlekraftwerkskapazitäten



Die fünf bedeutendsten Emittenten umfassen die USA, China, Russland, Indien und Japan.

Quelle: Global Energy Monitor 2020a; eigene Darstellung Prognos, 2020

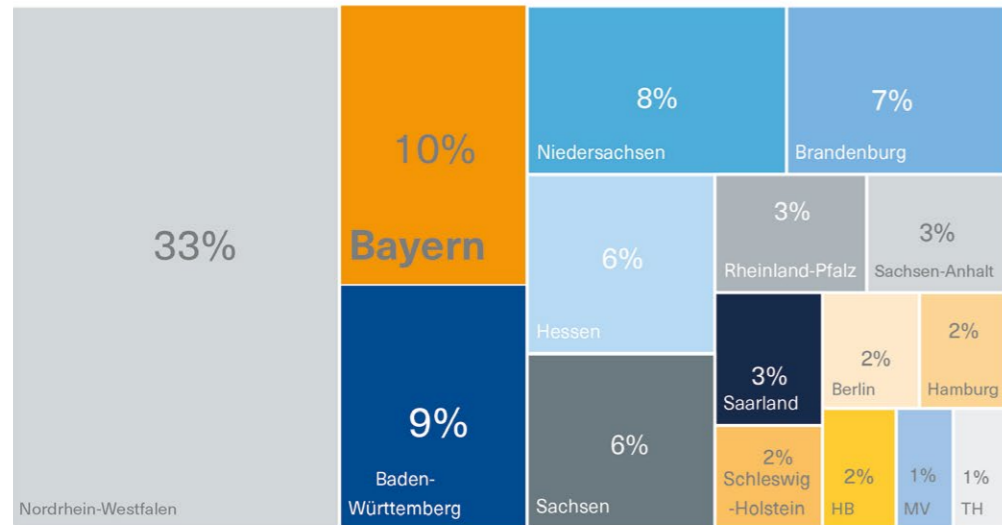
### 03.2.3 Emissionen in Deutschland und seinen Ländern

#### Emissionen der Bundesländer im Vergleich

Für die Bundesländer liegen vergleichbare Zeitreihen nur für die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen vor. Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen bei der Umwandlung fossiler Energieträger (Verbrennung von Kohle, Erdgas oder Erdöl) in bspw. elektrische oder thermische Energie (z. B. im Verkehr). Nicht umfasst sind nicht energiebedingte Emissionen aus industriellen Prozessen (z. B. Zement- und Stahlerzeugung) und aus der Produktverwendung.

In den letzten knapp 30 Jahren lag der durchschnittliche Anteil Bayerns an den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands bei rund zehn Prozent. Im Bundesländervergleich liegt Bayern damit auf Platz zwei der bedeutendsten Emittenten. Mehr als Bayern emittierte nur Nordrhein-Westfalen, das in 2016 für rund ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verantwortlich war (Abbildung 30). Ursachen für den hohen Anteil Nordrhein-Westfalens sind neben der Einwohnerzahl die große Bedeutung energieintensiver Industrien sowie zahlreiche dort angesiedelte Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke. Aufgrund des großen Emissionsanteils von Kraftwerken, die auch der überregionalen Stromversorgung dienen, lässt ein statistischer Vergleich einzelner Bundesländer a priori keine direkten Rückschlüsse auf deren Klimaschutzambitionen zu.

Abbildung 30  
Anteil der Bundesländer an den CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands im Jahr 2016



Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen (gerundete Werte). Aufgrund eingeschränkter Datenverfügbarkeit sind für Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen Werte für 2014 und für das Saarland Werte für 2015 eingetragen. HB: Hansestadt Bremen, MV: Mecklenburg-Vorpommern, TH: Thüringen.

Quelle: Länderinitiative Kernindikatoren; eigene Darstellung Prognos, 2020

### Struktur der energiebedingten Emissionen in Deutschland und Bayern

Aussagekräftiger als die Betrachtung der gesamten Emissionen in den Bundesländern ist ein Vergleich ihrer sektoralen Struktur. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Sektoren private Haushalte und Verkehr sind bei einer Pro-Kopf-Betrachtung in den meisten Bundesländern sehr ähnlich. Sie skalieren mit der Einwohneranzahl und der Wirtschaftsleistung (u.a. infolge des damit zunehmenden Güterverkehrs). In Deutschland entstehen mit 41 Prozent die meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Energiewirtschaft, gefolgt vom Verkehrssektor mit 22 Prozent, der Industrie mit 18 Prozent und privaten Haushalten mit 13 Prozent. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen haben mit sechs Prozent die geringsten Emissionen.

In Bayern ist der Anteil des Verkehrssektors mit 41 Prozent deutlich höher und der Anteil der Energiewirtschaft mit zwölf Prozent deutlich niedriger als im Bundesdurchschnitt (Abbildung 31). Der geringe Anteil der Energiewirtschaft an den bayerischen CO<sub>2</sub>-Emissionen ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass es in Bayern (wie auch in Baden-Württemberg) nur noch wenige Kohlekraftwerke gibt. Die Verbuchung der Emissionen erfolgt nach der Logik der

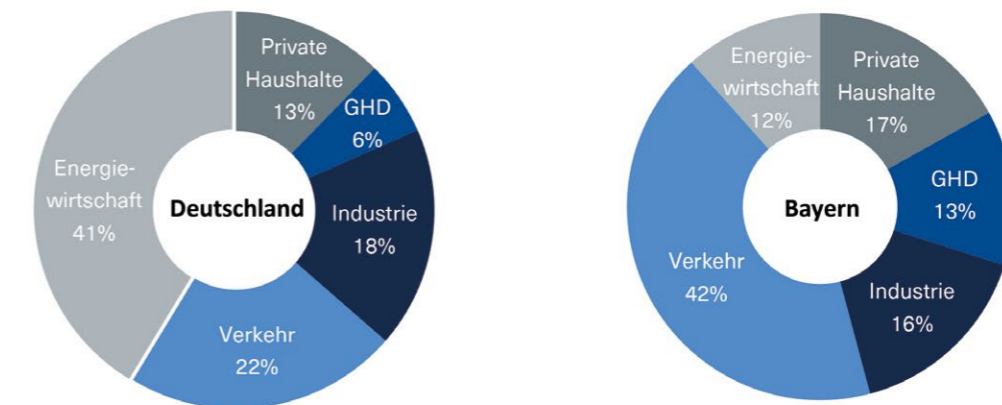
nationalen Energie- und Treibhausgas-Bilanzen (Quellenbilanzen) am Entstehungsort, bei Kohlekraftwerken also vor allem in Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, aber auch in Hamburg und Bremen. Falls im Rahmen des Stromaustauschs Strom – aus welchen Quellen auch immer – nach Bayern importiert wird, trägt dieser nicht zur bayerischen Treibhausgas-Bilanz bei. Im Verkehr erfolgt die Verbuchung der Emissionen in der Regel am Ort des Treibstoffverkaufs.

Der Anteil der Industrie an den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist in Bayern mit 16 Prozent etwas niedriger als im Bundesdurchschnitt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist der vergleichsweise geringe Anteil energie- und emissionsintensiver Branchen in Bayern – die stark dominierenden Branchen Fahrzeugherstellung, Maschinenbau und Elektroindustrie sind mittelmäßig bis wenig energieintensiv. Andere wichtige Branchen, in denen auch viel innovative und neue Unternehmen zu finden sind, wie z.B. Medizintechnik, sind ebenso wenig energieintensiv. Länder mit höheren Anteilen energie- und CO<sub>2</sub>-intensiver Industrien sind u.a. Bremen und Niedersachsen (Stahl) sowie Rhein-

land-Pfalz, Nordrhein-Westfalen und Sachsen (Grundstoffchemie).<sup>83</sup> Spezialitätenchemie, die in vielen Bundesländern mit unterschiedlichen Produkten zu finden ist, ist weniger energieintensiv. Die sektorale Struktur der CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt, dass die potenziell größten Einsparmöglichkeiten für Deutschland vornehmlich in der Energiewirtschaft und dem Verkehr und in Bayern in den Bereichen Verkehr und Gebäude zu verorten sind.

Bei der Bewertung der Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland und den Bundesländern darf die Rolle der deutschen Einheit nicht übersehen werden (Kasten 8).

Abbildung 31  
Anteil der Sektoren an den deutschen und bayerischen CO<sub>2</sub>-Emissionen



Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2017 und 2018. Energiewirtschaft ohne Raffinerien und sonstige Energieerzeuger. GHD: Gewerbe, Handel, Dienstleistungen.

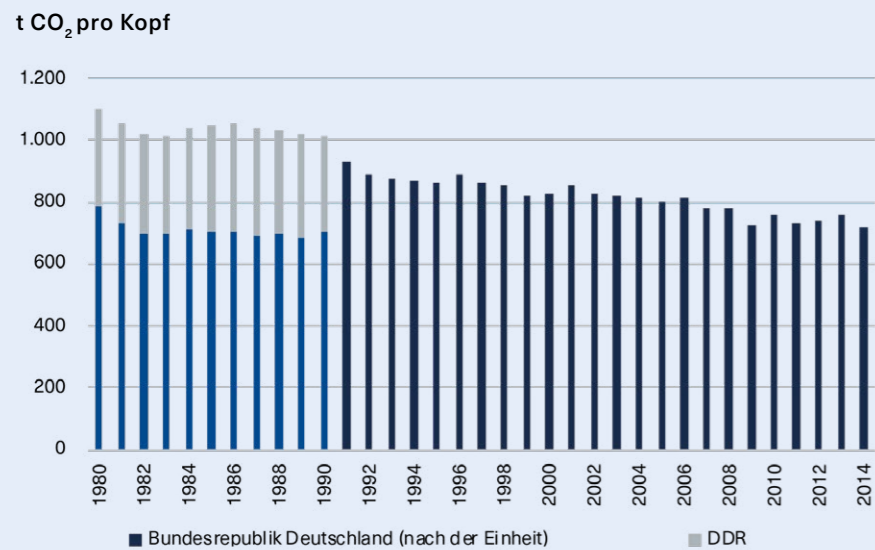
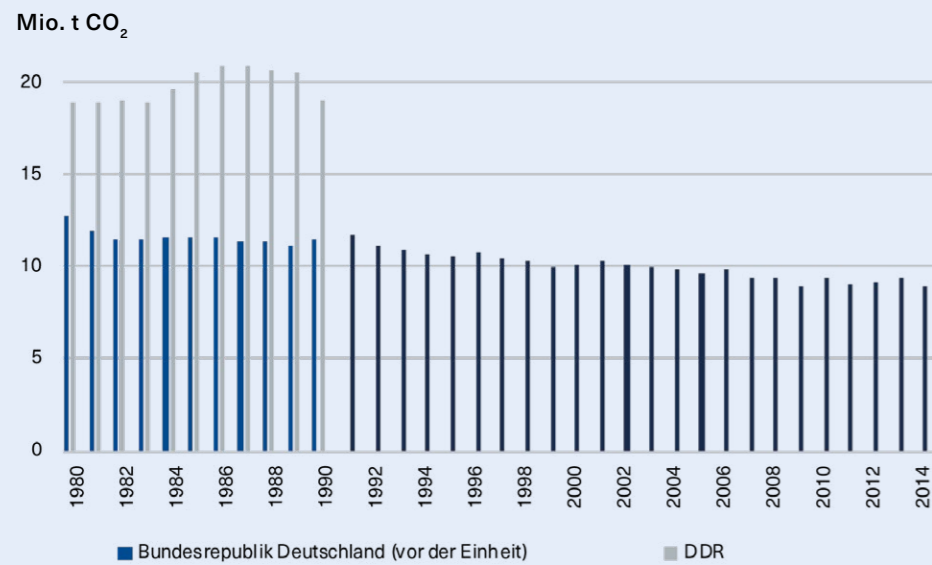
Quelle: UBA; eigene Berechnung und Darstellung Prognos, 2020

### Kasten 8 Rolle der deutschen Einheit bei der Entwicklung der Emissionen

Das US-Energieministerium liefert vergleichbare Daten zu den fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der DDR und in der Bundesrepublik. Demnach betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 1989 in der DDR rund 334 Mio. Tonnen (Abbildung 32, oben). In der Bundesrepublik lag der Ausstoß mit etwa 683 Mio. Tonnen mehr als doppelt so hoch. Bei Betrachtung einwohnerbezogener Werte kehrt sich das Bild um. Pro Kopf betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 1989 in der Bundesrepublik 11,1 Tonnen und in der DDR 20,5 Tonnen. Einwohnerbezogen lagen die Emissionen damals in kaum einem Land höher als in der DDR (Abbildung 32, unten). Auch die Emissionen im Verhältnis zum BIP lagen in der DDR weltweit mit am höchsten.

<sup>83</sup> Die energie- und CO<sub>2</sub>-intensive Zementproduktion findet sich praktisch in jedem Bundesland, was nicht zuletzt darauf zurückzuführen ist, dass Zement hauptsächlich als Bindemittel für Beton und Mörtel verwendet wird und die beiden Baustoffe nur über kurze Strecken transportiert werden können (infolge zeitlich kurzer Aushärtungseigenschaften).

Abbildung 32  
CO<sub>2</sub>-Emissionen in der DDR und Deutschland



CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, der Zementherstellung und der Gasabfackelung.

Quelle: US Department of Energy; eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Entwicklung der Emissionen nach der Einheit

Im Zuge der Einheit sind CO<sub>2</sub>-Emissionen in Ostdeutschland zwar stark gesunken, die gesamtdeutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen haben sich gegenüber dem Wert für Westdeutschland aber dennoch sprunghaft erhöht (Abbildung 32, oben). Die Emissionen pro Einwohner sind hingegen nur leicht angestiegen (Abbildung 32, unten). Die geringe Zunahme ist im Wesentlichen Folge der rückläufigen Emissionen in Ostdeutschland und der Zunahme der Bevölkerungszahl Deutschlands.

Die Entwicklung der Emissionen in Ostdeutschland ist v.a. von Rückgängen bei den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen geprägt. Diese sind von knapp 300 Mio. Tonnen im Jahre 1990 um fast die Hälfte auf etwa 164 Mio. Tonnen im Jahr 1995 gesunken. Der Rückgang der energiebedingten Emissionen in Ostdeutschland ist zum einen auf den starken wirtschaftlichen Einbruch und den damit verbundenen Rückgang des Primärenergieverbrauchs (von 1989 bis 1995 um fast 45 Prozent) zurückzuführen. Zum anderen wurde die Energieträgerstruktur in Ostdeutschland infolge der deutschen Einheit rasch auf emissionsärmere Energieträger umgestellt und die Braunkohlekraftwerke modernisiert, was zusammen zu einer starken Reduktion im Umwandlungssektor geführt hat. Der Anteil der besonders kohlenstoffhaltigen Braunkohle zur Deckung des ostdeutschen Primärenergieverbrauchs fiel von über zwei Dritteln im Jahre 1989 auf rund 38 Prozent im Jahre 1995.<sup>84</sup> Zudem haben Modernisierungen bei Gebäuden (u. a. Heizungssysteme) zu dem Rückgang der Emissionen im Bereich Gebäude und Haushalte beigetragen. Zu einer gegenläufigen Entwicklung kam es im Bereich Verkehr. Hier sind die Emissionen infolge der Zunahme der Anzahl an Pkw angestiegen. Ab dem Jahr 2000 ist insgesamt eine zunehmend parallele Entwicklung im „Westen“ und im „Osten“ zu beobachten.

### 03.3 Emissionen und Wohlstand

#### 03.3.1 Zusammenhang zwischen Emissionen und BIP

Zur Messung des Wohlstands eines Landes dient im Folgenden das BIP pro Kopf (Kasten 9). Historisch betrachtet besteht ein enger positiver Zusammenhang zwischen Emissionen und BIP. Abbildung 33 zeigt, dass ein höheres BIP pro Kopf tendenziell mit höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf einhergeht. Ein hohes BIP pro Kopf ist im Allgemeinen mit leistungsfähiger Industrieproduktion und einem entsprechenden Konsum der Bevölkerung verknüpft – beide Aktivitäten sind bislang mit der Verbrennung fossiler Energieträger verbunden –, beim Konsum z. B. bei der Ausstattung mit Fahrzeugen oder beheizten Wohnungen. Dabei weisen Länder, die unterhalb der Regressionsgerade<sup>85</sup> liegen, gemessen an ihrem BIP, relativ hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Länder, die oberhalb der Regressionsgerade liegen, weisen gegenüber ihrem BIP relativ geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Demnach haben bspw. Deutschland und die USA eine vergleichsweise geringe und China eine relativ hohe Emissionsintensität. Diese Emissionsintensität ist eng mit der Wirtschaftsstruktur und der Qualität der Stromerzeugung verbunden: Schwellenländer haben in der globalen Arbeitsteilung häufig höhere Anteile energieintensiver Branchen, die z. B. Rohstoffe umwandeln und verarbeiten (Bsp. Stahl, Grundstoffchemie, Kunststoffe, Nahrungsgrundstoffe), während heutige „entwickelte Industrieländer“ höhere Anteile weiterverarbeitender Industrien mit hohem Wissensanteil an der Wertschöpfung sowie hohe Anteile an Dienstleistungssektoren (z. B. Handel, Finanzen und Versicherungen, Tourismus, Gesundheit, industriennahe Dienstleistungen etc.) aufweisen.

<sup>84</sup> Ziesing, 1996.

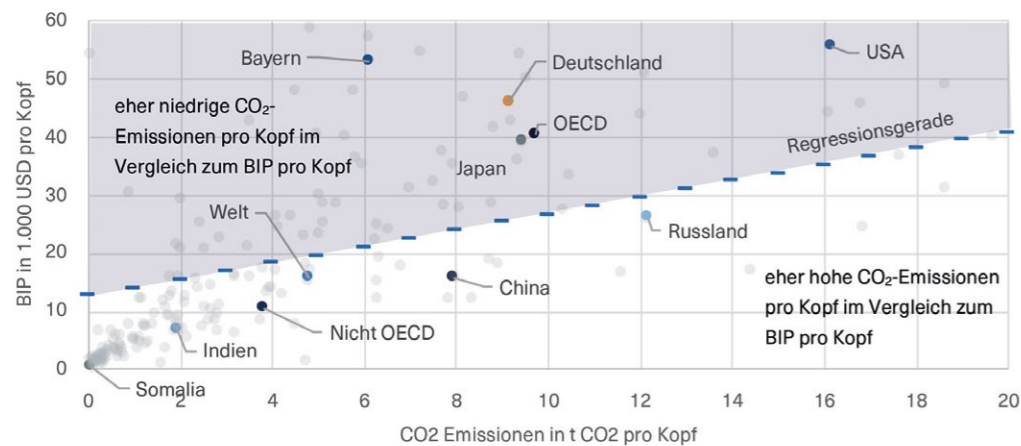
<sup>85</sup> Der Verlauf der Regressionsgerade wird so berechnet, dass die Summe der quadrierten Abweichungen der Messpunkte von der Regressionsgerade minimiert wird. In dem hier dargestellten Fall beschreibt die Regressionsgerade den Zusammenhang zwischen BIP pro Kopf und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf für die Länder im EDGAR-Datensatz.



### Kasten 9 Wohlstandsindikatoren

Zur Messung des Wohlstands eines Landes können verschiedene Indikatoren verwendet werden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen (z. B. BIP, Human Development Index, Index der Lebenszufriedenheit). Die Wohlstandsindikatoren sind in der Regel positiv mit dem BIP korreliert, dem nach wie vor wichtigsten Wohlstandsindikator. Das BIP misst den Gesamtwert aller Waren und Dienstleistungen, die innerhalb eines Jahres in einer Volkswirtschaft hergestellt wurden. Um einen Vergleich unterschiedlich großer Wirtschaftsräume miteinander zu ermöglichen, wird zumeist das BIP pro Kopf als Indikator verwendet.

Abbildung 33  
Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und BIP, 2018



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung.

Quelle: EDGAR-Datensatz; Länderarbeitskreis Energiebilanzen; eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Langsame Entkopplung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und BIP

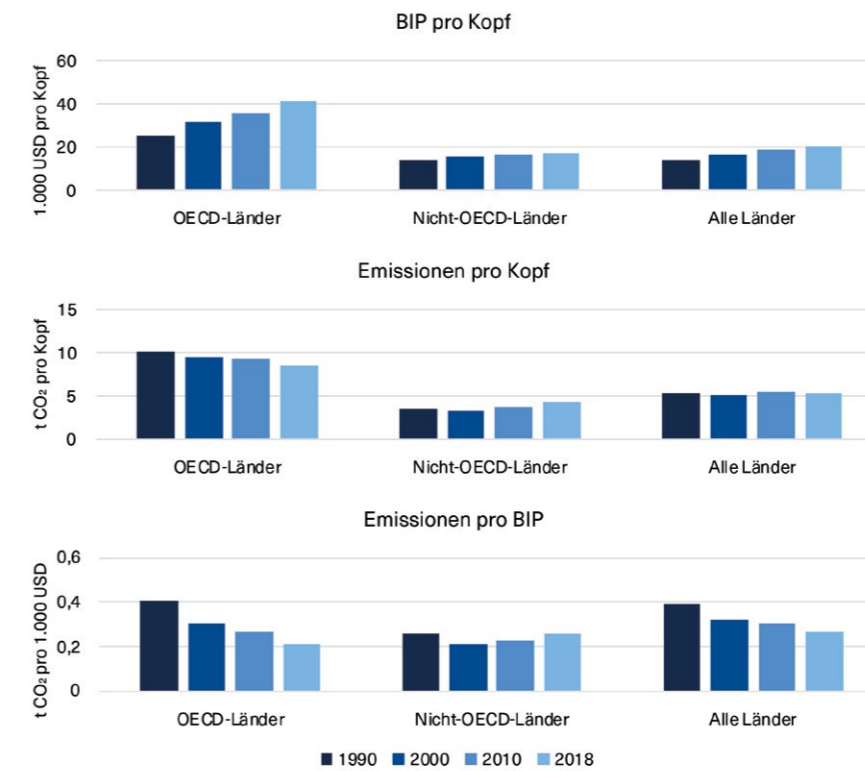
Die zeitliche Entwicklung von Emissionen und BIP zeigt – zumindest für einige wohlhabendere Länder – eine sukzessive Entkopplung (Abbildung 34, oben und Mitte): Während das BIP pro Kopf in den vergangenen Jahrzehnten weltweit gestiegen ist, haben sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf insgesamt kaum verändert. In der Gruppe der OECD-Länder waren die Emissionen pro Kopf – trotz eines kräftigen Wirtschaftswachstums – seit 1990 sogar rückläufig.<sup>86</sup>

Eine Abschwächung des Zusammenhangs zwischen BIP und Emissionen zeigt sich insbesondere bei Betrachtung der

Emissionsintensität, also dem Verhältnis von Emissionen und BIP bzw. den CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Einheit Wertschöpfung (Abbildung 34, unten). Die Emissionsintensität ist über alle Länder der Welt hinweg seit 1990 rückläufig, wobei die Nicht-OECD-Länder seit dem Jahr 2000 eine leicht steigende Emissionsintensität verzeichnen. Bei den sechs weltweit bedeutendsten Emittenten ist ein konstantes Absinken der Emissionsintensität zu verzeichnen. Eine Ausnahme bildet Russland, dessen Emissionsintensität von 1990 bis 2000 gestiegen ist, was im Wesentlichen mit dem Rückgang des russischen BIP zusammenhängt (Abbildung 26, oben).

86 Der Korrelationskoeffizient, der die Stärke des Zusammenhangs zwischen BIP und CO<sub>2</sub>-Emissionen angibt, ist in der Gruppe der OECD-Länder von 0,6 (stärkerer Zusammenhang) im Jahr 2000 auf 0,4 (schwächerer Zusammenhang) im Jahr 2018 gefallen.

Abbildung 34  
Zeitliche Entwicklungen des Zusammenhangs zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und BIP



Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, aus industriellen Prozessen sowie aus der Produktverwendung.

Quelle: EDGAR-Datensatz; eigene Darstellung Prognos, 2020

#### 03.3.2 Bestimmungsfaktoren des Zusammenhangs zwischen Emissionen und BIP

Der Zusammenhang zwischen Treibhausgas-Emissionen und BIP bzw. die langsame Entkopplung wird durch zwei Größen bestimmt, die zusammen die Treibhausgas-Intensität ergeben:

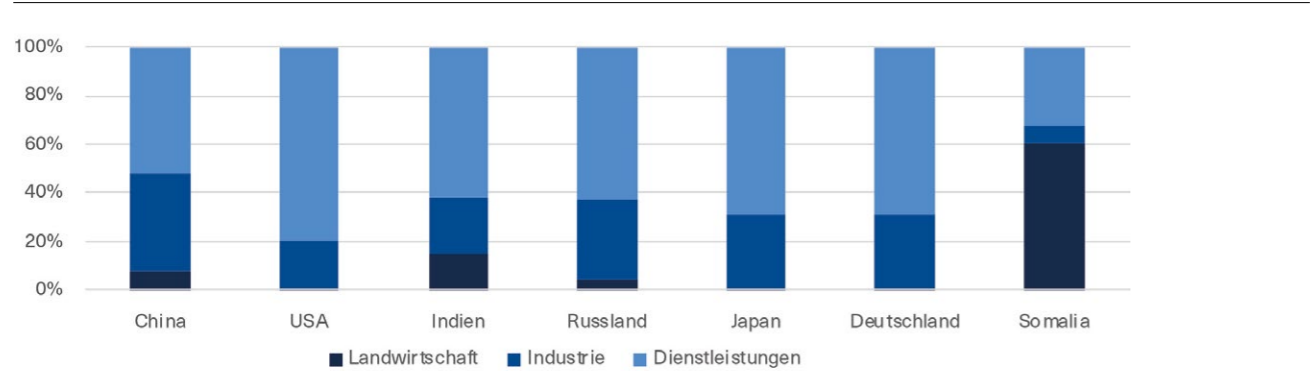
- durch die Energieintensität, also die je BIP-Einheit eingesetzte Menge an Energie (die Energieintensität hängt unter anderem von der Wirtschaftsstruktur und der Energieeffizienz in allen Verbrauchssektoren ab) und
- durch die Treibhausgas-Intensität des Energieverbrauchs, also die je Energieeinheit ausgestoßene Menge an Treibhausgas-Emissionen (die Treibhausgas-Intensität des Energieverbrauchs wird durch den Energiemix bestimmt).

**Rolle von Wirtschaftsstruktur und Energieeffizienz**

Typischerweise verlagert sich der Schwerpunkt der wirtschaftlichen Tätigkeit eines Landes im Zeitverlauf vom primären Sektor (u.a. Landwirtschaft) über den sekundären Sektor (Industrie) hin zum tertiären Sektor (Dienstleistungen). In der ersten landwirtschaftlich geprägten Phase sind BIP und die Emissionen tendenziell noch niedrig. Während der Industrialisierung steigen mit dem BIP Energieverbrauch und Emissionen. In dieser Phase besteht ein enger Zusammenhang zwischen BIP und Emissionen. Mit dem Bedeutungsgewinn der weniger energieintensiven Dienstleistungen in der dritten Phase steigen die Emissionen langsamer als das BIP oder gehen zurück. Abbildung 35 zeigt die Wirtschaftsstruktur der sechs bedeutendsten Emittenten.

Dieses idealtypische Muster gilt nicht generell. Neben der sektoralen Aufteilung der Wertschöpfung spielen auch die Energie- und Emissionsintensität einzelner Industriebranchen und ihre Anteile an der Industriestruktur im Land eine Rolle für den Zusammenhang zwischen Emissionen und BIP. Zudem kann ein Anstieg der Energieeffizienz in der Industrie dazu führen, dass bei unverändertem industriellem Anteil am BIP die Emissionen stagnieren oder sinken. Hinzu kommen die Struktur des Umwandlungssektors und insbesondere die Art der Stromerzeugung. Stromerzeugung aus Braun- oder Steinkohle ist sehr emissionsintensiv, insbesondere bei alten Kraftwerken mit niedrigem Wirkungsgrad und ohne Wärmeauskopplung.

Abbildung 35  
**Aufteilung der Wertschöpfung auf Landwirtschaft, Industrie und Dienstleistungen in ausgewählten Ländern**



Werte für 2017, Indien für 2016, Somalia für 2013

Quelle: CIA World Factbook; eigene Darstellung Prognos, 2020

Infolge des sektoralen Entwicklungsmusters ist zu erwarten, dass BIP und Emissionen in landwirtschaftlich geprägten Entwicklungsländern vergleichsweise niedrig sind. In (Schwellen-)Ländern, die durch die Dominanz des sekundären Sektors gekennzeichnet sind, dürfte hingegen ein starker Zusammenhang zwischen BIP und Emissionen bestehen, der sich mit der Entwicklung hin zu einer Dienstleistungswirtschaft abschwächt. Die Entwicklung zur Dienstleistungswirtschaft geht in der Regel mit einem Rückgang der industriellen Produktion und einer Zunahme der Güterimporte einher. Die importierten End- und Zwischenprodukte werden nach dem Verursacherprinzip (im Gegensatz zum Verbraucherprinzip) in den Bilanzen des Herstellungslandes geführt – auch wenn die Produkte später exportiert werden.

Der Zusammenhang zwischen sektoraler Entwicklung, BIP und Emissionen zeigt sich beispielhaft bei einem Vergleich zwischen Somalia, China und Deutschland:

**Somalia**

In Somalia werden rund 60 Prozent der Wertschöpfung in der Landwirtschaft erwirtschaftet. Das Pro-Kopf-BIP beträgt unter 500 USD, die pro-Kopf-Emissionen etwa 0,06 Tonnen CO<sub>2</sub> und die Emissionen pro Wertschöpfung rund 0,13 Tonnen CO<sub>2</sub> je 1.000 USD.

**China**

In China werden rund 41 Prozent der Wertschöpfung in der Industrie erwirtschaftet. Verglichen mit Somalia hat China ein höheres Pro-Kopf-BIP (< 16.000 USD), höhere Pro-Kopf-Emissionen (8 Tonnen CO<sub>2</sub>) und höhere Emissionen pro Wertschöpfung (0,5 Tonnen CO<sub>2</sub> je 1.000 USD).

**Deutschland**

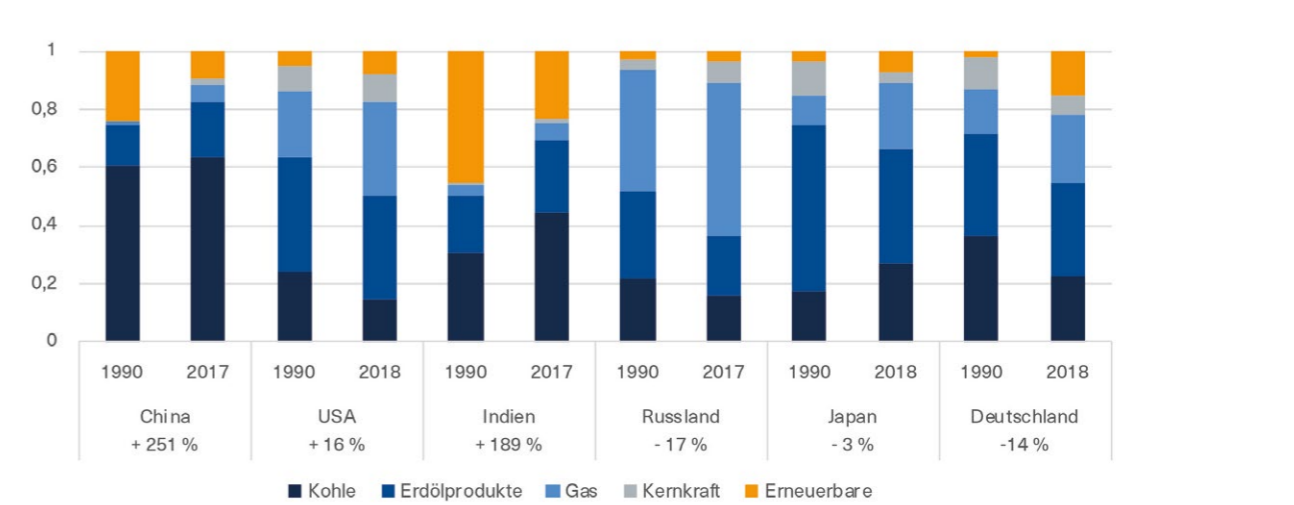
In Deutschland werden rund 69 Prozent der Wertschöpfung im Dienstleistungssektor erwirtschaftet. Verglichen mit China hat Deutschland ein höheres Pro-Kopf-BIP (> 46.000 USD) bei ähnlichen Pro-Kopf-Emissionen (9 Tonnen CO<sub>2</sub>) und niedrigere Emissionen pro Wertschöpfung (0,2 Tonnen CO<sub>2</sub> je 1.000 USD).

**Rolle des Energiemix**

Der Energiemix bezeichnet die Kombination verschiedener Energieträger (z.B. Kohle, Erdöl, Sonnenenergie, Windenergie) bei der Bereitstellung von Energie. Durch eine verstärkte Nutzung erneuerbarer und treibhausgasarmer Energieträger können die Emissionen auch bei steigendem Energieverbrauch sinken, womit eine Entkopplung von Energieverbrauch und Emissionen möglich und zunehmend häufig auch zu beobachten ist. In den USA, Russland und Deutschland ist der Anteil fossiler Energieträger am Primärenergieverbrauch seit 1990 gesunken (Abbildung 36). Insbesondere sinkende Anteile von Kohle und Erdölprodukten bedeuten eine geringere Emissionsintensität pro Energieeinheit. In China, Indien und Japan sind die Anteile fossiler Energieträger hingegen gestiegen und die Emissionsintensität pro Energieeinheit hat sich damit erhöht.

Für die gesamten Emissionen kommt zu der Emissionsintensität pro Energieeinheit noch die Menge des Primärenergieverbrauchs hinzu. Diese Menge ist in den USA und insbesondere in China und Indien seit 1990 deutlich gestiegen (+16 Prozent, +251 Prozent und +189 Prozent) und in Russland, Japan und Deutschland zurückgegangen (-17 Prozent, -3 Prozent, -14 Prozent). Für Japan ergeben sich aus dem geringfügig sinkenden Primärenergieverbrauch und der leicht gestiegenen Emissionsintensität seit 1990 zwei gegenläufige Effekte auf die Emissionen. Insgesamt überwiegt der Anstieg der Emissionsintensität, sodass die japanischen Emissionen seit 1990 leicht zugenommen haben. Die seit 2011 deutlich gestiegene Emissionsintensität Japans beruht primär auf einem Energieträgerwechsel von Kernenergie zu Erdgas und Kohle infolge der Kernschmelze im Kraftwerk Fukushima Daiichi (Abbildung 21).

Abbildung 36  
**Aufteilung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträger**



Die Prozentzahlen zeigen die Veränderung in der Struktur des gesamten Primärenergieverbrauchs von 1990 bis 2017 bzw. 2018. Erneuerbare enthält Wasserkraft, Solar, Wind, Biotreibstoffe und Abfälle gemäß IEA-Abgrenzungen.

Quelle: IEA World Energy Balances 2019; eigene Darstellung Prognos, 2020

# 04 Klimaschutzziele und -maßnahmen

**Das Paris-Abkommen verpflichtet erstmals alle Länder zum Klimaschutz. Mit den bisherigen Maßnahmen werden die Ziele jedoch kaum erreicht.**

## Inhalte

<b>04.1 Klimaschutzziele in Deutschland, Europa und global</b>	<b>66</b>
04.1.1 International vereinbarte Klimaschutzziele	67
04.1.2 Europäische Klimaschutzziele	73
04.1.3 Deutsche Klimaschutzziele	76
<b>04.2 Erfüllung der Klimaschutzziele in Europa und Deutschland</b>	<b>78</b>
04.2.1 Erfüllung der Klimaschutzziele in Europa	78
04.2.2 Erfüllung der Klimaschutzziele in Deutschland	79
<b>04.3 Beitrag bisheriger und neuer Maßnahmen zur Erfüllung der Klimaschutzziele in Deutschland</b>	<b>82</b>
04.3.1 Überblick über die bisherigen und neuen Maßnahmen	82
04.3.2 Energiewirtschaft	84
04.3.3 Gebäude	85
04.3.4 Verkehr	86
04.3.5 Industrie	87
04.3.6 Landwirtschaft	87

## 04.1 Klimaschutzziele in Deutschland, Europa und global

Der formale Anspruch von Klimaschutzzielen ist die Bekämpfung der anthropogenen Erderwärmung. Letztlich geht es dabei um die Aufrechterhaltung der Lebensgrundlagen und Entwicklungsmöglichkeiten für alle Menschen und Länder in den uns bekannten Formen technisch unterstützter Zivilisation und damit auch um das individuelle und gesellschaftliche Wohlergehen. Aufgrund ihres globalen Charakters waren und sind die Klimaschutzziele immer wieder Gegenstand internationaler Vereinbarungen, die bestenfalls in nationales Recht (oder Gemeinschaftsrecht) überführt und präzisiert werden. Zum Erreichen der Klimaschutzziele wird typischerweise eine Reduktion der Treibhausgas-Emissionen (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, CO<sub>2</sub>-Äq.) bis zu einem bestimmten Zeitpunkt angestrebt. Das Reduktionsziel ist in der Regel entweder als absoluter Emissionswert oder als relative Verringerung der Emissionen gegenüber einem Referenzjahr, zumeist 1990 oder 2005, definiert. Neben der Reduktion der Treibhausgas-Emissionen wird teilweise auch der Effekt von Treibhausgas-Senken<sup>87</sup> berücksichtigt.

Ein zentrales Problem der Klimaschutzpolitik liegt in der Schwierigkeit, alle bedeutenden Emittentenländer einzubinden. Gelingt dies nicht, steht das Erreichen der globalen Klimaschutzziele bzw. die Eindämmung des Klimawandels infrage. Zum einen wird es in Ländern ohne Klimaschutzverpflichtungen zu keiner nennenswerten Emissionsreduktion kommen. Zum anderen kann es infolge der Emissionsvermeidung in Ländern mit Klimaschutzzielen zur Verlagerung von Emissionen in Länder ohne Klimaschutzziele kommen (Carbon Leakage, das bedeutet die regionale Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen). Dadurch kann die ursprüngliche Emissionsreduktion auf globaler Ebene zumindest teilweise zunichtegemacht werden. Bei der Verlagerung der Emissionen stehen zwei Wirkungsmechanismen im Vordergrund:

<sup>87</sup> Als Senken für Treibhausgase werden Systeme bezeichnet, die in der Lage sind, der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen und zu speichern (z. B. Wälder, Böden, Meere).

- Direkte Verlagerung der Produktion emissionsintensiver Güter in Länder ohne entsprechende Klimaschutzziele. Dies wird vor allem dann für Unternehmen attraktiv, wenn aufgrund von Klimaschutzaufgaben die Produktionskosten im bisherigen Produktionsland einseitig steigen.
- Indirekte Verlagerung über Preissignale. Preissignale können sich bspw. in Form sinkender Weltmarktpreise ergeben, wenn die Nachfrage nach emissionsintensiven Gütern (z. B. fossile Energieträger) in einem großen Land abnimmt. Führen die sinkenden Weltmarktpreise zu einer Zunahme der Nachfrage nach diesen Gütern in anderen Ländern kommt es zu einer Verlagerung der Emissionen.

### Kasten 10

#### Möglichkeiten Deutschlands und Bayerns, den Klimawandel zu beeinflussen

##### Treibhausgas-Emissionen

Bei Erfüllung des Ziels der Klimaneutralität würde Deutschland seine gesamten (Netto-)Treibhausgas-Emissionen auf null reduzieren. Mit einem Anteil von rund zwei Prozent an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen würde die alleinige Emissionsreduktion Deutschlands für das Weltklima jedoch keinen spürbaren Effekt erzielen.

##### Rolle eines Vorbildes und Multiplikators

Deutschland und Bayern können die Rolle eines Vorbildes und Multiplikators einnehmen, wenn es gelingt zu zeigen, dass die Verfolgung und Erfüllung ambitionierter Klimaschutzziele – ohne gesellschaftliche Verwerfungen – technisch und wirtschaftlich möglich sind. Dies umfasst u. a. die Möglichkeit Deutschlands und Bayerns, technische Lösungen zur Treibhausgas-Reduktion zu verbessern oder neue zu entwickeln und diese international zu vermarkten. Dadurch können Nachahmer motiviert werden, ihre Treibhausgas-Emissionen ebenfalls zu reduzieren bzw. sich internationalen Klimaschutzvereinbarungen anzuschließen. Somit könnte Deutschland indirekt einen substantziellen Einfluss auf den Klimawandel nehmen.

##### 04.1.1 International vereinbarte Klimaschutzziele

Die völkerrechtliche Grundlage für internationale Klimaschutzvereinbarungen bildet die 1994 in Kraft getretene Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), die bis heute von über 190 Staaten ratifiziert wurde. Hauptziel der UNFCCC ist die Stabilisierung der Treibhausgas-Konzentrationen, um eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems zu verhindern. Um dieses Ziel zu erreichen, haben die Vertragsparteien verschiedene Beschlüsse und Vereinbarungen gefasst. Die beiden wichtigsten internationalen Klimavereinbarungen bilden das Kyoto-Protokoll und das Abkommen von Paris.

Neben der UNFCCC hat sich die internationale Staatengemeinschaft im Rahmen der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (Sustainable Development Goals, SDG) u. a. dazu bekannt, dringende Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen zu unternehmen. Die SDGs sind jedoch völkerrechtlich nicht bindend und können mit Klimaschutzmaßnahmen in Zielkonflikten stehen (Kasten 11).

## Kasten 11


















## Ziele der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung

Die Vereinten Nationen haben im Jahr 2015 insgesamt 17 Ziele zur Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer sowie ökologischer Ebene verabschiedet; die sogenannten Sustainable Development Goals bzw. SDGs (Abbildung 37). Die Ziele haben Eingang in die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie sowie in das Rahmenprogramm der Europäischen Union für Forschung und Innovation (Horizon 2020) gefunden. Auch die Bayerische Nachhaltigkeitsstrategie, an deren Fortschreibung aktuell gearbeitet wird, soll einen Beitrag zur Umsetzung der SDGs leisten.

Die SDGs sollen ein menschenwürdiges Leben ermöglichen und dabei gleichsam die natürlichen Lebensgrundlagen dauerhaft bewahren. Allerdings sind Klimaschutzmaßnahmen nicht nur mit Synergien, sondern auch mit Zielkonflikten in Bezug auf die Nachhaltigkeitsziele verbunden. Insgesamt dürfte die Anzahl der positiven Effekte zwar überwiegen, die Nettowirkung hängt aber letztlich u. a. von Geschwindigkeit, Ausmaß und Zusammensetzung der Veränderungen, den lokalen Gegebenheiten sowie der Handhabung des Systemübergangs ab. Bei der energetischen Nutzung von Biomasse (z. B. Mais, Zuckerrüben, Raps, Holz, Stroh, Chinaschilf, Biogas aus Güllevergärung) können sich bspw. Zielkonflikte zwischen Klimaschutz auf der einen Seite sowie Nahrungsmittelbedarf und Biodiversität auf der anderen Seite ergeben, zumindest bei mangelhafter Ausgestaltung der Maßnahmen. Auf Grundlage relevanter Minderungsoptionen zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels verortet der IPCC potenzielle Synergien insbesondere bei den Zielen 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“, 3 „Gesundheit und Wohlergehen“, 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“, 12 „Nachhaltige/r Konsum und Produktion“ und 14 „Leben unter Wasser“. Mögliche Zielkonflikte werden hingegen v. a. bei den Zielen 1 „Keine Armut“, 2 „Kein Hunger“ und 6 „Sauberes Wasser“ gesehen – zumindest, wenn die Minderungsoptionen nicht sorgfältig ausgestaltet und durchgeführt werden.<sup>88</sup>

Abbildung 37

## 17 UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung

	Keine Armut		Bezahlbare und saubere Energie		Maßnahmen zum Klimaschutz
	Kein Hunger		Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum		Leben unter Wasser
	Gesundheit und Wohlergehen		Industrie, Innovation und Infrastruktur		Leben an Land
	Hochwertige Bildung		Weniger Ungleichheiten		Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen
	Geschlechtergleichheit		Nachhaltige Städte und Gemeinden		Partnerschaften zur Erreichung der Ziele
	Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen		Nachhaltige/r Konsum und Produktion		

The content of this publication has not been approved by the United Nations and does not reflect the views of the United Nations or its officials or Member States.

Quelle: Bundesregierung; Vereinte Nationen, <https://www.un.org/sustainabledevelopment>

## Internationale Ziele bis 2020: Kyoto-Protokoll

Durch den zweiten Verpflichtungszeitraum des Kyoto-Protokolls (Kyoto II), der durch das Doha Agreement beschlossen wurde, hat sich die internationale Staatengemeinschaft zur Reduktion von Treibhausgasen bis 2020 verpflichtet. Allerdings sind die Regelungen des Kyoto-Protokolls schon länger nicht mehr ausreichend, zumal die zuletzt teilnehmenden 37 Staaten zusammen weniger als 15 Prozent der globalen Emissionen verantworten. Unter den 37 Staaten mit Reduktionsverpflichtungen befinden sich die 28 EU-Staaten und neun weitere Staaten.<sup>89</sup> Länder mit besonders hohen Treibhausgas-Emissionen wie China, die USA, Indien, Russland und Japan haben sich dem Abkommen nicht angeschlossen. Im Durchschnitt verpflichteten sich die 37 teilnehmenden Länder, ihre Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2020 um 18 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Die EU hatte sich ein Reduktionsziel für die Gesamtemissionen aller Mitgliedstaaten von 20 Prozent gesetzt.<sup>90</sup> Das Kyoto-Protokoll läuft Ende 2020 aus.

## Internationale Ziele bis 2030: Das Abkommen von Paris

Anders als im Kyoto-Protokoll haben sich beim Paris-Abkommen im Dezember 2015 erstmals alle Staaten der Erde auf ein rechtsverbindliches Klimaschutzübereinkommen geeinigt. Mit Stand Januar 2020 hatten 187 der 197 Unterzeichnerstaaten das Abkommen ratifiziert, darunter auch die EU und Deutschland (Ratifikation am 5. Oktober 2016). Mit der Ratifizierung sind die Staaten völkerrechtlich verpflichtet, Maßnahmen zur Erreichung der Ziele des Klimaschutzabkommens zu ergreifen. Kern des Paris-Abkommens bildet das globale Ziel, die Erderwärmung gegenüber vorindustriellen Werten langfristig auf „deutlich unter“ 2 Grad C zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, den Anstieg auf 1,5 Grad C zu begrenzen. Um diese Ziele zu erreichen, verpflichtet der Vertrag alle Staaten, nationale Klimaschutzbeiträge (Nationally Determined Contributions, NDC) zu beschließen und umzusetzen (Kasten 12). Bisher haben 186 Länder nationale Klimaschutzbeiträge vorgelegt. Sie reichen jedoch nicht aus, um die Obergrenze von 2 Grad C einzuhalten. Daher müssen die Staaten ihre Klimaschutzbeiträge 2020 und danach alle fünf Jahre aktualisieren.<sup>91</sup> Es gilt das Progressionsprinzip, wonach die neuen Beiträge ambitionierter sein müssen als die vorangegangenen. Dabei ist zu beachten, dass diese NDCs von den Staaten selbst beschlossen werden und nicht eigentlicher Bestandteil des Paris-Abkommens sind. Ab dem Jahr 2023 findet alle fünf Jahre durch die UNFCCC eine Bewertung statt, ob die bisher vorgelegten NDCs ausreichen, um die Klimaschutzziele des Paris-Abkommens zu erreichen. Die Europäische Union hat sich in ihrem ersten Klimaschutzbeitrag zu einer Treibhausgas-Reduktion um 40 Prozent der insgesamt von der Europäischen Union ausgestoßenen Treibhausgase bis 2030 im Vergleich zu 1990 verpflichtet.<sup>92</sup>

<sup>89</sup> Australien, Weißrussland, Island, Kasachstan, Liechtenstein, Monaco, Norwegen, Schweiz und die Ukraine.

<sup>90</sup> Die Vereinbarung, dass die Europäische Union ihr Ziel gemeinsam erreichen will, bezieht Kroatien bereits mit ein, obwohl das Land erst 2013, also ein Jahr nach Verabschiedung des Doha Agreements, Mitglied der EU wurde.

<sup>91</sup> Mit den Marshallinseln, Moldawien und Suriname haben drei Länder inzwischen ihr zweites NDC vorgelegt (UNFCCC, 2020).

<sup>92</sup> Council of the European Union, 2015.

## Kasten 12

**Paris-Abkommen: Zusagen und Folgen möglicher Austritte**

Die nationalen Klimaschutzbeiträge beschreiben die von den einzelnen Ländern anvisierte Reduktion der Treibhausgase. Die Reduktionsziele können dabei verschiedene Zeiträume betreffen und unterschiedlich spezifiziert sein, bspw. im Verhältnis zum BIP oder als Veränderung gegenüber einem bestimmten Jahr in der Vergangenheit oder gegenüber einem bestimmten Szenario. Dies erschwert einen internationalen Vergleich der Klimaschutzbeiträge. Tabelle 2 zeigt die Hauptzusagen der Klimaschutzbeiträge bedeutender Emittenten.

Tabelle 2

**Zugesagte Klimaschutzbeiträge (NDCs) bedeutender Emittenten**

	Hauptzusage bis zum Jahr 2030	Anteil an den globalen CO <sub>2</sub> -Emissionen im Jahr 2018
China	Senkung der CO <sub>2</sub> -Intensität (Emission pro Einheit BIP) um 60 bis 65 %. Emissions-Peak soll um 2030 erreicht werden.	30 %
USA	Reduktion der Emissionen um 26 bis 28 % zwischen 2005 und 2025 (die USA sind inzwischen jedoch aus dem Abkommen ausgetreten, siehe unten)	14 %
EU	Reduktion der Emissionen um 40 % gegenüber 1990	8 %
Indien	Senkung der CO <sub>2</sub> -Intensität um 33 bis 35 % gegenüber 2005	7 %
Russland	Reduktion der Emissionen um 25 bis 30 % gegenüber 1990 unter Einbeziehung von Senken	5 %
Japan	Reduktion der Emissionen um 25 % gegenüber 2005	3 %
Südkorea	Reduktion der Emissionen um 37 % gegenüber einem Referenzszenario	2 %
Brasilien	Reduktion der Emissionen um 43 % gegenüber einem Referenzszenario (Brasilien hat inzwischen jedoch angekündigt, aus dem Abkommen austreten zu wollen)	1 %

Quelle: Puls und Thilo Schaefer, 2016; Farid et al., 2016; UNFCCC, 2020; EDGAR-Datensatz, eigne Darstellung Prognos, 2020

**Internationaler Vergleich der NDCs**

Eine aktuelle Studie (Larch und Wanker 2019) standardisiert die unterschiedlichen NDCs und ermöglicht damit deren näherungsweise Vergleichbarkeit. Dazu wird für jedes Land grundsätzlich berechnet, um wie viel die Treibhausgas-Emissionen infolge der Zusagen (NDCs) bis 2030 niedriger ausfallen als bei einem unterstellten Referenzszenario, das die Fortsetzung der bisherigen Politik annimmt (Business as Usual). Dabei zeigt sich eine deutliche Heterogenität der Reduktionsziele (Abbildung 38). Im Durchschnitt der 120 analysierten Länder liegen die zugesagten Treibhausgas-Einsparungen bei rund 14 Prozent. Brasilien weist mit 64 Prozent das mit Abstand ambitionierteste Ziel auf. Deutschland liegt mit rund 23 Prozent noch in den Top 30. Kurz dahinter folgen die USA mit 21 Prozent. Deutlich niedrigere Reduktionsziele verfolgen u. a. die VAE, Russland und Indien. Ihr Beitrag liegt praktisch darin, die Treibhausgas-Emissionen bis 2030 nicht zu erhöhen. Auch China hat sich mit etwa fünf Prozent ein relativ niedriges Ziel gesetzt.

Abbildung 38

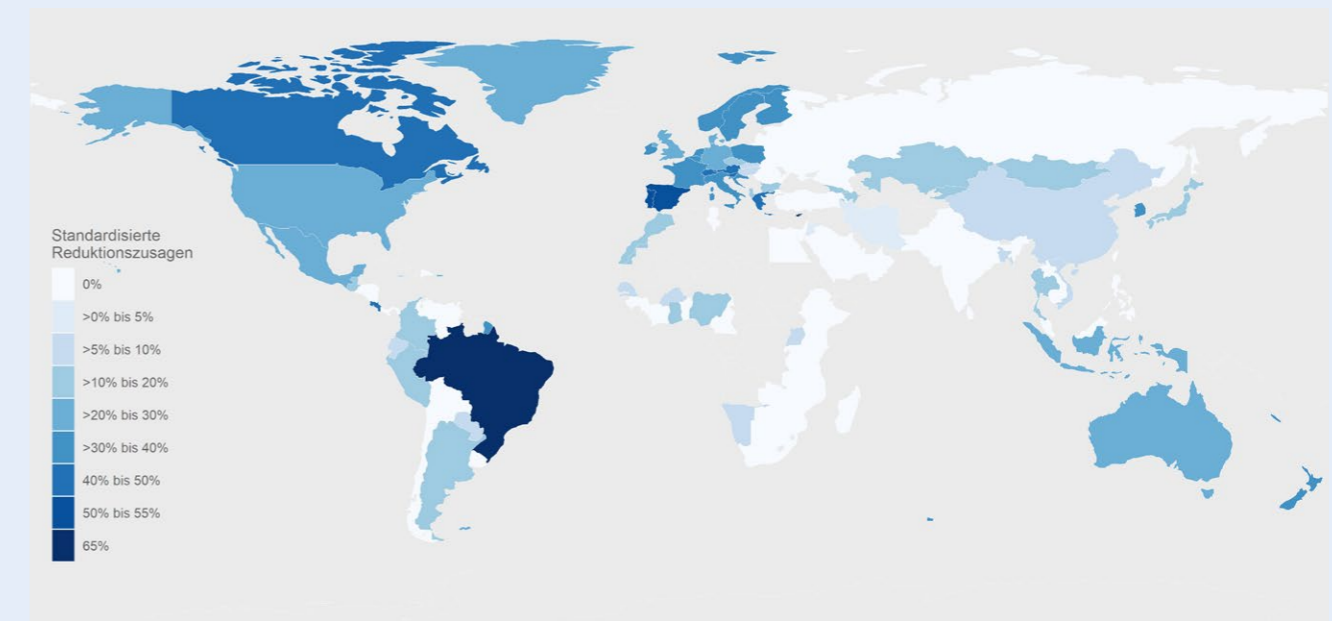
**Standardisierte Reduktionszusagen im Rahmen des Paris-Abkommens**

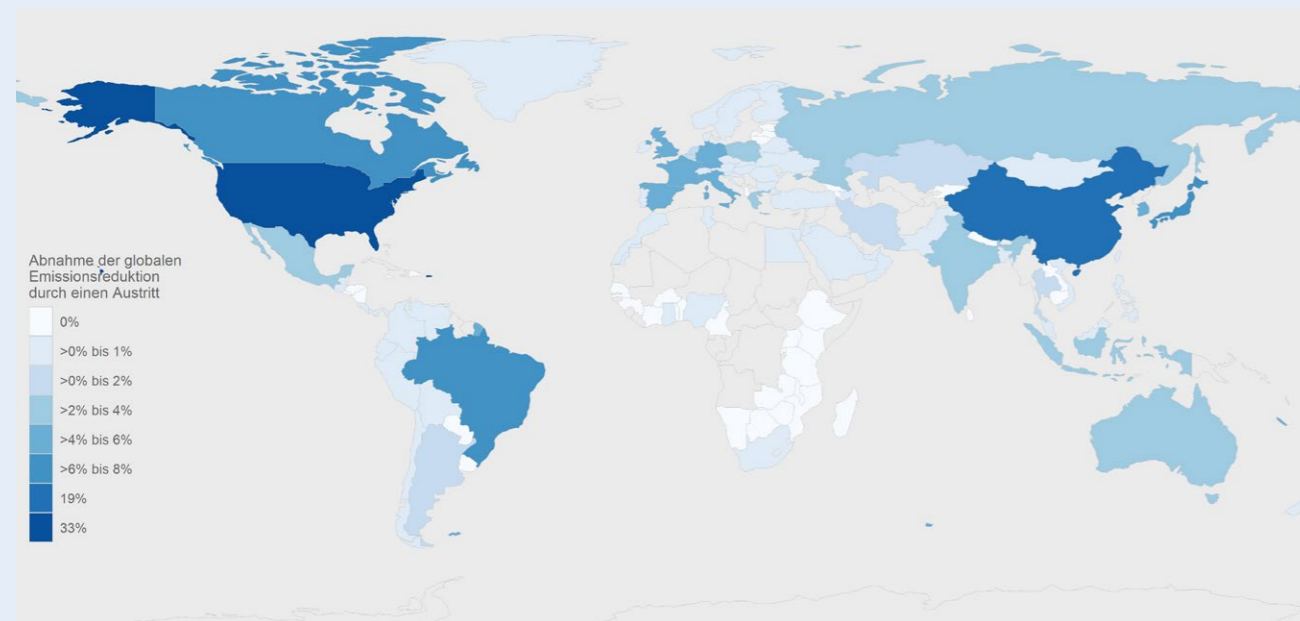
Abbildung zeigt näherungsweise, um wie viel die Treibhausgas-Emissionen in den einzelnen Ländern infolge der Zusagen (NDCs) bis 2030 niedriger ausfallen als im hier unterstellten Referenzszenario. Aufgrund eingeschränkter Datenverfügbarkeit konnten für die nicht eingefärbten Staaten standardisierte länderspezifische Reduktionszusagen nicht berechnet werden.

Quelle: Larch und Wanker, 2019; eigene Darstellung Prognos, 2020

**Austritt einzelner Länder**

Der Austritt eines Landes aus dem Paris-Abkommen hat weder Sanktionen zur Folge noch die automatische Kompensation der entstehenden „Reduktionslücke“ durch die verbleibenden Vertragsparteien. Larch und Wanker (2019) berechneten die Folgen des Austritts einzelner Staaten auf die weltweiten Emissionen unter der Annahme, dass der Austritt zur Aufgabe der jeweiligen NDC und zur Rückkehr auf einen Referenz-Emissionspfad führt. Bei den Berechnungen werden sowohl direkte Effekt als auch indirekte Effekte, die aus der Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen resultieren, berücksichtigt. Vereinfacht ausgedrückt, ergeben sich die Folgen für die weltweiten Emissionen zum einen aus der Höhe der – nun nicht mehr verfolgten – Reduktionszusagen (NDCs) und zum anderen aus dem Anteil des jeweiligen Landes an den weltweiten Emissionen. Den Berechnungen zur Folge hätte ein Austritt der USA den größten Impact, gefolgt von China, Japan, Kanada und Brasilien (Abbildung 39). Brasilien hat 2018 angekündigt, aus dem Paris-Abkommen auszutreten, ein formales Austrittsgesuch ist bei der UN bisher nur von den USA eingegangen.

Abbildung 39

**Bedeutung des Austritts einzelner Staaten aus dem Paris-Abkommen**

Die Abbildung zeigt eine Abschätzung des Rückgangs der globalen Emissionsreduktion durch den Austritt eines einzelnen Landes aus dem Paris-Abkommen und der damit verbundenen Aufgabe der jeweiligen NDC. Für die nicht eingefärbten Staaten liegen keine auswertbaren Daten vor.

Quelle: Larch und Wanker, 2019; eigene Darstellung Prognos, 2020

**Austritt der USA**

Die USA haben das Klimaabkommen 2016 ratifiziert und im Jahr 2017 ein Austrittsgesuch bei der UN eingereicht. Da das Abkommen in den ersten drei Jahren nicht gekündigt werden kann und anschließend eine Kündigungsfrist von einem Jahr besteht, ist ein formaler Austritt grundsätzlich frühestens zum 4. November 2020 möglich; also einen Tag nach der nächsten geplanten US-Präsidentenwahl.<sup>93</sup> Die USA haben die Möglichkeit, ihr Austrittsgesuch jederzeit (also bis zum letzten Tag der Kündigungsfrist) zurückzunehmen. Das BMU hat die von Präsident Trump genannten Gründe für den Ausstritt aus dem Klimaabkommen einem Faktencheck unterzogen, den entscheidende Punkte nicht bestehen.<sup>94</sup>

Nach Schätzungen von Larch und Wanker (2019) würde bei einem Austritt der USA die globale Reduktion der Treibhausgas-Emissionen um fast 33 Prozent niedriger ausfallen als bei einem Verbleib im Abkommen. Allerdings berücksichtigen die Berechnungen nicht, dass die Umsetzung der NDC in den USA im Wesentlichen die einzelnen Bundesstaaten leisten. Einige Bundesstaaten haben bereits angekündigt, auch bei einem Austritt der USA ihren Beitrag zum Abkommen leisten zu wollen. Zudem versprochen sich vermehrt auch große Unternehmen dem Klimaschutz. Damit dürften die Folgen eines Austritts letztlich geringer ausfallen, als die Berechnungen nahelegen.

<sup>93</sup> Ein früherer Austritt ist durch Kündigung der gesamten UNFCCC möglich.

<sup>94</sup> BMU, 2020.

**04.1.2 Europäische Klimaschutzziele****Europäische Klimaschutzziele für das Jahr 2020**

Im Einklang mit den Anforderungen des Doha Agreements setzte sich die EU mit dem climate and energy package das Ziel einer Treibhausgas-Reduktion für die gesamte EU um 20 Prozent bis 2020 im Vergleich zu 1990 (Abbildung 41). Dieses Gesamtziel ist auf europäischer Ebene in zwei Sektorziele aufgeteilt:

**Erstes Sektorziel**

Ein gemeinsames Sektorziel besteht für alle Bereiche, die durch das Europäische Emissionshandelssystem (European Trading System, ETS) reguliert werden (Kasten 13). Die regulierten Bereiche werden als ETS-Sektor bezeichnet; dieser umfasst insbesondere die Strom- und Wärmeerzeugung, die energieintensive Industrie und den kommerziellen Flugverkehr. Im ETS-Sektor besteht das Ziel, die Treibhausgas-Emissionen der EU bis zum Jahr 2020 um 21 Prozent im Vergleich zu 2005 zu reduzieren.

**Zweites Sektorziel**

Das zweite Sektorziel umfasst den sogenannten Nicht-ETS-Sektor (u. a. Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, kleine Industrieanlagen und Abfall). Im Nicht-ETS-Sektor besteht das Ziel, die Treibhausgas-Emissionen der EU bis zum Jahr 2020 um etwa zehn Prozent im Vergleich zu 2005 zu reduzieren. Dazu wurden im Rahmen der Lastenteilungsentscheidung (Effort Sharing Decision) für jeden Mitgliedstaat spezifische nationale Emissionsziele festgelegt.<sup>95</sup> Die nationalen Ziele reichen von einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen um bis zu 20 Prozent bis zu einem Zuwachs um bis zu 20 Prozent (Bulgarien). Für Deutschland wurde ein nationales Reduktionsziel von 14 Prozent festgelegt. Die nationalen Ziele sind bindend. Verfehlen Mitgliedstaaten ihre Ziele, können sie Emissionsrechte von anderen Mitgliedstaaten erwerben, sofern diese weniger Emissionen verursacht haben, als ihnen entsprechend der Effort Sharing Decision gewährt wurden. Werden die Ziele eines Mitgliedstaats trotz dieser Flexibilitätsregelungen nicht erreicht, muss dieser der Kommission innerhalb von drei Monaten einen Plan mit Abhilfemaßnahmen vorlegen.

**Kasten 13****Grundzüge des Europäischen Emissionshandelssystems****Funktionsweise**

Betreiber von Anlagen und Firmen, die im Rahmen des Europäischen Emissionshandelssystems (ETS) erfasst sind, müssen nachweisen, dass sie für ihre Treibhausgas-Emissionen über die entsprechende Menge an Emissionszertifikaten verfügen. Ein Emissionszertifikat berechtigt zum Ausstoß einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. Mit diesen Berechtigungen können die Unternehmen handeln. Der Staat bzw. die EU regelt durch die Ausgabe einer maximalen Anzahl an Emissionszertifikaten die Gesamtmenge an Treibhausgas-Emissionen im ETS-Sektor. Ziel ist es, den Unternehmen nicht vorzuschreiben, wer wo wie viel Emissionen einsparen muss, sondern ihnen die Flexibilität zu geben, Treibhausgas-Emissionen dort zu reduzieren, wo dies am kostengünstigsten möglich bzw. wo dies günstiger ist als der Kauf von Emissionsberechtigungen. Damit vereint der Emissionshandel drei Vorteile:

- Er ist treffsicher, da die Ziele durch die festgelegte Obergrenze an Zertifikaten erfüllt werden.
- Er ist volkswirtschaftlich effizient, da die Einsparungen dort erfolgen, wo es am wenigsten kostet.
- Er fördert Innovationen, da er Anreize setzt, nach neuen kostengünstigen Einsparmöglichkeiten zu suchen

<sup>95</sup> Europäische Kommission, 2013.

### Erfasste Sektoren und Treibhausgase

Gegenwärtig sind nicht alle Sektoren und Treibhausgase vom ETS erfasst. Die vom ETS erfassten Treibhausgase umfassen neben CO<sub>2</sub> auch Lachgas und perfluorierte Kohlenwasserstoffe. Europaweit umfasst das ETS derzeit etwa 11.000 Unternehmen, die zusammen rund 40 Prozent der europäischen Treibhausgas-Emissionen ausmachen.<sup>96</sup> Seit 2012 ist zudem der gewerbliche innereuropäische Luftverkehr in das ETS integriert. In Deutschland nehmen gegenwärtig über 1.900 Energie- und Industrieanlagen am Emissionshandel teil.

Die vom ETS erfassten Sektoren sind:

- Strom- und Wärmeerzeugung (v. a. große Feuerungsanlagen)
- Energieintensive Industriezweige (z. B. Raffinerien, Stahlwerke und Produktionsstätten von Eisen, Aluminium, Metallen, Zement, ungelöschtem Kalk, Glas, Keramik, Zellstoff, Papier, Karton, Säuren und organischen Grundchemikalien)
- Herstellung von Salpetersäure, Adipinsäure, Glyoxylsäure und Glyoxal
- Gewerbliche Luftfahrt (bis 31. Dezember 2023 nur mit Flügen zwischen Flughäfen im Europäischen Wirtschaftsraum).

### Zuteilung der Emissionsrechte und Preisbildung

Seit dem derzeit laufenden Handelszeitraum (2013–2020) gelten in allen EU-Mitgliedstaaten dieselben Regeln für die Zuteilung der Emissionsrechte. Das Standardverfahren für die Zuteilung ist die Versteigerung. Der Preis der Zertifikate bzw. Emissionen entsteht somit am Markt. Die Preisbildung erfolgt über ein EU-weites Gesamtbudget („Cap“), durch das die maximal erlaubte Emissionsmenge bestimmt wird. Das Gesamtbudget wird während der dritten Handelsperiode (2013–2020) jährlich um 1,74 Prozent und während der vierten Handelsperiode (2021–2030) jährlich um 2,2 Prozent abgesenkt. Im Jahr 2021 wird sich damit die Gesamtmenge der für das Jahr zur Verfügung stehenden Zertifikate auf 1,8 Mrd. belaufen; am Ende der vierten Handelsperiode wird das Cap nur noch 1,3 Mrd. Zertifikate betragen. Durch den damit angestrebten Preisanstieg für Emissionszertifikate sollen stärkere Anreize geschaffen werden, um die Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren.

Ein Teil der Emissionszertifikate wird nicht versteigert, sondern kostenlos an Unternehmen vergeben. Dabei werden Unternehmen begünstigt, bei denen die Gefahr besteht, dass die Produktion durch die Emissions-Bepreisung aus Europa hinaus verlagert würde und die Treibhausgase somit lediglich außerhalb der ETS-Staaten emittiert würden (Carbon Leakage). Der Anteil an Zertifikaten, die für eine kostenlose Zuteilung zur Verfügung stehen, wird im laufenden Handelszeitraum (2013–2020) schrittweise reduziert; von 80 Prozent im ersten Jahr auf 30 Prozent im Jahr 2020. Im vierten Handelszeitraum sinkt der Anteil auf null Prozent bis zum Jahr 2030, wobei weiterhin Ausnahmen für Fernwärme und Sektoren mit Carbon-Leakage-Risiken bestehen.

In Deutschland wird das ETS durch das Treibhausgasemissionshandelsgesetz (TEHG) umgesetzt. Zuständig für die Umsetzung ist die Deutsche Emissionshandelsstelle des UBA.

### Emissionsrechtehandel

Neben den Auktionen können Unternehmen am Markt zusätzliche Verschmutzungsrechte zukaufen oder nicht benötigte Emissionszertifikate verkaufen. Durch ein Überangebot an Zertifikaten in den ersten Handelsperioden kam es zu einem deutlichen Preisverfall, wodurch die Anreize der teilnehmenden Unternehmen gering waren, in emissionsärmere Technologien zu investieren. Nach Beschluss struktureller Reformen des ETS (u. a. verschärfte Minderungsziele, geänderte Zuteilungsregeln, Marktstabilitätsreserve) hat sich der Preis für Emissionszertifikate von durchschnittlich knapp sechs Euro je Tonne CO<sub>2</sub> im Jahr 2017 auf etwa 24 Euro am aktuellen Rand vervierfacht (Abbildung 40).

Abbildung 40  
Preisentwicklung der Emissionszertifikate, 2008–2020



Historische Preisentwicklung von EU-Emissionsberechtigungen (European Emission Allowances Futures, EUA) auf Basis täglicher Daten zwischen 08.04.2008 und 02.03.2020.

Quelle: Quandl; Intercontinental Exchange (ICE); eigene Darstellung Prognos, 2020

### Europäische Klimaschutzziele für das Jahr 2030

Zur Umsetzung ihres Klimaschutzbeitrags bis 2030 hat die EU mit dem 2030 climate and energy framework ein EU-weites Reduktionsziel von 40 Prozent bis 2030 im Vergleich zu 1990 festgelegt (Abbildung 41). Das Gesamtziel von 40 Prozent ist auf europäischer Ebene in zwei Sektorziele aufgeteilt:

#### ETS-Sektor

Im ETS-Sektor soll EU-weit eine Treibhausgas-Reduktion von 43 Prozent im Vergleich zu 2005 erreicht werden.

#### Nicht-ETS-Sektor

Für den Nicht-ETS-Sektor wurde ein Reduktionsziel von 30 Prozent im Vergleich zu 2005 festgelegt, das im Rahmen des Lastenausgleichs in unterschiedliche nationale Ziele aufgeteilt wurde. Deutschland muss seine Treibhausgas-Emissionen demnach um 38 Prozent im Vergleich zu 2005 reduzieren.<sup>97</sup> Die nationalen Ziele sind bindend. Jedoch besteht – ähnlich wie bei den Regelungen für die Klimaschutzziele bis 2020 – die Möglichkeit, Emissionsrechte anderer Mitgliedstaaten zu erwerben, sofern diese weniger Emissionen verursacht haben, als ihnen entsprechend des Lastenausgleichs gewährt wurden. Verfehlt ein Land seine Ziele, muss es der Kommission innerhalb von drei Monaten einen Plan mit Abhilfemaßnahmen vorlegen.

### European Green Deal

Im Rahmen der 2019 veröffentlichten Mitteilung über den European Green Deal kündigte die Europäische Kommission an, einen Plan vorzulegen, nachdem das EU-weite Reduktionsziel für 2030 von 40 Prozent im Vergleich zu 1990 auf 50 bis 55 Prozent erhöht werden soll (Abbildung 41).<sup>98</sup> Mit dem im März 2020 veröffentlichten Legislativvorschlag für ein europäisches Klimagesetz hat die Kommission den ersten Schritt zur Umsetzung des verschärften Ziels gemacht.<sup>99</sup> Eine gesetzliche Verankerung dieser Ziele auf EU-Ebene würde auch eine Anhebung der Klimaschutzziele für 2030 in den meisten Mitgliedstaaten zur Folge haben – so auch in Deutschland. Die Mitgliedstaaten müssten also den Klimaschutz schneller vorantreiben als bisher. Derzeit wird über eine Verschärfung der Reduktionsziele im Rahmen des New Green Deal diskutiert. Demnach könnte die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bis 2030 auf 55 bis 65 Prozent gegenüber 1990 angehoben werden.

Zudem bekräftigt der European Green Deal das Ziel der Klimaneutralität auf EU-Ebene bis 2050. Klimaneutralität ist dabei so zu verstehen, dass verbleibende Emissionen durch Treibhausgas-Senken ausgeglichen werden sollen. Diese Vision soll die Grundlage einer langfristigen Strategie darstellen, die 2020 an das UNFCCC übermittelt werden soll. Die Staats- und Regierungschefs der Mitgliedstaaten haben Ende 2019 angekündigt, das Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 zu unterstützen.<sup>100</sup> Auch das Ziel der Klimaneutralität soll mit dem von der Kommission vorgeschlagenen europäischen Klimagesetz rechtlich verankert werden. Zur Umsetzung der Klimaneutralität sieht der aktuelle Vorschlag einen Zielpfad für die Verwirklichung der Klimaneutralität sowie die Bewertung nationaler und europäischer Fortschritte und Maßnahmen vor. Dabei liegt die Befugnis zur Erarbeitung und gesetzlichen Umsetzung des Zielpfads laut aktuellem Vorschlag bei der Europäischen Kommission, wodurch diese im Vergleich zu den Mitgliedstaaten einen deutlichen Zuwachs an Kompetenzen im Bereich der rechtlichen Umsetzung der Klimaschutzziele erfahren würde. Allerdings muss der aktuelle Vorschlag noch das Gesetzgebungsverfahren der EU durchlaufen und dürfte dabei noch Anpassungen erfahren.

#### 04.1.3 Deutsche Klimaschutzziele

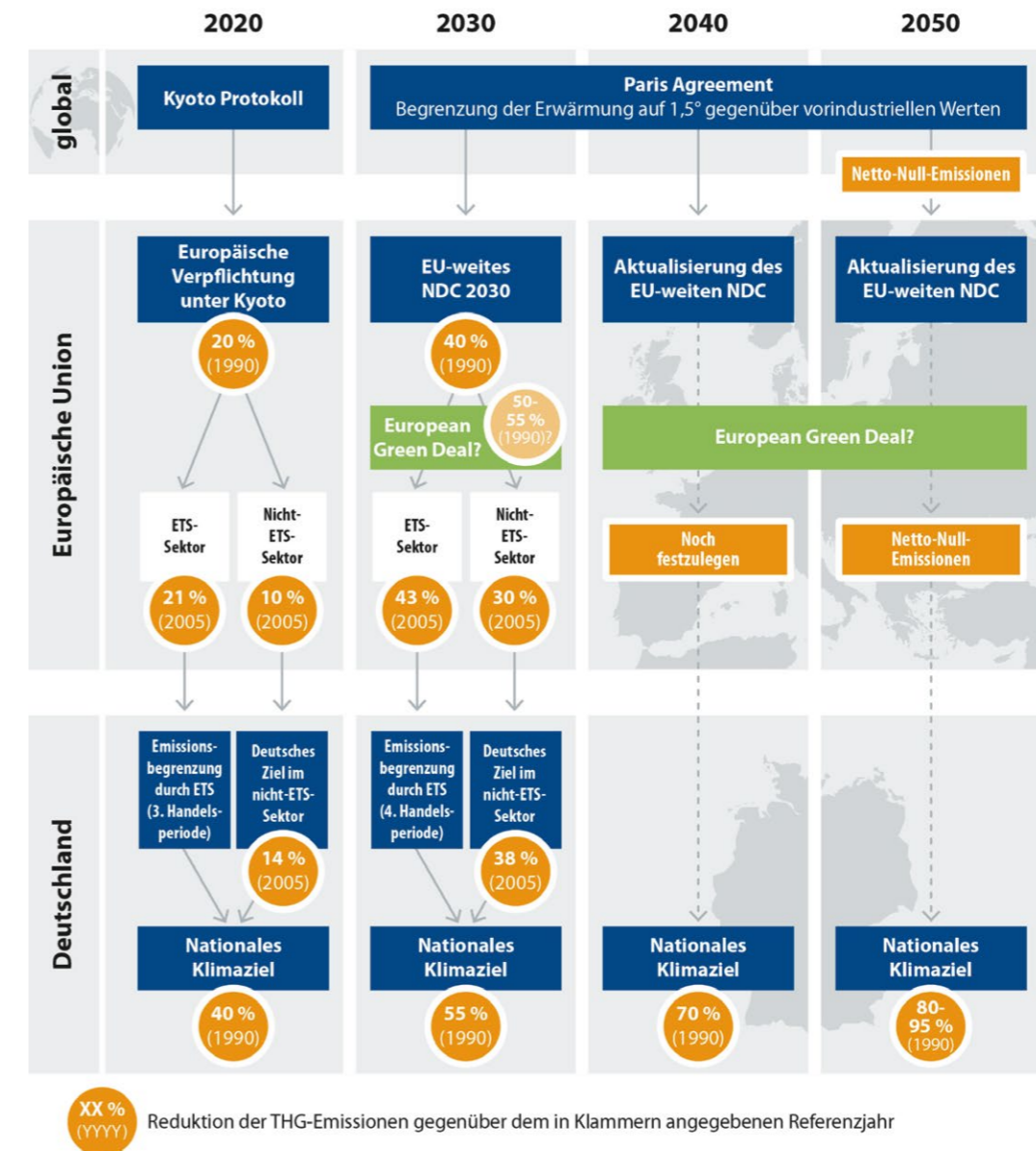
Die deutschen Klimaschutzziele sind eingebettet in ein Gerüst internationaler und europäischer Vereinbarungen (Abbildung 41). So ist Deutschland nach europäischen Entscheidungen und Verordnungen verpflichtet, die Treibhausgase im Nicht-ETS-Sektor im Vergleich zu 2005 bis 2020 um 14 Prozent<sup>101</sup> und bis 2030 um 38 Prozent<sup>102</sup> zu senken.

Mit dem Klimaschutzplan 2050 und dem 2019 verabschiedeten Klimaschutzgesetz hat sich die deutsche Bundesregierung das Ziel gesetzt, die nationalen Treibhausgas-Emissionen bis 2020 im Vergleich zu 1990 um 40 Prozent zu reduzieren. Mittelfristig sollen die Emissionen im Vergleich zu 1990 bis 2030 um mindestens 55 Prozent<sup>103</sup> und bis 2040 um 70 Prozent reduziert werden. Analog zur europäischen Ebene wird auch in Deutschland derzeit über eine Verschärfung der Reduktionsziele diskutiert. Für das Jahr 2050 wird das „Leitbild einer weitgehenden Treibhausgas-Neu-

neutralität“<sup>104</sup> verfolgt, was mit einer Treibhausgas-Reduktion von ca. 80 bis 95 Prozent näher beziffert wird. Neben dem Gesamtreduktionsziel wurden für das Jahr 2030 sektorspezifische Ziele im Klimaschutzgesetz verankert. Dabei erfolgt eine Differenzierung nach Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie und Landwirtschaft. Für diese Sektoren wurden sogenannte „Meilensteine“ zur Reduktion der sektorspezifischen Treibhausgas-Emissionen definiert (Tabelle 3). Für das Jahr 2050 existieren bisher keine sektorspezifischen Reduktionsziele.

Abbildung 41

Zielarchitektur der internationalen, europäischen und deutschen Klimaziele



NDC = Nationale Klimaschutzbeiträge (Nationally Determined Contributions).  
ETS = Emissionshandelssystem (Emission Trading System)

Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

<sup>98</sup> Europäische Kommission, 2019a.

<sup>99</sup> Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 (Europäisches Klimagesetz).

<sup>100</sup> European Council, 2019.

<sup>101</sup> Europäische Kommission, 2013.

<sup>102</sup> Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2018.

<sup>103</sup> Siehe auch: Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften, §3.

<sup>104</sup> BMU, 2016.



Tabelle 3

**Sektorale Emissionsziele bis 2030 in Deutschland**

Sektoren	Emissionen 1990	Emissionen 2016	Emissionen 2030	Reduktion bis 2030 gegenüber 1990
	Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq.	Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq.	Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq.	
Energiewirtschaft	466	343	175	62 %
Gebäude	209	130	70	67 %
Verkehr	163	166	95	42 %
Industrie	283	188	140	51 %
Landwirtschaft	88	72	58	34 %
Sonstige	39	11	5	87 %
<b>Gesamtsumme</b>	<b>1.248</b>	<b>909</b>	<b>543</b>	<b>56 %</b>

Quelle: BMU, 2016; UBA, 2019a; eigene Darstellung Prognos, 2020

## 04.2 Erfüllung der Klimaschutzziele in Europa und Deutschland

### 04.2.1 Erfüllung der Klimaschutzziele in Europa

#### Erfüllung der europäischen Klimaschutzziele

Die Europäische Union konnte ihre Treibhausgas-Emissionen zwischen 1990 und 2018 – bei einem gleichzeitigen realen Wirtschaftswachstum von 61 Prozent – um 23 Prozent reduzieren.<sup>105</sup> Ihr Reduktionsziel für 2020 in Höhe von 20 Prozent gegenüber 1990 wird sie somit insgesamt übererfüllen – auch ohne Berücksichtigung der kurzfristigen Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz.

#### Auswirkungen des Brexits

Die Auswirkungen des Brexits auf das Erreichen der europäischen Klimaschutzziele hängen im Wesentlichen davon ab, ob zum Ende der Übergangszeit zum 31.12.2020 ein Austrittsabkommen zwischen der EU und Großbritannien verhandelt wurde und ob Großbritannien unter diesem Austrittsabkommen weiterhin an der europäischen Klimaschutzpolitik teilnimmt. Ein sogenannter „No-Deal-Brexit“ oder ein Abkommen, unter dem Großbritannien aus dem EU-ETS und der Lastenverteilung austritt, würde das Erreichen der unveränderten Klimaziele auf EU-Ebene für die verbleibenden 27 Mitgliedstaaten deutlich erschweren.

In jedem Fall verlässt mit Großbritannien ein bedeutender Nettozahler die EU (6,9 Mrd. Euro Nettobeitrag zum EU-Haushalt 2018). Wird der Beitrag Großbritanniens zum EU-Haushalt durch die anderen Mitgliedstaaten nicht ausgeglichen, dürften insgesamt weniger EU-Mittel für den Klimaschutz zur Verfügung stehen.<sup>106</sup> Mit dem Brexit verlässt aber auch ein bedeutender Emittent von Treibhausgasen die EU. In 2018 hatte Großbritannien einen Anteil von einem Prozent an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen. In der EU belief sich der britische Anteil auf elf Prozent, womit Großbritannien nach Deutschland (22 Prozent) der zweitgrößte Emittent in der EU war.

<sup>105</sup> EEA, 2019.

<sup>106</sup> Im EU-Haushalt 2020 sind über 20 Prozent der Mittel für Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels vorgesehen.

#### Auswirkungen des Brexits auf die Ziele im ETS- und Nicht-ETS-Sektor

Im ETS-Sektor dürften die direkten Auswirkungen des Brexits gering bleiben, da die Europäische Kommission bereits Regelungen erlassen hat, die ein Überangebot an Emissionszertifikaten als Folge des Brexits verhindern sollen. Dennoch würde ein Austritt Großbritanniens aus dem ETS das System schwächen, da Synergien und Effizienz mit abnehmender Marktgröße schrumpfen.

Im Nicht-ETS-Sektor könnte der Brexit verhindern, dass das Klimaschutzziel einer Reduktion der EU-weiten Emissionen im Nicht-ETS-Sektor von 30 Prozent zwischen 2005 und 2030 erreicht wird. Denn Großbritannien hatte sich im Rahmen des Lastenausgleichs mit -37 Prozent zu überdurchschnittlich hohen Reduktionen verpflichtet. Um den Wegfall der Einsparungen durch Großbritannien zu kompensieren, müssten die übrigen Mitgliedstaaten ihre Treibhausgas-Emissionen wesentlich stärker reduzieren als geplant. Alternativ müssten die europäischen Klimaschutzziele angepasst werden.

### 04.2.2 Erfüllung der Klimaschutzziele in Deutschland

#### Erfüllung deutscher Klimaschutzziele

Deutschland hat sich verpflichtet, seine Treibhausgas-Emissionen bis 2020 um insgesamt 40 Prozent und bis 2030 um insgesamt 55 Prozent zu reduzieren. Infolge der Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz (Kasten 14) dürfte Deutschland das Klimaschutzziel 2020, entgegen früherer Erwartungen, doch noch erreichen.

Für eine Prognose der Erfüllung der deutschen Klimaschutzziele bis 2030 liegen neue Szenarienberechnungen vor,<sup>107</sup> die die Maßnahmen des Klimapakets bzw. Klimaschutzprogramms (KSP) einbeziehen. Sie zeigen, dass Deutschland damit die Ziele bis 2030 nahezu, jedoch nicht vollständig erreicht. Der Gesamt-Zielerreichungsgrad beträgt 95 Prozent. In jedem Sektor bis auf den Abfallsektor bleiben die berechneten Reduktionen unter denjenigen, die im Zielsystem festgelegt wurden. Ein relativ geringer Zielerreichungsgrad ist im Verkehr und in der Landwirtschaft zu verzeichnen; hier sind also noch erhebliche zusätzliche Anstrengungen erforderlich, um die für 2030 angestrebten Ziele zu erreichen. Die voraussichtliche Zielerreichung nach Sektoren ist in Tabelle 4 abgebildet.

Aufgrund der nicht vollständigen Zielerreichung ist es wahrscheinlich, dass in den nächsten Jahren noch weitere Maßnahmen beschlossen werden müssen und / oder die Preise im nationalen Emissionshandelssystem ab 2026 mit einer dann umgesetzten strikten Mengensteuerung sehr schnell stark ansteigen werden und somit weitere Emissionsreduktionen anreizen.

Sollten die Ziele – wie es sich in den Diskussionen zum European Green Deal bereits stark abzeichnet – für 2030 weiter verschärft und die Klimaneutralität bis 2050 festgeschrieben werden, sind ohnehin für die Umsetzung der dann erforderlichen technischen Maßnahmen, wie z. B. der Einsatz von Negativ-Emissionstechnologien und verstärkter Einsatz strombasierter synthetischer Energieträger, neue politische Instrumente sowie eine kohärente neue Rahmensetzung erforderlich.

<sup>107</sup> Prognos et al., tbp.

Tabelle 4  
Vergleich Sektorziele KSG und Szenario mit Klimaschutzplan

	Jahresemissionsmenge in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq.			
	Szenario KSP 2030	Sektorziele KSG 2030	Abweichung 2030	Zielerreichung 2030
Energiewirtschaft	183	175	8	97 %
Industrie	143	140	3	98 %
Gebäude	78	70	8	94 %
Verkehr	125	95	30	56 %
Landwirtschaft	64	58	6	82 %
Abfälle	5	5	0	100 %
Summe	598	543	55	92 %
<b>Gesamtziel KSP (-55 % ggü. 1990)</b>	<b>598 (-52,2 %)</b>	<b>562 (-55 %)</b>	<b>36</b>	<b>95 %</b>

Sektorziele und Gesamtziel gemäß Klimaschutzgesetz (KSG). Zielerreichungsgrad in Bezug auf die zwischen 1990 und 2030 angestrebte Minderung gemäß KSG.

Quelle: Prognos et al., 2020.

#### Kasten 14 Auswirkungen der Corona-Krise auf die deutsche Energiebilanz und die Erfüllung der Klimaschutzziele

##### Krisenbedingte Emissionsreduktion

Für die krisenbedingte Emissionsreduktion kommt es im Wesentlichen darauf an, wie lange die Corona-Krise andauert und welche wirtschaftlichen Folgen sie nach sich zieht. Die Schätzungen zu den Auswirkungen der Corona-Krise auf die Energie- bzw. Treibhausgas-Bilanz sind zwar mit größeren Unsicherheiten behaftet, die Krise wird (u. a. infolge von Störungen in den Lieferketten, Produktionsausfällen, Werksschließungen, Finanzierungs- und Liquiditätseingpässen, Ausgangsbeschränkungen sowie Rückgängen bei Nachfrage und Verkehrsleistungen im Güter- und Personenverkehr) aber voraussichtlich dazu führen, dass die Ziele bis 2020 doch noch erreicht oder sogar übererfüllt werden. Neue Schätzungen zeigen, dass die deutschen Treibhausgas-Emissionen unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Corona-Krise bis 2020 voraussichtlich um 40 bis 45 Prozent gegenüber 1990 sinken werden. Damit würde das Reduktionsziel 2020 i. H. v. 40 Prozent insgesamt erreicht. Die erwartete Emissionsminderung ist zum Großteil auf die Corona-Krise zurückzuführen. Ein kleiner Teil geht auf andere Entwicklungen zu Jahresbeginn 2020 zurück, die in vorherigen Schätzungen nicht berücksichtigt wurden (u. a. mildere Witterung, höhere Windstromproduktion und niedrigere Gaspreise als bisher angenommen).<sup>108</sup>

Der deutlichste Rückgang der Emissionen infolge der Corona-Krise wird – u. a. infolge von Produktionsausfällen und Werksschließungen – im Stromsektor erwartet. Die Emissionen im Stromsektor werden im Jahr 2020 voraussichtlich um insgesamt 30 bis 50 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. gegenüber 2019 zurückgehen. Im Verkehrssektor wird – v. a. infolge sinkender Verkehrsleistungen im Güter- und Personenverkehr – ein Rückgang von 7 bis 25 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. erwartet. Die erwarteten Rückgänge im Gebäudesektor (5 bis 15 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq.) beruhen nicht auf die Corona-Krise, sondern insbesondere auf der milden Witterung im bisherigen Jahresverlauf 2020, die einen geringeren Bedarf an Heizenergie bedingt. In der Landwirtschaft werden wesentliche Veränderungen der Treibhausgas-Emissionen gegenüber 2019 nicht erwartet.<sup>109</sup>

##### Einmalige Effekte

Allerdings bewirkt die Corona-Krise grundsätzlich nur einmalige Effekte, die nicht auf Klimaschutzmaßnahmen, sondern auf den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Beschränkungen und deren Folgen beruhen. Damit wird die Corona-Krise die gesamten Treibhausgas-Emissionen dauerhaft kaum senken können. Vielmehr ist zu vermuten, dass Klimaschutzinvestitionen infolge der Krise vermehrt unterlassen werden. Zudem werden immer mehr Forderungen nach einer Lockerung der Klimaschutzziele laut, um die

Wirtschaft angesichts der erwarteten starken Rezession zu entlasten. Die krisenbedingte Emissionsreduktion dürfte somit in den kommenden Jahren wieder aufgeholt und ggf. überkompensiert werden.<sup>110</sup> Ein solcher Rebound-Effekt hat sich auch im Zuge der Finanzkrise gezeigt. Im Jahr 2009 sanken die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 1,2 Prozent gegenüber dem Vorjahr und übersprangen 2010 bereits wieder das Vorkrisenniveau von 2008.

##### Langfristige Folgen

Langfristige Folgen der Corona-Krise für das Klima könnten allenfalls daraus resultieren, dass die zur Stützung von Wirtschaft und Gesellschaft bereitgestellten öffentlichen Mittel in klimaschutzrelevante Maßnahmen und Projekte geleitet werden:

- Das Corona-Hilfspaket der EU-Staaten (Wiederaufbaufonds) umfasst insgesamt 750 Mrd. Euro, davon sind 390 Mrd. Euro als nicht rückzahlbare Zuschüsse und 360 Mrd. Euro als Kredite vorgesehen. Die Gelder sollen nach parlamentarischer Ratifizierung durch die EU-Staaten zwischen 2021 und 2027 ausgezahlt werden. Dabei ist vorgesehen, insgesamt 30 Prozent der Mittel aus dem gesamten EU-Haushalt 2021 bis 2027 und dem Corona-Hilfspaket für Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels einzusetzen, bspw. in erneuerbare Energien, Elektrifizierung und Gebäudeisolation.
- Das Konjunktur- und Zukunftspaket der Bundesregierung umfasst insgesamt 130 Mrd. Euro. Davon sollen rund 50 Mrd. Euro in Zukunftsinvestitionen fließen, die neben Maßnahmen in den Bereichen Digitalisierung, Bildung und Forschung sowie Gesundheitssystem auch Maßnahmen in klimaschutzrelevanten Bereichen wie Mobilität und Energiewende umfassen. Die Maßnahmen im Bereich Mobilität betreffen bspw. eine Prämie beim Kauf eines Elektrofahrzeugs und den Ausbau der Ladesäulen-Infrastruktur; im Bereich Energiewende betreffen sie bspw. den Ausbau von erneuerbaren Energien, die Aufstockung beim CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm sowie die Förderung der Wasserstofftechnik.

Zudem könnte ein endgültiger Stopp beim Bau neuer Kohlekraftwerke einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Bisher wurden infolge der Corona-Krise allein in Asien rund 15 Bauprojekte mit einem Gesamtvolumen von rund 21 Mrd. Dollar verschoben. Der Grund hierfür liegt allerdings im Wesentlichen in den Störungen der Lieferketten und dem Schutz der Arbeiter. Zugleich genehmigten die Behörden in China zur Stützung der heimischen Wirtschaft allein in den ersten Märzwochen 2020 den Bau neuer Kohlekraftwerke mit mehr Kapazitäten (7.960 Megawatt) als alle im Gesamtjahr 2019 genehmigten (6.310 Megawatt).<sup>111</sup>

<sup>108</sup> Agora Energiewende, 2020b.

<sup>109</sup> Agora Energiewende, 2020b.

<sup>110</sup> Agora Energiewende, 2020b.

<sup>111</sup> Global Energy Monitor, 2020b.

### 04.3 Beitrag bisheriger und neuer Maßnahmen zur Erfüllung der Klimaschutzziele in Deutschland

#### 04.3.1 Überblick über die bisherigen und neuen Maßnahmen

Angesichts der auch langfristig projizierten Verfehlung der Klimaschutzziele (Teil II Kapitel 04.2),<sup>112</sup> wurde von der Bundesregierung das Klimaschutzprogramm 2030 (Klimapakets) am 9. Oktober 2019 verabschiedet, mit dem zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen beschlossen wurden. Ob diese ausreichen, um die angestrebten Ziele zu erreichen, wird angezweifelt.<sup>113</sup> Zur Erfolgskontrolle der Maßnahmen hat die Bundesregierung im Rahmen des Klimaschutzgesetzes die Gründung eines unabhängigen Expertenrats beschlossen. Der Rat wird ab dem Jahr 2021 die jährlichen Emissionsdaten der einzelnen Sektoren prüfen und bewerten. Sofern in einem Sektor die maximalen Emissionswerte überschritten werden, muss der zuständige Bundesminister mit einem Sofortprogramm nachsteuern. Eine Schwachstelle dieser Erfolgskontrolle wird darin gesehen, dass der Expertenrat keine eigenen Vorschläge zur Emissionsreduktion machen kann, sondern lediglich die durch die zuständigen Bundesministerien vorgelegten Sofortprogramme bewerten soll.<sup>114</sup>

Die in Deutschland inzwischen ergriffenen Maßnahmen können insgesamt einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen leisten. Tabelle 5 listet für jeden Sektor bedeutende Maßnahmen(-bündel) auf, die bereits ergriffen oder im Rahmen des Klimapakets verabschiedet wurden. Die Maßnahmen werden in den folgenden Kapiteln überblicksartig dargestellt und – sofern sie neu sind, anhand erster Einschätzungen von Forschungseinrichtungen – hinsichtlich ihres Beitrags zur Zielerreichung eingeordnet. Zum Teil wurden während der Bearbeitung dieser Studie Punkte ergänzt bzw. konkretisiert – z. B. die Wasserstoffstrategie, die bislang hauptsächlich Zielformulierungen macht.

Tabelle 5  
Klimaschutzmaßnahmen und deren Beitrag zur Treibhausgas-Reduktion, nach Sektoren (nicht abschließend)

	Bestehende Maßnahmen und deren projizierter Beitrag zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bis 2050 (gegenüber 1990)		Neue Maßnahmen im Rahmen des Klimapakets
übergreifend		61 %	– Klimapakets – Klimaschutzgesetz
Energiewirtschaft	EEG 2017 EU-ETS	71 %	– Ausbau erneuerbarer Energien bis 2030 auf einen Anteil von 65 % – Mindestabstandsregelungen für Windanlagen (zur Erhöhung der Akzeptanz) – Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2038 – Wasserstoffstrategie: Pläne zum Einsatz CO <sub>2</sub> -neutraler Wasserstofftechnologien und darauf aufbauenden alternativen Energieträgern wie Power-to-X-Verfahren
Gebäude	Energieeffizienzstrategie Gebäude	70 %	– Weitere Förder- und Beratungsangebote zur Gebäudesanierung – CO <sub>2</sub> -Bepreisung von fossilen Brennstoffen – Verbot des Einbaus von Ölheizungen ab 2026 – Gebäudeenergiegesetz
Verkehr	Elektromobilitätsgesetz  Förderung des Ausbaus der Ladeinfrastruktur und der Entwicklung alternativer Antriebe  Nationaler Radverkehrsplan	44 %	– Weitere Förderung der Elektromobilität und entsprechender Ladeinfrastruktur – Steigerung der Attraktivität des ÖPNV – CO <sub>2</sub> -Bepreisung von fossilen Treibstoffen – Wasserstoffstrategie: Pläne zum Einsatz CO <sub>2</sub> -neutralen Wasserstoffs, insbesondere im Luft- und Seeverkehr
Industrie	EU-ETS	52 % (Energieemissionen) 41 % (Prozessemissionen)	– Energieeffizienzstrategie 2050 – Wasserstoffstrategie: Pläne zum Einsatz CO <sub>2</sub> -neutralen Wasserstoffs
Landwirtschaft	Novelle der Düngeverordnung	25 %	– Weitere Senkung der Stickstoffüberschüsse – Emissionsminderung in der Tierhaltung

Maßnahmen im Rahmen des aktuellen Konjunktur- und Zukunftspakts der Bundesregierung sind nicht aufgelistet.

Quelle: Klimaschutzgesetz, 2019; eigene Darstellung Prognos, 2020

112 BDI, 2018.

113 Agora Energiewende, 2020a.

114 Klima Allianz, 2019.

### 04.3.2 Energiewirtschaft

#### Bisherige Maßnahmen

##### Ausbau erneuerbarer Energien gemäß dem EEG 2017

Eine zentrale Maßnahme der Energiewirtschaft zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen stellt der Ausbau von Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen sowie von Photovoltaikanlagen gemäß EEG 2017 dar. Derzeit ist eine Netozubaurate von vier Gigawatt pro Jahr vorgesehen, das entspricht etwa drei Prozent der im Jahr 2018 bereits installierten Leistung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 118,3 GW.<sup>115</sup> Der Ausbau der erneuerbaren Energien soll besser mit dem erforderlichen Netzausbau koordiniert werden, dessen Realisierung Voraussetzung für den Ausbau erneuerbarer Energien ist.

##### Europäischer Emissionshandel

Ein weiteres wichtiges Instrument in der Energiewirtschaft ist das Europäische Emissionshandelssystem (Kasten 13). Vorläufigen Zahlen zufolge sind die deutschen Treibhausgas-Emissionen im Energiesektor aufgrund der gestiegenen Preise für ETS-Zertifikate im Jahr 2019 stärker gesunken als zunächst erwartet.<sup>116</sup>

Im Szenario einer Fortführung bestehender Maßnahmen, insbesondere des Ausbaus erneuerbarer Energien und der Weiterführung des Europäischen Emissionshandels wird von einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen in der Energiewirtschaft bis 2050 um 71 Prozent gegenüber 1990 ausgegangen.<sup>117</sup> Damit würden in diesem Sektor die größten Treibhausgas-Einsparungen erzielt werden. Dennoch reichen die erwarteten Reduktionen nicht aus, um das Ziel einer weitgehenden Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Hierzu wäre u. a. eine Nettozubaurate bei den erneuerbaren Energien von insgesamt sechs Gigawatt pro Jahr anstelle der bisher beschlossenen vier Gigawatt erforderlich.<sup>118</sup>

#### Neue Maßnahmen

##### Im Rahmen des Klimapakets

Mit dem Klimapakets hat die Bundesregierung beschlossen, den Anteil erneuerbarer Energien schneller zu erhöhen als bisher geplant. Bis zum Jahr 2030 soll ihr Anteil auf 65 Prozent steigen, bisher war ein Anteil von 55 bis 60 Prozent bis zum Jahr 2035 vorgesehen. Gefährdet wird das Erreichen dieses Ziels durch die Möglichkeit der Länder, eine Mindestabstandregelung von 1.000 Metern zwischen Windanlagen und Wohnbebauungen festzulegen, die zu einer starken Einschränkung der für Windanlagen nutzbaren Flächen führt.<sup>119</sup> Gleichwohl soll die Mindestabstandregelung die Akzeptanz bei den Bürgern erhöhen.

Mit dem Klimapakets wurden zudem die Empfehlungen der sogenannten Kohlekommission zur Reduzierung der Kohleverstromung bis 2030 und Beendigung bis 2038 grundsätzlich bestätigt.<sup>120</sup> Mit dem Gesetz zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz) liegt seit dem 29.01.2020 ein Kabinettsbeschluss zur Umsetzung des Kohleausstiegs vor. Ehemalige Mitglieder der Kohlekommission bemängeln, dass die ursprünglich angekündigte Eins-zu-eins-Umsetzung der Empfehlungen der Kohlekommission nicht eingehalten wurde.<sup>121</sup> So enthält der Kabinettsbeschluss bspw. eine stufenweise Abschaltung von Kraftwerken, wobei große Kraftwerke erst später, als von der Kohlekommission empfohlen, abgeschaltet werden. Daraus ergeben sich Mehremissionen im Vergleich zu der von der Kohlekommission empfohlenen linearen Abschaltung.<sup>122</sup>

##### Konjunktur- und Zukunftspakt

Im Rahmen des aktuellen Konjunktur- und Zukunftspakts wurde u. a. beschlossen, die Wasserstofftechnik im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie mit insgesamt sieben Mrd. Euro zu fördern sowie den Ausbau von erneuerbaren Energien durch diverse Maßnahmen zu stärken (bspw. Abschaffung des Deckels für die Vergütung von eingespeistem Solarstrom).

### 04.3.3 Gebäude

#### Bisherige Maßnahmen

##### Energieeffizienzstrategie

Essenz einer Treibhausgas-Reduktion im Gebäudebereich ist der Einsatz erneuerbarer Energien sowie die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden. Um dies zu erreichen, bestehen im Rahmen der Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG) einige Maßnahmen und Instrumente, insbesondere Anreiz- und Förderprogramme zur energieeffizienten Sanierung sowie die Förderung von Investitionen in erneuerbare Energie- und Wärmequellen. Im Kontext dieser Maßnahmen ist gegenwärtig im Gebäudebestand eine Sanierungsrate von einem Prozent festzustellen. Schätzungen gehen davon aus, dass die Sanierungsrate auf 1,4 bis 2,0 Prozent erhöht werden muss, um die Klimaziele im Gebäudesektor bis 2050 zu erreichen.<sup>123</sup> Die Fortführung aktueller Maßnahmen im Gebäudesektor führt einer Studie des BDI (2018) zufolge lediglich zu sektorspezifischen Treibhausgas-Reduktionen von 56 Prozent bis 2030 und 70 Prozent bis 2050.

#### Neue Maßnahmen

##### Im Rahmen des Klimapakets

Im Rahmen des Klimapakets kündigte die Bundesregierung an, weitere Treibhausgas-Einsparungen im Gebäudesektor durch Verstärkung von Förderung, Information und Beratung sowie durch die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung zu erreichen.<sup>124</sup> Beschlossen wurde bspw. eine steuerliche Förderung der Sanierung von Gebäuden, die nun zusätzlich zu der bereits bestehenden KfW-Förderung eingeführt wurde. Jedoch wird nicht erwartet, dass die Fördermaßnahmen genug Anreize setzen, um die Gebäudesanierungsrate deutlich zu erhöhen.<sup>125</sup>

Ein größerer Beitrag wird mittelfristig von der CO<sub>2</sub>-Bepreisung mithilfe von Zertifikaten erwartet. Hierbei haben sich Bundestag und Bundesrat auf einen Preis pro Tonne CO<sub>2</sub> von 25 Euro ab 2021 und von 55 Euro ab 2025 geeinigt. Ab dem Jahr 2026 wird der Zertifikatspreis durch Versteigerungen ermittelt (Marktmodell), wobei für 2026 ein Preiskorridor von mindestens 55 und höchstens 65 Euro vorgesehen ist.

##### Gebäudeenergiegesetz

Zudem tritt im November 2020 das Gebäudeenergiegesetz (GEG) in Kraft. Es enthält Regelungen zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und zu Niedrigstenergiegebäuden. Die energetischen Anforderungen an Neubauten und Sanierung wurden dabei zwar nicht verschärft, aber deren Überprüfung für das Jahr 2023 festgelegt.<sup>126</sup> Ferner enthält das Gesetz das Verbot des Einbaus von Ölheizkesseln ab 2026. Der Bund unterstützt den Austausch von alten Ölheizungen durch klimaschonendere Modelle mit einer Prämie – je nach Art des neuen Heizsystems kann der Zuschuss bis zu 45 Prozent der Investitionskosten betragen.

##### Konjunktur- und Zukunftspakt

Im Rahmen des aktuellen Konjunktur- und Zukunftspakts wurden u. a. das Gebäudesanierungsprogramm für die Jahre 2020 und 2021 aufgestockt sowie eine Förderung von Klimaanpassungsmaßnahmen in sozialen Einrichtungen und der energetischen Sanierung von kommunalen Gebäuden beschlossen.

115 BMWi, 2019a.

116 Agora Energiewende, 2020a.

117 BDI, 2018.

118 acatech, BDI und dena, 2019.

119 Agora Energiewende, 2020a.

120 BMU, 2019a.

121 Praetorius et. al., 2020.

122 BUND und DIW, 2020.

123 acatech, BDI und dena, 2019.

124 BMU, 2019a.

125 Agora Energiewende, 2020a.

126 BMWi, 2020a.

#### 04.3.4 Verkehr

##### Bisherige Maßnahmen

###### Förderung der Elektromobilität und des Radverkehrs

Im Verkehrssektor setzt die Bundesregierung insbesondere auf die Verbreitung und Förderung der Elektromobilität, wodurch die Emissionen hier verringert werden. Allerdings kann ein durch den Ausbau der Elektromobilität höherer Strombedarf zu Mehremissionen in der Energiewirtschaft führen.

Mit dem 2015 in Kraft getretenen Elektromobilitätsgesetz (E-MoG) wurden die Grundlagen zur Förderung der Elektromobilität in Form von Kauf- und Nutzungsanreizen wie Bevorrechtungen von Elektroautos im Straßenverkehr geschaffen. Der ersten Evaluierung des E-MoG zufolge reicht die Bevorrechtigung von Elektromobilität jedoch nicht aus, um die im Verkehrssektor vorgesehene Treibhausgas-Reduktion gemäß der deutschen Klimaziele zu erzielen.<sup>127</sup> Neben dem E-MoG stellt die Bundesregierung zusätzlich Fördermittel bereit, um die Batterie-Elektromobilität, den Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie die Marktvorbereitung der durch Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle zu fördern.<sup>128</sup>

Die Ziele der Radverkehrsförderung sind im nationalen Radverkehrsplan definiert und sollen durch Maßnahmen wie Finanzhilfen für Radschnellwege, Finanzierungen von Radwegen an Bundesstraßen sowie Forschungsprojekte und Studien umgesetzt werden.<sup>129</sup>

Bei Annahme einer Weiterführung der aktuellen Maßnahmen ohne signifikante Verstärkung von Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz oder einem Wandel der Mobilität gehen aktuelle Szenarien im Vergleich zu 1990 von einer Treibhausgas-Reduktion im Verkehrssektor um 13 Prozent bis 2030 und um 44 Prozent bis 2050 aus.<sup>130</sup> Das Sektorziel für 2030 schreibt eine Reduktion von 40 Prozent bis 2030 vor und dürfte somit weit verfehlt werden. Auch zur Erzielung einer weitgehenden Treibhausgas-Neutralität bis 2050 reichen die bisherigen Maßnahmen im Verkehrssektor den Schätzungen zufolge nicht aus.

##### Neue Maßnahmen

###### Im Rahmen des Klimapakets

Die im Klimapaket zusätzlich beschlossenen Maßnahmen im Verkehrssektor fokussieren auf die Förderung des Umstiegs auf Elektromobilität und den Ausbau der Ladeinfrastruktur. Eine weitere Maßnahme sieht die attraktivere Gestaltung des ÖPNV vor. Auch im Verkehrssektor wird von der beschlossenen CO<sub>2</sub>-Bepreisung eine Abschwächung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes erwartet. Aktuelle Studien<sup>131</sup> zufolge wird dies aber nicht ausreichen, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Hierzu wäre vielmehr ein Technologiemix aus elektrischen Antrieben sowie bio-basierten oder strombasierten Kraftstoffen wie Wasserstoff erforderlich.

Das Klimapaket kündigt eine Förderung strombasierter Kraftstoffe an sowie eine Unterstützung (Anrechnung) biobasierter Kraftstoffe im Rahmen des europäischen Instruments RED II.

###### Nationale Wasserstoffstrategie

In der nationalen Wasserstoffstrategie<sup>132</sup> formulierte die Bundesregierung zudem Pläne zum Einsatz CO<sub>2</sub>-neutralen Wasserstoffs insbesondere im Luft- und Seeverkehr und in militärischen Anwendungen. Denkbar sind Anwendungen außerdem in den Bereichen ÖPNV, Schwerlastverkehr, Nutzfahrzeuge und Logistik. Wasserstofftechnologien sollen insbesondere dort eingesetzt werden, wo einer Umstellung auf Elektromobilität Grenzen gesetzt sind.

###### Konjunktur- und Zukunftspakt

Im Rahmen des aktuellen Konjunktur- und Zukunftspakts wurde u. a. beschlossen, die Prämie beim Kauf eines Elektrofahrzeugs bis zum 31.12.2021 zu verdoppeln, den Ausbau der Ladesäulen-Infrastruktur mit 2,5 Mrd. Euro zu fördern, die Kfz-Steuer stärker an den CO<sub>2</sub>-Emissionen auszurichten und die Förderung für Elektrobusse und ihre Ladeinfrastruktur bis Ende 2021 auf 1,2 Mrd. Euro aufzustocken.

<sup>127</sup> Deutsches Dialog Institut und NOERR LLP, 2018.

<sup>128</sup> BMVI, 2019.

<sup>129</sup> BMWi, 2019b.

<sup>130</sup> BDI, 2018.

<sup>131</sup> acatech, BDI und dena, 2019.

<sup>132</sup> BMWi, 2020b.

#### 04.3.5 Industrie

##### Bisherige Maßnahmen

###### Europäischer Emissionshandel

Die Emissionen der energieintensiven Industrie werden bereits seit 2005 durch den Europäischen Emissionshandel begrenzt. Vorläufigen Zahlen zufolge sind die deutschen Treibhausgas-Emissionen in dem durch den ETS regulierten Sektor aufgrund der gestiegenen Preise für ETS-Zertifikate im Jahr 2019 stärker gesunken als zunächst erwartet.<sup>133</sup> Szenarien gehen davon aus, dass bei Fortschreibung bestehender Trends und energiepolitischer Regulierung<sup>134</sup> die Treibhausgas-Emissionen in der Industrie bis 2050 von 48 Prozent gegenüber 1990 verringert werden.<sup>135</sup> Um die Klimaschutzziele in der Industrie bis 2050 zu erreichen, wäre jedoch ein Rückgang um etwa 90 Prozent erforderlich.<sup>136</sup> Dies könnte durch eine weitere Steigerung der Energieeffizienz und beim Einsatz erneuerbarer Energieträger erreicht werden.<sup>137</sup>

##### Neue Maßnahmen

###### Im Rahmen des Klimapakets

Die im Dezember 2019 veröffentlichte Energieeffizienzstrategie 2050<sup>138</sup> der Bundesregierung konkretisiert eine Maßnahmenliste zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie, um die Beschlüsse des Klimapakets für den Sektor der Industrie umzusetzen. Diese beinhalten u. a. die Förderung von Investitionen zur Steigerung der Energieeffizienz sowie die Erzeugung von Prozesswärme (Wärme, die in der Industrie für bestimmte technische Prozesse benötigt wird) aus erneuerbaren Energien. Eine Bewertung dieser Maßnahmen hinsichtlich ihres möglichen Beitrages zur Zielerreichung liegt derzeit noch nicht vor. Insgesamt weisen Studien<sup>139</sup> jedoch darauf hin, dass für eine 2050 weitgehend klimaneutrale Industrie zusätzlich zu den bisherigen und neuen Maßnahmen insbesondere Prozessemissionen vermieden werden müssen.

###### Nationale Wasserstoffstrategie

Einen weiteren Ansatzpunkt stellen Wasserstofftechnologien dar. Die Nationale Wasserstoffstrategie<sup>140</sup> sieht Pläne zum perspektivischen Einsatz CO<sub>2</sub>-neutralen Wasserstoffs in einigen Prozessen vor, bspw. in der Chemie- und Stahlindustrie – zunächst in einigen Pilot- und Demonstrationsvorhaben.

#### 04.3.6 Landwirtschaft

##### Bisherige Maßnahmen

###### Novelle der Düngeverordnung

Durch die Novelle der Düngeverordnung im Jahr 2017 werden stärkere Obergrenzen bei der Düngemittelanwendung vorgeschrieben. Diese dürften zu einer Reduktion der Treibhausgase aus der Landwirtschaft bis 2050 führen. Durch mineralischen Dünger wird der Stickstoffgehalt von Böden erhöht, wodurch die Böden verstärkt das Treibhausgas Lachgas freisetzen. Bei Weiterführung der bisherigen Maßnahmen wird bis 2050 ein Rückgang der Treibhausgas-Emissionen um 25 Prozent erwartet. Weiteres Potenzial zur Minderung der Treibhausgas-Emissionen liegt insbesondere in der Reduzierung des Nutztierbestands (v. a. Rinder). Die Reduktion der Nutztierbestände wird im Klimapaket zwar benannt, jedoch nicht quantifiziert.<sup>141</sup>

Außerdem werden Maßnahmen im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) formuliert, der allerdings bislang nur nachrichtlich in der Treibhausgasbilanz mitgeführt wird.

<sup>133</sup> acatech, BDI und dena, 2019.

<sup>134</sup> Effekte des EU-ETS, die über bisherige Wirkungen hinausgehen, sind nicht berücksichtigt.

<sup>135</sup> BDI, 2018.

<sup>136</sup> acatech, BDI und dena, 2019.

<sup>137</sup> acatech, BDI und dena, 2019.

<sup>138</sup> BMWi, 2019c.

<sup>139</sup> acatech, BDI und dena, 2019.

<sup>140</sup> BMWi, 2020b.

<sup>141</sup> BMWi, 2019c.



## Handlungsoptionen

Die Analyse der Handlungsoptionen erfolgt auf Grundlage der Erkenntnisse aus dem ersten Studienteil. Ziel ist es aufzuzeigen, in welchen Bereichen Handlungsnotwendigkeiten zur Transformation hin zur Klimaneutralität bestehen.

### Kapitel in der Übersicht

01	Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel	90
01.1	Anpassungserfordernis	90
01.2	Staatliche Anpassungsstrategien in Deutschland und Bayern	91
01.3	Anpassungsoptionen der Privatwirtschaft	94
02	Verhaltens- und Konsummuster	96
02.1	Wohnen und Gebäude	97
02.2	Verkehr	98
02.3	Landwirtschaft und Ernährung	99
02.4	Gebrauchsgüter	100
02.5	Chancen und Herausforderungen	100
03	Kreislaufwirtschaft	102
03.1	Linearwirtschaft, Kreislaufwirtschaft und zirkuläre Wertschöpfung	102
03.2	Klimaschutzpotenziale der Kreislaufwirtschaft	103
03.3	Chancen und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft	105
03.4	Politische Zielsetzungen und Bedeutung der Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Bayern	106
04	Zentrale Technologien für eine klimaschonende Zukunft	108
04.1	Erneuerbare-Energien-Technologien	108
04.2	Technologien zur Minderung des Energiebedarfs und der Emissionen	118
04.3	CO <sub>2</sub> -Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung (CCU, CCS, NET)	127
04.4	Power-to-X	135
04.5	Einzelmaßnahmen: „Wäs wäre, wenn ...?“	138
05	Die Rolle und Schaffung von gesellschaftlicher Akzeptanz und Begeisterung	144

# 01 Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel

**Anpassungen rücken mit Fortschreiten des Klimawandels vermehrt in den Fokus, sind allerdings nur teilweise möglich und in der Regel teurer als verpasste Vermeidungsoptionen.**

## Inhalte

01.1	Anpassungserfordernis	90
01.2	Staatliche Anpassungsstrategien in Deutschland und Bayern	91
01.3	Anpassungsoptionen der Privatwirtschaft	94

## 01.1 Anpassungserfordernis

Der Klimawandel wird selbst bei Erreichen der gesetzten Klimaschutzziele weiter voranschreiten und ist auch langfristig nicht umkehrbar. Die Klimaveränderungen haben deutliche Auswirkungen auf alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche (Teil II Kapitel 02). Die Anpassung an die Folgen ist somit eine gesamtgesellschaftliche Querschnittsaufgabe. Sie kann nur gelingen, wenn sie als solche wahrgenommen und angegangen wird. (Präventive) Maßnahmen zur Klimaanpassung und Abfederung der Klimafolgen sind sowohl auf staatlicher als auch unternehmerischer Ebene zu

ergreifen. Sie rücken mit Fortschreiten des Klimawandels und Zunahme der Folgen vermehrt in den Fokus. Deutschland und Bayern sind dabei besonders vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels – weniger aufgrund ihrer direkten Exposition gegenüber Naturgefahren als vielmehr aufgrund ihrer starken (wirtschaftlichen) Verflechtungen mit anderen Ländern (Teil II Kapitel 02.4.2). Dies bedingt in Deutschland und Bayern vielfältige Anpassungserfordernisse an die Folgen des Klimawandels.

Anpassungen an die globale Erwärmung sind allerdings nur teilweise möglich und in der Regel wesentlich teurer als verpasste Vermeidungsoptionen. Zudem ist eine Anpassung mit vertretbarem Aufwand nicht immer möglich (z. B. an zunehmende Sturmhäufigkeit), sodass auch bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Klimaanpassung von zunehmenden Klimafolgekosten auszugehen ist. Gleichwohl kann eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen und als positiver Standort- und Unternehmensfaktor gelten. Ein Scheitern der Anpassung wird als eines der wahrscheinlichsten und wirkungsmächtigsten globalen Risiken eingestuft (Kasten 15).

### Kasten 15

#### Scheitern von Klimaanpassungsmaßnahmen als zentrales Risiko

Im Rahmen des jährlich erscheinenden Global Risk Reports erhebt das Weltwirtschaftsforum (World Economic Forum, WEF) anhand einer Umfrage unter über 750 Experten und Entscheidungsträgern die größten globalen Risiken in den kommenden zehn Jahren.

Im Jahr 2020 handelte es sich erstmals bei allen fünf globalen Risiken, deren Eintrittswahrscheinlichkeit von den Experten als sehr hoch eingestuft wurde, um Umweltrisiken. Die Risiken weisen einen engen Zusammenhang mit dem Klimawandel auf:<sup>142</sup>

1. Extremwetterereignisse mit Schäden an Eigentum, Infrastruktur und dem Verlust von Menschenleben
2. Scheitern von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen

3. Naturkatastrophen (z. B. Erdbeben, Tsunamis, Vulkanausbrüche)
4. Verlust der Biodiversität
5. Menschengemachte Umweltschäden und Katastrophen (z. B. Ölverschmutzung)

Unter den fünf Risiken, die von den Experten als die wirkungsmächtigsten eingestuft wurden, finden sich vier Umwelt- bzw. Klimarisiken:

1. Scheitern der Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen
2. Massenvernichtungswaffen
3. Verlust der Biodiversität
4. Extremwetterereignisse mit Schäden an Eigentum, Infrastruktur und dem Verlust von Menschenleben
5. Wasserknappheit

## 01.2 Staatliche Anpassungsstrategien in Deutschland und Bayern

### Anpassungsstrategie in Deutschland

Die Bundesregierung hat im Dezember 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und 2011 den damit zusammenhängenden Aktionsplan Anpassung (APA) beschlossen. Inhalt der Anpassungsstrategie ist einerseits eine Vorausschau auf die wahrscheinlichen Folgen und Auswirkungen des Klimawandels für Bevölkerung, Wirtschaft und Natur in Deutschland sowie andererseits die Identifikation von Maßnahmensträngen bzw. Handlungsfeldern zur Klimaanpassung, die im Aktionsplan Anpassung spezifiziert und priorisiert wurden.<sup>143</sup> Die Felder sind bis auf wenige Unterschiede deckungsgleich mit den Handlungsfeldern der Bayerischen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Abbildung 42).

In den Jahren 2015 und 2019 wurden die bei der Klimaanpassung unternommenen Anstrengungen in den Monitoringberichten zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel evaluiert, ein weiterer Fortschrittsbericht ist für 2023 vorgesehen. Zur Evaluation wurde ein Indikatorensystem entwickelt, das im Fortschrittsbericht 2019 insgesamt 105 Indikatoren umfasst, davon 56 sogenannte Impact-Indikatoren, die Auswirkungen des Klimawandels beschreiben, 44 Response-Indikatoren, die Anpassungsaktivitäten benennen, und fünf handlungsfeldübergreifende Indikatoren. Aufgrund der großen Bandbreite der Indikatoren, vor allem im Response-Bereich, kann bislang keine eindeutige Einschätzung zum Fortschritt abgegeben werden. Es wird jedoch deutlich, dass die Belange der Klimaanpassung zunehmend Eingang in Regional- und Fachplanungen finden.<sup>144</sup>

### Anpassungsstrategien in Bayern

Die Bayerische Klimaanpassungsstrategie (BayKlas) wurde im Jahr 2017 verabschiedet. Sie benennt für den spezifischen Kontext Bayerns insgesamt 15 Handlungsfelder, in denen die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen vorangetrieben werden sollen (Abbildung 42).<sup>145</sup> Die BayKlas führt in den 15 Handlungsfeldern insgesamt 315 Maßnahmen an, die gleichermaßen urbane, stark verdichtete Räume und ländliche, naturnahe Räume berücksichtigen. Aus der Verteilung der Anzahl von Maßnahmen innerhalb der Handlungsfelder wird deutlich, dass sich die Schwerpunkte der Klimaanpassung in Bayern auf den Schutz von Ökosystemen sowie den Wasserhaushalt und die Auswirkungen von Hitze konzentrieren.<sup>146</sup>

Ein Fortschrittsmonitoring der BayKlas wurde bisher nicht durchgeführt.<sup>147</sup> Ein offizieller Monitoringbericht der Klimaanpassung in Bayern, der in regelmäßigen Abständen herausgegeben wird (analog zu den Fortschrittsberichten auf Bundesebene und wie er auch beim Maßnahmenpaket zur Bayerischen Klimaschutzoffensive vom November 2019 bereits vorgesehen ist), könnte helfen, die Bemühungen der Landesregierung und die Relevanz der Thematik deutlicher zu machen.

Neben der BayKlas besitzen auch immer mehr Städte und Landkreise spezifische Klimaanpassungsstrategien, die insbesondere den lokalräumlichen Gegebenheiten Rechnung tragen.<sup>148</sup>

<sup>143</sup> Bundesregierung, 2008:16ff; Bundesregierung, 2011.

<sup>144</sup> UBA 2019c; UBA 2019d.

<sup>145</sup> StMUV, 2017a.

<sup>146</sup> StMUV, 2017a.

<sup>147</sup> Im Jahr 2017 wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie Indikationsideen auf ihre Überprüfbarkeit hin ausgewählt und untersucht (StMUV, 2017b).

<sup>148</sup> z. B. Landeshauptstadt München 2016: Konzept zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Landeshauptstadt München, oder Stadt Nürnberg, Umweltamt 2012: Handbuch Klimaanpassung. Bausteine für die Nürnberger Anpassungsstrategie.

## Kasten 16

**Prinzipien und Zielkonflikte staatlicher Anpassungskonzepte**

Bei der Konzipierung und Umsetzung staatlicher Anpassungsmaßnahmen sind die drei Aspekte der Nachhaltigkeit – Ökologie, Soziales und Ökonomie – sowie die Integrativität der Maßnahme mit Potenzialen und Synergien über mehrere Handlungsfelder hinweg zu berücksichtigen. Zudem ist zu beachten, dass die Maßnahmen (z. B. im Bereich der Regional-, Stadt- und Gebäudeplanung) nicht zu Zielkonflikten zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung führen bzw. bestehende Konflikte verschärfen. Bspw. steht das Freihalten großer innerstädtischer Flächen von Bebauung bzw. Versiegelung (z. B. für Frischluftschneisen zum Kaltluftaustausch, Erhalt von Retentionsräumen) teilweise im Konflikt zum Leitbild einer kompakten und ressourceneffizienteren Stadt, die mit kurzen Wegen die Nutzung umweltfreundlicher Verkehrsmittel wie Fußverkehr, Fahrrad und ÖPNV fördert.

Zur Erhöhung der gesellschaftlichen Akzeptanz staatlicher Anpassungsmaßnahmen sollte nicht zuletzt sichergestellt werden, dass die Maßnahmen beim Ausbleiben der erwarteten Klimaveränderungen und Extremereignisse positive gesellschaftliche Effekte mit sich bringen – bspw. die Erhöhung von Aufenthaltsqualitäten durch neue Grünflächen.<sup>149</sup>

Abbildung 42

**Die 15 Handlungsfelder der BayKlas und ausgewählte Maßnahmenbeispiele**

Handlungsfeld	Maßnahmebeispiele
<b>Wasserwirtschaft</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Förderung des natürlichen Wasserrückhalts z. B. durch Bereitstellung von Überflutungsräumen durch Rückverlegung von Deichen, Wiedervernässung von Feuchtgebieten, Moorschutz</li> <li>– Milderung der Auswirkungen hoher sommerlicher Temperaturen durch naturnahe Uferbepflanzung und Verbesserung der Gewässerstruktur</li> </ul>
<b>Landwirtschaft</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Züchtung und Anbau von trockenstresstoleranten und hitzeverträglichen Pflanzen und Sorten, z. B. Getreide- oder Obstsorten</li> <li>– kleinräumige, digital unterstützte Landwirtschaft (Precision Farming)</li> <li>– Zweikulturnutzung</li> </ul>
<b>Wald- und Forstwirtschaft</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Waldumbau in klimatolerante Mischwälder im Staatswald</li> <li>– Maßnahmen zum Erhalt einer hohen Vielfalt der Flora zur Risikostreung und Wahrung der Anpassungsfähigkeit der Waldbestände</li> </ul>
<b>Naturschutz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Analyse der Gefährdungs- und Bestandssituation bayerischer Tier- und Pflanzenarten zur Umsetzung effizienter Schutzmaßnahmen</li> <li>– Überprüfung und Verbesserung des Beitrags von Ökoflächen und Kompensationsmaßnahmen zum Erhalt der biologischen Vielfalt</li> </ul>
<b>Bodenschutz und Georisiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vermeidung hangabwärts gerichteter Fahrspuren und Begrünung von Hangmulden und Tiefenlinien zur Verminderung der Wassererosionsgefährdung</li> <li>– Grünlanderhalt auf stark erosionsgefährdeten Hängen zur Minderung von Bodenerosion</li> </ul>

Handlungsfeld	Maßnahmebeispiele
<b>Menschliche Gesundheit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitoring der atmosphärischen Pollenkonzentration, der Allergenität von Pflanzen sowie Prognose der zu erwartenden Pollenbelastung</li> <li>– Aufklärung der Bevölkerung zu möglichen neuartigen gesundheitlichen Gefahren (anlassbezogen)</li> </ul>
<b>Katastrophenschutz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Weiterentwicklung des umfassenden Naturgefahrenwarnsystems in Bayern (<a href="http://www.naturgefahren.bayern.de">www.naturgefahren.bayern.de</a>)</li> <li>– Vorbereitung kritischer Infrastrukturen auf Extremereignisse durch das Land Bayern sowie die jeweiligen kommunalen und privatwirtschaftlichen Träger</li> </ul>
<b>Raumordnung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Darstellung und Weiterentwicklung von regionalen Grünzügen in den Regionalplänen zur Freiraumsicherung, Verbesserung des Bioklimas und der Erholung</li> <li>– Aktive Nutzung der Instrumente der Landschaftsplanung zur umwelt- und klimabezogenen Optimierung in der Regionalplanung</li> </ul>
<b>Städtebau / Bauleitplanung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Konsequenter Verzicht der Ausweisung neuer Baugebiete in Überschwemmungsgebieten</li> <li>– Erstellung regionaler Studien zur Erfassung der Folgen und Auswirkungen des Klimawandels auf die Siedlungsstrukturen</li> <li>– Erhalt der ökologischen Ausgleichsfunktion unversiegelter Flächen und Reduzierung des Flächenverbrauchs, um Flexibilität für Anpassungsmaßnahmen gewährleisten zu können</li> </ul>
<b>Bauwesen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaveränderungen bei der Gebäudeplanung und Bautechnik</li> <li>– Dach- und Fassadenbegrünung zur Verringerung des Wärmeeintrages in den Stadtkörper, zur Regenwasserspeicherung und zur Reduzierung von Abflussspitzen</li> </ul>
<b>Straßenbau und Verkehr</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Erhalt und bedarfsgerechter Ausbau von Straßen und Schienen zur Anpassung an extreme Witterungsbedingungen, z. B. Planung von Ersatzstrecken</li> <li>– Intensives Monitoring der Infrastruktur, z. B. Verformungen an Schienen, Schlaglöcher, Schienentemperaturen, Spurrillen</li> </ul>
<b>Energiewirtschaft</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vielfältige dezentrale Energieerzeugung, um Risiken bei der Verteilung zu vermindern</li> <li>– Ausreichende Redundanzen in der Energieerzeugung (Erzeugung und Netze), um klimabedingte Leistungsausfälle oder Lastspitzen kompensieren zu können</li> </ul>
<b>Industrie und Gewerbe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Nachhaltige Standortpolitik, d. h. Vermeidung oder Verlagerung von Standorten in Risikogebiete bzw. Anpassung bestehender Infrastrukturen in Risikogebieten, flächensparende Bauweise und Berücksichtigung von Synergien (Energieleitplanung)</li> </ul>
<b>Tourismus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ausbau von wetter-, insbesondere schneeunabhängigen, ganzheitlichen Angeboten in den Bereichen Natur, Kultur, Radsport, Kulinarik und Wellness zur Erschließung neuer Zielgruppen</li> <li>– Erhalt bzw. Stabilisierung der Wälder mit Erholungsfunktion sowie zugehöriger Infrastruktur</li> </ul>
<b>Finanzwirtschaft</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prüfung von Umwelt- und Nachhaltigkeitskriterien bei Vermögensanlagen und Kreditvergaben zur Vermeidung möglicher klimabedingter Ausfallquoten</li> </ul>



### 01.3 Anpassungsoptionen der Privatwirtschaft

Neben dem Staat sind auch Unternehmen gefordert, Maßnahmen zur Klimaanpassung zu ergreifen. Die unternehmerischen Anpassungserfordernisse an die Klimawandelfolgen werden von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt, die von der spezifischen Situation der jeweiligen Unternehmen abhängen. Sie umfassen insbesondere:

- 1. Physischer Standort des Unternehmens bzw. der unternehmerischen Tätigkeit:** Grundsätzlich gehen größere klimatische Veränderungen und Risiken (z. B. Nähe zu Flüssen) am Standort mit größeren unternehmerischen Anpassungserfordernissen einher. Die Erfordernisse umfassen auch Anpassungen, um klimabedingten Risiken für die menschliche Gesundheit und Arbeitsproduktivität zu begegnen (bspw. infolge von Hitze oder hohen Ozonwerten).
- 2. Abhängigkeit des Unternehmens bzw. der unternehmerischen Tätigkeit von kritischer Infrastruktur, die durch den Klimawandel beeinträchtigt oder beschädigt werden kann (z. B. Energie, Wasser, Breitband):** Grundsätzlich geht eine höhere Abhängigkeit mit größeren unternehmerischen Anpassungserfordernissen einher.
- 3. Abhängigkeit des Unternehmens bzw. der unternehmerischen Tätigkeit von Dritten in seiner Liefer- und Wertschöpfungskette (Kasten 17):** Vorlieferanten und Abnehmer können zum einen selbst von den Folgen des Klimawandels betroffen sein und zum anderen auf Infrastrukturen angewiesen sein, die vulnerabel gegenüber dem Klimawandel sind. Grundsätzlich sind die unternehmerischen Anpassungserfordernisse umso größer, über je mehr Stationen sich die Liefer- und Wertschöpfungsketten erstrecken und je globaler sie ausgestaltet sind.

#### Kasten 17 Die vier Arten klimabedingter Risiken in der Lieferkette<sup>150</sup>

##### 1. Physische Risiken

Physische Risiken beinhalten alle Formen der direkten Auswirkungen des Klimawandels, die eine Gefährdung von unternehmerischen Tätigkeiten darstellen, z. B. extreme Wetterereignisse, erhöhte Temperaturen sowie Anstieg des Meeresspiegels und der Wassertemperatur.

##### 2. Marktrisiken

Marktrisiken beschreiben infolge des Klimawandels veränderte Angebots- und Nachfragesituationen für einzelne Produkte bzw. deren Wertschöpfungsketten. Hierzu zählen unter anderem Reputationsrisiken für Unternehmen bzw. Marken infolge eines veränderten Konsumverhaltens oder Wettbewerbsrisiken, die durch das zu frühe oder zu späte Eingehen auf die veränderten Nachfragesituationen entstehen.

##### 3. Infrastrukturelle Risiken

Infrastrukturelle Risiken treten durch die Exposition von Verkehrs- und anderen Infrastrukturnetzen gegenüber den Klimawandelfolgen auf und betreffen sowohl die Beschaffung und Verteilung als auch die Produktion von Gütern und Dienstleistungen.

##### 4. Regulative Risiken

Regulative Risiken betreffen Gesetze, Vorschriften und Normen, die im Zuge des Klimaschutzes und der Klimaanpassung verabschiedet werden, und marktorientierte Maßnahmen wie bspw. eine CO<sub>2</sub>-Besteuerung beinhalten.

Unternehmen stehen vor der Herausforderung, sich einerseits an die vor Ort zu erwartenden Klimaveränderungen anzupassen und andererseits auf die Klimaveränderungen und deren Folgen zu reagieren, die andernorts auftreten und zur Störung ihrer Liefer- und Wertschöpfungsketten oder der Infrastruktur führen können. Die Unternehmen sind also gefordert, spezifisches Wissen und Strukturen aufzubauen, um die unternehmerische Produktion bzw. Erbringung von Dienstleistungen dauerhaft sicherzustellen und damit ihre Resilienz gegenüber den Folgen des Klimawandels zu erhöhen.

Schäden durch betriebliche Unterbrechungen infolge von klimabedingten Störungen der Lieferketten sind in der Regel deutlich größer als klimabedingte Schäden durch beschädigte Betriebsanlagen. Beeinträchtigte Lieferketten können Unternehmen noch weit über die Dauer der ursprünglichen Störung hinaus belasten. Je nach Ausmaß der Störung benötigt es bis zu zwei Jahre, bis der Ausgangszustand vor der Unterbrechung wieder hergestellt ist.<sup>151</sup> Die Allianz kam in ihren Untersuchungen zu dem Schluss, dass Produktionsunterbrechungen für 70 Prozent der extremwetterbedingten unternehmerischen Kosten verantwortlich sind.<sup>152</sup> Der anhaltende Niedrigwasserstand des Rheins führte bspw. bei BASF zu Störungen in der Lieferkette und einem Gewinnrückgang von 250 Mio. Euro im zweiten Halbjahr 2018 gegenüber der prognostizierten Entwicklung.<sup>153</sup>

#### Aktives Risikomanagement

Unternehmen sollten auf Grundlage ihrer spezifischen Faktoren (u. a. Abhängigkeiten von Infrastrukturen, Lieferketten, Standorten) ein aktives Risikomanagement hinsichtlich der Folgen des Klimawandels betreiben. Dies betrifft die Identifikation von Risiken des Klimawandels für das eigene Unternehmen und die Belegschaft sowie die Prüfung von Versicherungsmöglichkeiten gegen bestimmte Klimarisiken (z. B. Betriebsunterbrechung, Ernteausfall) und die Entwicklung von Anpassungsstrategien wie bspw.:

1. Durchführung von firmeninternen Risk Assessments,
2. Schulungen sowie Information der Mitarbeitenden,
3. Diversifizierung, räumliches Zusammenziehen (Lokalisierung) oder ggf. Kürzung der Lieferketten,
4. Verlagerung oder Diversifizierung von Transportwegen,
5. Aufbau von Lagerkapazitäten,
6. Frühzeitige Anpassung der Angebots- und Produktionsstrukturen, um Marktrisiken und regulativen Risiken zu begegnen,
7. Verlagerung des Unternehmens- bzw. Produktionsstandorts (dies sollte grundsätzlich erst dann in Betracht gezogen werden, wenn andere Maßnahmen keine wirtschaftliche Lösung darstellen),
8. Schutz vor klimabedingten Risiken für die menschliche Gesundheit und Arbeitsproduktivität.

<sup>151</sup> Hendriks und Singhal, 2005: 13.

<sup>152</sup> Allianz Global Corporate & Specialty, 2012.

<sup>153</sup> BASF, 2019.

<sup>154</sup> Der Klimacheck des BMWi richtet sich v. a. an mittelständische Unternehmen des produzierenden Gewerbes. Er ist abrufbar unter <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimacheck-klimarisiken.html>.

<sup>155</sup> Germanwatch, 2019.

Die Versicherung gegen Betriebsunterbrechungen ist eine der am weitesten verbreiteten unternehmerischen Maßnahmen zur Absicherung gegen negative Auswirkungen des Klimawandels. Unternehmerische Anpassungen sollten aber insbesondere auch hinsichtlich der Absicherung gegen klimawandelbedingte Risiken entlang der Lieferketten sowie hinsichtlich Marktrisiken und regulativer Risiken erfolgen. Zur Identifikation unternehmerischer Klimarisiken und möglicher Anpassungsmaßnahmen gibt es zahlreiche Online-Tools wie bspw. den Klimacheck des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).<sup>154</sup>

#### Spezifische Anpassungserfordernisse und -optionen in der Landwirtschaft

Eine Sonderrolle in den Betrachtungen zur Klimaanpassung kommt der Landwirtschaft insofern zu, als sie durch ihre enge Verbindung bzw. Abhängigkeit vom Naturraum von den Klimaveränderungen besonders stark betroffen ist. Bereits in der Vergangenheit musste der Staat hier unterstützend eingreifen: Im Hitzejahr 2018 wurden bspw. 340 Mio. Euro an staatlicher Dürrehilfen für die deutschen Landwirte bereitgestellt. Die Ernteverluste, die auf ca. drei Mrd. Euro geschätzt werden, wurden damit jedoch nicht annähernd ausgeglichen.<sup>155</sup> Angesichts der erwarteten Zunahme von Dürreperioden ist in Deutschland mittel- bis langfristig eine Anpassung der Produktionsstrukturen und die Umstellung auf neue temperatur- und trockenheitsresistente Pflanzenarten erforderlich. Obgleich Hitze und Trockenheit die größeren Herausforderungen für die Landwirtschaft darstellen, können auch lokale Starkregenereignisse bzw. Überschwemmungen negative Auswirkungen entfalten, denen Landwirte mit einer Diversifizierung ihrer Betriebsform sowie von Anbaustrukturen und -sorten entgegenwirken können.

#### Spezifische Anpassungserfordernisse und -optionen in der Industrie

Im verarbeitenden Gewerbe ist die Ausprägung der drei oben genannten Faktoren (physischer Standort, Infrastrukturabhängigkeit, Liefer- und Wertschöpfungsverflechtungen) besonders relevant. Zum einen ist der Standort der Produktion in der Regel nicht einfach an einen anderen Ort verlagerbar. Zum anderen hängt die Produktion infolge tiefer Liefer- und Wertschöpfungsverflechtungen in deutlich stärkerem Ausmaß von weltweiten Vor- bzw. Nachleistern und globalen Gütertransporten ab als die anderen Sektoren. Bspw. schränkten die Niedrigwasserereignisse der Jahre 2018 und 2019 die Kühl- und Transportmöglichkeiten ein und führten zu temporären Produktionsbeschränkungen in Deutschland.

#### Spezifische Anpassungserfordernisse und -optionen im Dienstleistungssektor

Im Dienstleistungssektor sind insgesamt geringere Klimawandelfolgen zu erwarten als in der Landwirtschaft und Industrie. Neben der Abhängigkeit des Dienstleistungssektors von kritischen Infrastrukturen (bspw. Breitbandverfügbarkeit oder Stromversorgung) werden sich infolge des Klimawandels in bestimmten Dienstleistungsbereichen deutliche Veränderungen ergeben. Bspw. kann der Klimawandel zu einer veränderten Nachfrage nach bestimmten Produkten (z. B. nachhaltige Finanzprodukte) und Geschäftsmodellen (z. B. bzgl. Kreislaufwirtschaft) führen.

## 02

## Verhaltens- und Konsummuster

### Änderung von Verhaltens- und Konsummustern können in vielen Bereichen einen Beitrag zum Klimaschutz leisten; Technologien sind jedoch deutlich wichtiger

## Inhalte

02.1	Wohnen und Gebäude	97
02.2	Verkehr	98
02.3	Landwirtschaft und Ernährung	99
02.4	Gebrauchsgüter	100
02.5	Chancen und Herausforderungen	100

Die Änderung von Verhaltens- und Konsummustern in Richtung eines suffizienteren Lebensstils kann einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Suffizienz beschreibt einen genügsamen Umgang mit vorhandenen Ressourcen ohne die Minderung der eigenen Zufriedenheit und Lebensqualität. Bspw. kann eine geringere und veränderte Nachfrage den Energieverbrauch reduzieren und es so erleichtern, die Klimaschutzziele zu erreichen.<sup>156</sup> In diesem Zusammenhang ist das Thema „nachhaltiger Konsum“ relevant. Nachhaltiger Konsum stellt die Befriedigung der Grundbedürfnisse aller Menschen sicher, wobei die planetaren Grenzen nicht überschritten werden und die Bereitstellung umwelt- und sozialverträglich erfolgt.<sup>157</sup> Dabei bezieht sich Konsum nicht allein auf Konsumgüter und Produkte, sondern schließt die Bereiche Mobilität, Ernährung, Wohnen und Haushalt, Büro und Arbeit, Bekleidung sowie Tourismus und Freizeit ein.<sup>158</sup> In Teilbereichen können sich Suffizienz-Maßnahmen und Effizienztechnologien (Teil III Kapitel 04.2) überschneiden bzw. ist ihre Kombination für eine klimaschonende Wirkung der Maßnahmen oftmals erforderlich.

Verhaltens- und Konsummuster sind häufig von Routinen und Gewohnheiten geprägt und in komplexe Zusammenhänge eingebettet.<sup>159</sup> Verhaltensänderungen werden dadurch gehemmt und können nicht auferlegt, sondern müssen erlernt werden. Daher sollten sie umwelt- und klimabewusste Lebensweise in den Schulunterricht einbezogen werden. Zudem können Informationen für die Verbraucher den gesellschaftlichen Wandel unterstützen, bspw. Angaben zu den Treibhausgas-Emissionen bei der Herstellung eines Produkts auf den Verpackungen.<sup>160</sup>

Für Deutschland liefert eine Studie des Umweltbundesamtes (UBA) erste Ergebnisse zur quantitativen Einordnung der Wirkung von ausgewählten Verhaltens- und Konsumänderungen auf die Energie- und Treibhausgas-Bilanz. Die Studie berechnet beispielhaft das zusätzliche Energie- und Treibhausgas-Einsparpotenzial der ausgewählten Änderungen im Vergleich zu einem bestehenden Klimaschutzszenario (Energiewendeszenario der „Politikszenerien VI“<sup>161</sup>) für das Jahr 2030.<sup>162</sup> Die Zahlen dienen als Grundlage für die folgenden Kapitel. Sie sind aufgrund der Methodik und den notwendigerweise zu treffenden Annahmen vorsichtig zu interpretieren und nicht als Empfehlungen zu verstehen, sondern sollen einer ersten Orientierung und Einordnung des Beitrags von Verhaltens- und Konsumänderungen dienen.

Insgesamt ist zu beachten, dass Änderungen von Verhaltens- und Konsummustern nur einen vergleichsweise geringen unmittelbaren Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Für die Transformation von zentraler Bedeutung sind Technologien, zumal diese oftmals erst eine Änderung von Verhaltens- und Konsummustern ohne Einschränkung der eigenen Zufriedenheit und Lebensqualität ermöglichen.

<sup>156</sup> Creutzig et al., 2016, 2018.

<sup>157</sup> nach Öko-Institut, 2017.

<sup>158</sup> BMU, BMJV und BMEL et al., 2019b.

<sup>159</sup> Mack und Hackmann, 2008.

<sup>160</sup> Otto et al., 2020.

<sup>161</sup> UBA, 2013a.

<sup>162</sup> UBA, 2016.

## 02.1 Wohnen und Gebäude

Die Studie des UBA zeigt, dass ausgewählte Suffizienz-Maßnahmen im Gebäudebereich insgesamt 76 TWh/a (Terawattstunden pro Jahr) Energie einsparen können (Abbildung 43),<sup>163</sup> das ist etwas mehr als ein Zehntel des aktuellen Endenergieverbrauchs (EEV) privater Haushalte in Deutschland.<sup>164</sup> Das größte Einsparpotenzial weist mit 38 TWh/a eine Reduzierung der Wohnfläche auf 40 m<sup>2</sup> pro Kopf auf. Das entspricht dem Wert der Wohnfläche im Jahr 2000. Laut Statistischem Bundesamt beträgt die Wohnfläche heute (2019) etwa 47 m<sup>2</sup> pro Kopf – rund 18 Prozent mehr als noch im Jahr 2000. In Zukunft ist eine weitere Zunahme der Wohnfläche pro Kopf zu erwarten (u. a. infolge demografischer Effekte und der stetigen Zunahme des Anteils von Ein- und Zweipersonenhaushalten). Eine Reduzierung der spezifischen Wohnqualität pro Kopf muss nicht zu einer geringeren Wohnqualität führen. Bspw. kann es für Personen bei Verkleinerung der Haushaltsgröße (z. B. Auszug von Personen) sinnvoll sein, sich zu verkleinern, um längerfristig Kosten und Arbeit zu sparen. Wohnraumtauschbörsen können diese Veränderungen unterstützen. Perspektivisch können modulare Bauweisen eine flexible Anpassung von Wohnflächen ermöglichen. Mehr gemeinschaftlich genutzte Räume (z. B. für Gästezimmer, Abstellflächen) könnten

darüber hinaus den Bedarf an individuellem Wohnraum reduzieren.<sup>165</sup>

Als direkt umsetzbare Maßnahmen im Gebäudebereich mit einer relevanten Wirkung auf den Energieverbrauch werden insbesondere eine niedrigere durchschnittliche Raumtemperatur, richtiges Heizen und Lüften, Wäsche waschen mit vollgefüllten Waschmaschinen und Trocknen an der Luft statt im Trockner, kürzeres Duschen oder weniger Vollbäder und wassersparende Armaturen sowie das Löschen von Licht in nicht genutzten Räumen diskutiert. Bei einigen dieser Maßnahmen gibt es Überschneidungen zu technischen Lösungen wie z. B. Smart Homes oder effiziente Beleuchtung. In Summe sparen diese beschriebenen Maßnahmen Energie in einer Größenordnung von 26 TWh/a. Darüber hinaus beeinflussen die Ausstattung mit Geräten (weiße Ware, IKT und Unterhaltung), deren Energieeffizienz und ihre Nutzung den Energieverbrauch. Geringere Ausstattungsraten (z. B. ein Kühl- bzw. Gefriergerät statt zwei pro Haushalt), die Wahl des effizientesten Gerätes bei Neukauf und eine geringere Nutzung (z. B. reduzierter TV-Konsum) können zu einer zusätzlichen Einsparung von 12 TWh/a führen.<sup>166</sup> Dies entspricht etwa zwei Prozent des EEV der privaten Haushalte.

Abbildung 43

## Einsparpotenzial ausgewählter Suffizienz-Maßnahmen im Gebäudebereich bis 2030

	Maßnahmen	Mögliche Einsparung
	<b>Reduktion der Wohnfläche</b> auf 40 m <sup>2</sup> /Kopf	- 37,7 TWh/a
	<b>Absenkung der Raumtemperatur</b> um 1 Grad C	- 15 TWh/a
	<b>Verringerter Warmwasserverbrauch</b> um ca. 10 % auf 41 Liter/Tag und Kopf	- 9,6 TWh/a
	<b>Geringere Nutzung des Wäschetrockners</b> Nutzung in 8 statt 12 Monaten	- 1,2 TWh/a
	<b>Abschaffung von Zweitgeräten</b> Kühl- und Gefrierkombis, Fernseher	- 6,2 TWh/a
	<b>Kleinere Fernseher und geringere Nutzungsdauer</b> 2 Stunden pro Tag	- 6,1 TWh/a
	<b>Summe</b>	<b>76 TWh/a</b>

Einsparpotenzial bis 2030 im Vergleich zu einem bestehenden Klimaschutzszenario (Energiewendeszenario der „Politikszenerien VI“ gem. UBA, 2013a).

Quelle: UBA, 2016; eigene Darstellung Prognos, 2020

<sup>163</sup> UBA, 2016.

<sup>164</sup> Der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte in Deutschland lag die letzten Jahre durchschnittlich bei circa 660 TWh (ohne Temperaturbereinigung) nach BMWi 2019d.

<sup>165</sup> siehe hierzu z. B. Lorek, 2019.

<sup>166</sup> UBA, 2016.

02.2 Verkehr





Unter dem Stichwort der Verkehrswende sind nicht technische Maßnahmen bereits Bestandteil der Transformation im Verkehrssektor.<sup>167</sup> Der Übergang zwischen Effizienz und Verhaltensanpassungen ist dabei teilweise fließend. Verhaltensorientierte Maßnahmen umfassen – insbesondere für kurze Distanzen – einen Umstieg auf bereits heute emissionsärmere oder -freie Verkehrsträger wie ÖPNV, Rad und zu Fuß gehen (mögliche Einsparung von 21 TWh/a, dies entspricht etwa drei Prozent des EEV des Verkehrs<sup>168</sup>). Verhaltensbedingte Energieeinsparungen bei der Pkw-Nutzung sind durch den Kauf kleinerer Pkw (mögliche Einsparung von 15 TWh/a) und die Bildung von Fahrgemeinschaften möglich (zur Elektromobilität siehe Teil III Kapitel 04.2.3). Werden im Personen- und Güterverkehr weniger Kilometer zurückgelegt, sinken Energiebedarf und Emissionen. Dies kann durch die Digitalisierung unterstützt werden. Bspw. können Pendelwege durch Arbeiten im Homeoffice entfallen und durch Tele- bzw. Videomeetings Geschäftsreisen reduziert werden (mögliche Einsparung von 21,5 TWh/a, bei einer Substitution von 30 Prozent der Dienstreisen). Aktuell können aufgrund der Corona-Krise die meisten beruflichen und privaten Treffen nur virtuell durchgeführt werden. Auch wenn dies dauerhaft nicht in allen Bereichen

sinnvoll ist, kann die mit diesen Formaten gesammelte Erfahrung langfristig helfen, physische durch virtuelle Meetings zu ersetzen.

Ein weiterer großer Hebel zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen ist eine Reduktion des Flugverkehrs (mögliche 35 TWh/a Einsparung, entspricht fünf Prozent des EEV des Verkehrs). Neben direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken durch einen geringeren Flugverkehr auch die Emissionen von bestimmten Luftschadstoffen (bspw. Partikel und Stickoxide), die ebenfalls insgesamt eine strahlungsverstärkende Wirkung haben. Die Klimawirkung übersteigt damit die reine CO<sub>2</sub>-Einsparung. Ein geringerer Flugverkehr wäre bspw. durch den Ersatz von physischen durch virtuelle Meetings, den Umstieg auf andere Verkehrsträger (insbesondere auf Schienenverkehr mit Ausbau eines europäischen Nachtzugnetzes) und ein verändertes Urlaubsverhalten erreichbar.

In Summe könnten nach Abschätzung des UBA durch die in Abbildung 44 beschriebenen Maßnahmen rund 91 TWh/a, also zwölf Prozent des EEV im Verkehr, eingespart werden.

Abbildung 44  
Einsparpotenzial ausgewählter Suffizienz-Maßnahmen im Verkehrsbereich bis 2030

	Maßnahmen	Mögliche Einsparung
	Umstieg auf bereits heute emissionsärmere oder -freie Verkehrsträger	- 21 TWh/a
	Substitution von 30 % der Dienstreisen durch Telemeetings	- 21,5 TWh/a
	Kauf kleinerer Pkw	- 15 TWh/a
	Reduktion (Halbierung) der privaten Flugreisen	- 34,7 TWh/a
	<b>Summe</b>	<b>91 TWh/a</b>

Einsparpotenzial bis 2030 im Vergleich zu einem bestehenden Klimaschutzszenario (Energiewendeszenario der „Politikszenerien VI“ gem. UBA, 2013a).

Quelle: UBA, 2016; eigene Darstellung Prognos, 2020

167 UBA, 2019b.  
168 Der EEV des Verkehrs ist in den letzten Jahren angestiegen und betrug im Jahr 2019 etwa 770 TWh (BMW, 2019d).

02.3 Landwirtschaft und Ernährung




Unterschiedliche Ernährungsweisen sind mit verschiedenen hohen Treibhausgas-Emissionen verbunden. Insbesondere bei der Erzeugung tierischer und stark verarbeiteter Lebensmittel entstehen deutliche klimaschädliche Emissionen.<sup>169</sup> Daher bietet eine Ernährung mit weniger tierischen Produkten Potenziale zur Treibhausgas-Einsparung, v. a. zur Verringerung von Methan-Emissionen.<sup>170</sup> Ein um die Hälfte reduzierter Fleischverbrauch könnte 13 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. pro Jahr einsparen<sup>171</sup> (das entspricht etwa 20 Prozent der Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft<sup>172</sup>). Ein geringerer Außer-Haus-Verzehr macht mit einer Reduktion von elf Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. pro Jahr circa ein Drittel der Einsparungen aus.<sup>173</sup>

Durch einen mit 30 Prozent deutlich höheren Anteil biologisch produzierter Lebensmittel als heute ergeben sich zusätzliche Treibhausgas-Emissionseinsparungen von 21 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. pro Jahr.<sup>174</sup> Allerdings ist es umstritten, ob biologische Landwirtschaft durch einen geringeren Einsatz von Pestiziden und Düngern und möglichen Humusaufbau gegenüber konventioneller Landwirtschaft im Endeffekt Treibhausgas-Emissionen einspart oder durch erhöhten Flächenbedarf zusätzliche Emissionen erzeugt.<sup>175</sup> Daher werden diese möglichen Einsparungen hier nicht berücksichtigt.

Einen erheblichen Einspareffekt hat dagegen die Vermeidung von Lebensmittelabfällen. Über die gesamte Herstellungskette landeten 2015 in Deutschland zwölf Mio. Tonnen Lebensmittel im Abfall, davon waren sieben Mio. Tonnen vermeidbarer Abfall.<sup>176</sup> Der Großteil davon entfiel auf Haushalte (6,1 bzw. 2,7 Mio. Tonnen) und Außer-Haus-Verzehr (1,2 bzw. 1,7 Mio. Tonnen).<sup>177</sup> Könnten zehn Prozent der Lebensmittelabfälle in Haushalten eingespart werden, könnte dies die Treibhausgas-Emissionen um acht Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. verringern.

In Summe könnten nach Abschätzung des UBA durch die in Abbildung 45 genannten Maßnahmen rund 32 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq an Emissionen eingespart werden, das entspricht der Hälfte der Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft.<sup>178</sup>

Abbildung 45  
Einsparpotenzial ausgewählter Suffizienz-Maßnahmen im Bereich Ernährung bis 2030

	Maßnahmen	Mögliche Einsparung in Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq. pro Jahr
	Reduktion des Fleischkonsums um die Hälfte	- 13,3 Mio.
	Um 10 % geringerer Außer-Haus-Verzehr	- 10,8 Mio.
	10 % weniger Lebensmittelabfälle in Haushalten	- 8 Mio.
	<b>Gesamt</b>	<b>32, 1 Mio.</b>

Einsparpotenzial bis 2030 im Vergleich zu einem bestehenden Klimaschutzszenario (Energiewendeszenario der „Politikszenerien VI“ gem. UBA, 2013a).

Quelle: UBA, 2016; eigene Darstellung Prognos, 2020

169 UBA, 2019h; Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlicher Verbraucherschutz und Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL, 2016.  
170 Dabei ist zu beachten, dass bei einigen pflanzlichen Lebensmitteln, insbesondere Reis, ebenfalls hohe Methan-Emissionen sowie Lachgasemissionen im Anbau entstehen.  
171 UBA, 2016.  
172 Diese lagen im Jahr 2018 bei knapp 64 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. (BMW, 2019d).  
173 UBA, 2016.  
174 UBA, 2016.  
175 BMEL, 2016.  
176 Vermeidbare Abfälle betreffen Lebensmittel, die grundsätzlich verzehrbar sind – im Gegensatz zu Küchenabfällen wie Schalen und Kerne etc.  
177 Schmidt et al., 2019.  
178 Diese lagen im Jahr 2018 bei knapp 64 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. (BMW, 2019d).

## 02.4 Gebrauchsgüter

Eine Reduktion des Konsums von Produkten, insbesondere aus den Bereichen Elektronik, Bekleidung, Möbel und verwandten Bereichen, ist aus Nachhaltigkeitsgründen auf mehreren Ebenen hilfreich. Bewusste Entscheidungen für die Anschaffung langlebiger und reparabler Produkte sowie der Kauf von Secondhand-Waren oder die Nutzung von Tauschmodellen tragen dazu bei, Ressourcen, Energie und Treibhausgas-Emissionen einzusparen und Abfall zu vermeiden. Hier gibt es starke Überschneidungen mit der Sharing Economy und der Kreislaufwirtschaft bzw. zirkulären Wertschöpfung (Teil III Kapitel 03). Inwieweit ein reduzierter Konsum von Gebrauchsgütern dazu beiträgt, die deutschen Treibhausgas-Emissionen zu senken, ist schwierig abzuschätzen. Da Deutschland einen Großteil der entsprechenden Produkte importiert, ist die direkte Wirkung von Veränderungen im Konsum auf die deutschen Treibhausgas-Emissionen vermutlich eher begrenzt.<sup>179</sup>

Ist eine Neuanschaffung erforderlich, können bewusste Entscheidungen für energiesparendere Geräte helfen, den Stromverbrauch zu reduzieren und damit Treibhausgase einzusparen. Viele neue Elektrogeräte, vom Kühlschrank bis zur Waschmaschine, verbrauchen heute deutlich weniger Energie als noch vor wenigen Jahren. Bei der Beleuchtung kann der Stromverbrauch durch die Nutzung effizienter Beleuchtungstechniken wie Leuchtdioden (LED) deutlich reduziert werden (siehe auch Teil III Kapitel 04.2.1). Allerdings können diese Effekte durch den Kauf größerer oder die Nutzung mehrerer Geräte (z. B. Fernseher) kompensiert werden. Zudem existieren diverse Produkte zur Reduktion des Energieverbrauchs, bspw. Anwesenheitssensoren für Beleuchtung und Raumwärme oder Wasserspararmaturen.

## 02.5 Chancen und Herausforderungen

Abbildung 46 gibt einen Überblick über die vier relevanten Bereiche für Verhaltens- und Konsumanpassungen und die Chancen und Herausforderungen, die sich durch geänderte Konsummuster ergeben können. Veränderungen bei der Verkehrsmittelwahl und den Ernährungsgewohnheiten können zu einer Verbesserung der allgemeinen Gesundheit durch bessere Luftqualität, mehr Bewegung und ggf. einer gesünderen Ernährung führen. Veränderte Konsummuster können in weiteren Bereichen des Umweltschutzes zu positiven Effekten führen, bspw. reduzierter Flächenverbrauch, Verbesserung des Tierwohls, Reduzierung von Ressourcenverbrauch und Abfall.

Einige der beschriebenen Maßnahmen (z. B. Reduzierung der Raumtemperatur oder keine Beleuchtung nicht genutzten Räume) leisten nur einen geringen Beitrag zur Einsparung von Energie und Treibhausgas-Emissionen. Durch die flächendeckende Einführung der LED-Beleuchtung und die ohnehin notwendige energetische Sanierung von Wohngebäuden schrumpfen die durch diese Handlungsoptionen erreichbaren Einsparungen weiter.





Allerdings ist die Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen mit diversen Herausforderungen verbunden. Bspw. könnte ein in Summe niedrigeres Konsumniveau zu geringerer wirtschaftlicher Aktivität und langsamerem Wirtschaftswachstum führen mit negativen Konsequenzen für den Arbeitsmarkt und die sozialen Sicherungssysteme.

Hinzu kommen Hemmnisse auf der individuellen Ebene. Dazu zählen höhere Investitionen in energieeffiziente Geräte oder langlebige Produkte. Veränderungen im Konsumverhalten werden insbesondere gehemmt durch

1. individuelle Präferenzen (z. B. Bereitschaft zur Reduktion des Fleischkonsums),
2. fehlendes Wissen (z. B. bzgl. der Reparaturmöglichkeiten) oder
3. mangelnde Infrastruktur (z. B. keine sicheren Fahrradwege).

Da technische Lösungen allein voraussichtlich nicht ausreichen werden, um die Klimaschutzziele zu erfüllen, sollten Veränderungen von Verhaltens- und Konsummustern als Teil der Treibhausgas-Minderungsstrategie mitgedacht werden. Dabei werden freiwillige Veränderungen auf individueller Ebene nicht ausreichen, einen substanziellen Beitrag zur Zielerreichung zu leisten. Doch können so unterschiedliche Lösungsansätze erprobt und Erfahrungen gesammelt werden. Um durch Verhaltensänderungen deutliche Treibhausgas-Reduktionen zu erreichen, werden entsprechende politische Maßnahmen erforderlich sein, also ein Mix aus zusätzlicher Information, monetären Anreizen, ordnungsrechtlichen Instrumenten, neuen Angeboten sowie Geschäftsmodellen und Anpassungen der Infrastruktur.

Abbildung 46  
Mögliche Chancen und Herausforderungen durch Änderungen von Konsummustern

Bereich	Chancen	Herausforderungen
 <b>Gebäude und Wohnen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– für Städte mit einem begrenzten Wohnraumangebot</li> <li>– Reduzierung des Flächenverbrauchs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– negative Auswirkung auf Bauwirtschaft möglich</li> </ul>
 <b>Verkehr</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– weniger Stau</li> <li>– bessere Luftqualität</li> <li>– mehr Zeit (durch weniger Pendeln / Dienstreisen)</li> <li>– Verbesserungen der Gesundheit (Rad fahren, zu Fuß gehen)</li> <li>– Zunahme des Tourismus in Deutschland und Bayern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Infrastrukturausbau nötig</li> <li>– Rückgang Pkw-Nachfrage möglich</li> <li>– Verwerfungen in der Luftfahrtindustrie möglich</li> </ul>
 <b>Landwirtschaft und Ernährung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– u. U. gesündere Ernährung</li> <li>– eher Umstellung von Gewohnheiten und Alltagspraktiken als Verzicht</li> <li>– Verbesserung des Tierwohls</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ernährung als sehr emotionales und wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärtes Thema</li> <li>– regionale und Bioprodukte oft schlechter verfügbar und teurer</li> </ul>
 <b>Konsumgüter</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ressourcensparend</li> <li>– Reduzierung von Abfall</li> <li>– ggf. kostensparend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– höhere Anfangsinvestitionen für langlebige Produkte</li> <li>– volkswirtschaftliche Gesamtnachfrage könnte sinken</li> </ul>

Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

<sup>179</sup> Siehe hierzu auch die unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands bei Aufteilung nach Territorial- und Konsumprinzip (Teil II Kapitel 3.1.2).

## 03 Kreislaufwirtschaft

**Die Kreislaufwirtschaft, verstanden als zirkuläre Wertschöpfung, kann in vielfältiger Art und Weise zur Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen beitragen.**

### 03.1 Linearwirtschaft, Kreislaufwirtschaft und zirkuläre Wertschöpfung

Im engeren Sinne umfasst die Kreislaufwirtschaft die Abfallwirtschaft mit vorgelagertem Maschinenbau und Handelsaktivitäten. Dieses enge Verständnis reicht zur Erfassung der Stoffkreisläufe nicht aus, da wichtige Akteure, Branchen und Prozesse nicht betrachtet werden. Ein deutlich weiter gefasstes Verständnis wird häufig unter dem Begriff der zirkulären Wertschöpfung (Circular Economy) diskutiert. Das Konzept der zirkulären Wertschöpfung geht üblicherweise deutlich über die klassische Kreislaufwirtschaft hinaus und umfasst fast alle Branchen sowie die Produktion, den Konsum und die Nutzungsarten von Produkten bis hin zur Schließung des Stoffkreislaufes (Abbildung 48). Im Folgenden werden die Begriffe weit gefasst und synonym verwendet.

#### Von der Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft

Die Linearwirtschaft oder „Wegwerfwirtschaft“ beschreibt das gegenwärtig vorherrschende System, bei dem viele Produkte eine kurze Lebensdauer haben und ein Großteil der eingesetzten Ressourcen am Ende der Lebenszyklen entsorgt (deponiert oder thermisch verwertet) werden. Im Gegensatz dazu sollen in der Kreislaufwirtschaft Ressourcen und Produkte möglichst lange genutzt und im Kreislauf gehalten werden. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Produktion, Verbrauch, Entsorgung und Geschäftsmodelle so auszugestalten, dass Abfälle, Emissionen und Energieverbräuche verringert werden (Abbildung 47). Damit kann die Transformation der traditionellen Linearwirtschaft hin zur Kreislaufwirtschaft einen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz leisten. Zugleich profitiert die Kreislaufwirtschaft von der Energiewende bzw. dem Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energien.

Im Mittelpunkt der Kreislaufwirtschaft stehen drei Bereiche:

1. die Reduktion des Bedarfs und Verbrauchs von (nicht erneuerbaren) Rohstoffen, Materialien und Produkten,
2. die Verlängerung der Lebenszyklen von (nicht erneuerbaren) Rohstoffen, Materialien und Produkten sowie
3. das Recycling von (nicht erneuerbaren) Rohstoffen, Materialien und Produkten.

Zur Reduktion ihres Verbrauchs müssen die Ressourcen

#### Inhalte

03.1	Linearwirtschaft, Kreislaufwirtschaft und zirkuläre Wertschöpfung	102
03.2	Klimaschutzpotenziale der Kreislaufwirtschaft	103
03.3	Chancen und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft	105
03.4	Politische Zielsetzungen und Bedeutung der Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Bayern	106

möglichst effizient genutzt sowie erneuerbare Materialien und Energien priorisiert eingesetzt werden. Die Lebensdauer kann bspw. durch langlebigere Konstruktionen, Instandhaltungen, Überholung, Reparatur oder Wiederverwendung verlängert werden. Zudem ermöglicht die Sharing Economy eine intensivere Nutzung von zeitweise ungenutzten Ressourcen, etwa durch Leasing oder Vermietung (z. B. Car-, Ride-, Homesharing). Am Ende der Lebenszyklen sollen die Rohstoffe, Materialien und Produkte recycelt und damit als Sekundärrohstoffe erneut zu einer Ressource werden. Dies kann umfänglich insbesondere nur dann gelingen, wenn die späteren Weiterverwendungs- und Recyclingoptionen eines Produktes bereits in der vorgelagerten Designentwicklung mit bedacht werden.

Abbildung 47

Vereinfachte schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft



Quelle: EEA, 2015; eigene Darstellung Prognos, 2020

### 03.2 Klimaschutzpotenziale der Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft kann durch die Reduktion des Verbrauchs, die Verlängerung der Lebenszyklen und das Recycling in vielfältiger Art und Weise zur Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen beitragen. Der Klimaschutzbeitrag eines verringerten spezifischen Energie-, Material- und Rohstoffverbrauchs hängt wesentlich davon ab, inwiefern realisierte Effizienzsteigerungen durch einen höheren Konsum kompensiert werden (Rebound-Effekt). Da mehr als die Hälfte der globalen Treibhausgas-Emissionen in direktem oder indirektem Zusammenhang mit der Materialwirtschaft stehen, bietet der Umstieg auf die Kreislaufwirtschaft ein erhebliches Einsparungspotenzial.<sup>180</sup> Schätzungen gehen davon aus, dass die Treibhausgas-Emissionen in der EU in den Sektoren Mobilität, Ernährung und bebaute Umwelt durch die Umstellung des Systems von einem linearen hin zu einem zirkulären Wirtschaften bis zum Jahr 2030 um rund die Hälfte gegenüber 2012 reduziert werden könnten.<sup>181</sup>

#### Klimaschutzbeitrag der Abfallwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft wird im Deutschen Treibhausgas-Inventar nicht eigenständig bilanziert. Für den Sektor „Abfallwirtschaft und sonstiges“, der im Wesentlichen die mechanisch-biologische Behandlung, die Kompostierung und die Deponierung beinhaltet und den die Kreislaufwirtschaft heute mit 95 Prozent dominiert, weist das deutsche Treibhausgas-Inventar eine Reduktion der Emissionen um etwa 67 Prozent seit 1990 auf rund zwölf Mio. Tonnen im Jahr 2015 aus. In keinem anderen Sektor ist die relative Minderung größer.

<sup>180</sup> OECD, 2018.

<sup>181</sup> Ellen MacArthur Foundation und McKinsey Center for Business and Environment, 2015.

Die Einsparungen sind zu einem Großteil auf das Verbot und die darauffolgende Schließung von Deponien für unbehandelte Siedlungsabfälle im Jahr 2005 zurückzuführen. Der Sektor „Abfallwirtschaft und sonstiges“ erfasst allerdings nur einen Teil der Treibhausgas-Bilanz der gesamten Kreislaufwirtschaft. Weitere Be- und Entlastungen, die durch die Kreislaufwirtschaft entstehen, werden in anderen Sektoren bilanziert, bspw. in der Industrie, der Landwirtschaft, im Verkehr oder in der Energieerzeugung.<sup>182</sup>

Den wohl größten Beitrag zum Klimaschutz kann die Vermeidung und ggf. das Recycling von Abfällen leisten (für Lebensmittelabfälle siehe Teil III Kapitel 02.3). Sind Abfälle nicht vermeidbar, kann ihre energetische Verwertung helfen, fossile Energieträger zu ersetzen und so Treibhausgase einzusparen. Inzwischen wird zwar in fast allen Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland die bei der thermischen Behandlung freigesetzte Energie genutzt, Steigerungen der Wirkungsgrade sind aber noch möglich. Nach Berücksichtigung des Eigenverbrauchs beläuft sich die durch die Abfallverbrennung bereitgestellte Energiemenge auf rund 3,7 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland. Allerdings nimmt der klimawirksame Nutzen der Erzeugung von Energie aus Abfall mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Energieversorgung ab, da die energetische Abfallverwertung nicht klimaneutral ist.<sup>183</sup> Zudem sollten (technische) Lock-in-Effekte<sup>184</sup> vermieden werden, bei denen Abfallvermeidung nicht mehr priorisiert wird, da thermische Behandlungsanlagen mit Brennstoffen versorgt werden müssen.

In Deutschland belief sich das Abfallaufkommen im Jahr 2017 auf etwa 412 Mio. Tonnen. Mit rund 81 Prozent wurde der Großteil der Abfälle stofflich oder energetisch verwertet. Über die Hälfte des Gesamtaufkommens entfiel auf Bau- und Abbruchabfälle. Der Rest bestand zu ungefähr gleichen Teilen aus Siedlungsabfällen, Sekundärabfällen (Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen) und übrigen Abfällen (insbesondere aus Produktion und Gewerbe).<sup>185</sup>

Ein weiterer Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz kann in der Nutzung abfallwirtschaftlich geprägter Flächen als Standorte zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (z.B. Photovoltaikanlagen auf ehemaligen Deponien) gesehen werden. Diese Standorte bieten oftmals diverse Vorteile, bspw. sind die Flächen ohnehin frei verfügbar

(kein zusätzlicher Landverbrauch), weisen eine günstige Lage (u.a. geringe Störung des Landschaftsbilds) und Topografie (u.a. nutzbare Flächen, Neigungsverhältnisse, Verschattungen) auf und halten die erforderliche Infrastrukturen bereits vor (u.a. Umzäunung, Stromanschluss, Verkehrsanbindung, Überwachung).<sup>186</sup>

#### Klimaschutzbeitrag weiterer Bereiche der Kreislaufwirtschaft

Über die energetische Nutzung von Abfällen hinaus kann die Kreislaufwirtschaft vor allem durch die Steigerung der Energieeffizienz in technischen Anlagen und die Substitution von Primärrohstoffen zum Klimaschutz beitragen. Die Substitution von Primärrohstoffen kann entweder dadurch erfolgen, dass Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe ersetzt werden (z.B. Einsatz von Schrott bei der Stahlproduktion) oder „alte“ Materialien direkt anderen Nutzungen zugeführt werden. Für Letzteres braucht es kreative Ansätze und innovative Zusammenarbeit verschiedener Branchen. Bspw. können Bahnschienen grundsätzlich als Stahlträger im Bauwesen direkt weiterverwendet werden. Ein weiteres Beispiel ist das chemische Recycling von Kunststoffen und die Nutzung der recycelten Bestandteile zur Herstellung von Gasen oder Ölen (Kasten 18).

In der Regel werden Sekundärrohstoffe mit geringerem Energieaufwand hergestellt und haben kürzere Transportwege als Primärrohstoffe. Für die Produktion von Sekundär-Aluminium wird bspw. 95 Prozent weniger Energie aufgewandt als für die Produktion von Primär-Aluminium, bei Stahl aus Stahlschrott sind es fast 70 Prozent weniger. Auch die Wiederaufbereitung von Kunststoffen zur Gewinnung von Rezyklaten (Produkte aus Recyclingprozessen) verbraucht grundsätzlich weniger Energie als die Produktion von Neuware. Schätzungen gehen davon aus, dass sich die Einsparungen an Primärenergie durch das gesamte stoffliche Recycling in Deutschland auf jährlich über 100 TWh belaufen (das entspricht etwa 2,7 Prozent des Primärenergieverbrauchs in Deutschland).<sup>187</sup>

Der Beitrag der Sharing und Repairing Economy und veränderter Nutzungsszenarien zum Klimaschutz ist noch weitgehend unklar. Er wird insbesondere davon abhängen, inwiefern realisierte Einsparungen durch einen höheren Konsum kompensiert werden.

<sup>182</sup> UBA, 2017.

<sup>183</sup> Gemischte Siedlungsabfälle im Restabfall sind ungefähr zur Hälfte biogenen und fossilen Ursprungs. Anders als fossile Materialien wird Biomasse per Definition als klimaneutral betrachtet, da bei der thermischen Nutzung grundsätzlich nur die Menge an Treibhausgasen emittiert wird, die die Biomasse vorher durch ihr Wachstum gebunden – also der Atmosphäre entzogen – hat (UBA, 2018).

<sup>184</sup> Als Lock-in-Effekt wird in der Regel eine Situation bezeichnet, bei der (zumeist aus technischen oder praktischen Gründen) auf einem bestimmten Pfad verblieben wird, obwohl dieser bereits als falsch, nicht zielführend oder als zu kostenintensiv bzw. aufwendig identifiziert wurde.

<sup>185</sup> Statistisches Bundesamt, 2020.

<sup>186</sup> Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015.

<sup>187</sup> BDE et al., 2018.

#### Kasten 18

##### Chemisches Recycling von Kunststoffen

Aktuell erfolgt das Recycling von Kunststoffen durch mechanische Verfahren, bei denen die chemische Struktur der Kunststoffe erhalten bleibt. Ein relativ neuer Ansatz ist das chemische Recycling, bei dem Kunststoffabfälle in einzelne chemische Bestandteile zerlegt werden (z.B. durch Solvolyse, Gasifizierung oder Pyrolyse). Die recycelten Bestandteile dienen zur Herstellung von Gasen oder Ölen, die fossile Rohstoffe teilweise ersetzen können. Die Verfahren sind grundsätzlich dazu geeignet, bisher nicht recycelbare oder nur minderwertig verwertbare Kunststoffabfälle zu recyceln (z.B. Kunststoffe mit giftigen Bestandteilen, mit Farbpigmenten oder mit mehreren Schichten). Allerdings steht das chemische Recycling in weiten Teilen noch vor ungelösten Problemen und Fragen (z.B. hoher Energie- und Kostenaufwand, technischer Aufwand, Rentabilität bei großen Müllmengen, Umwelt- und Gesundheitswirkung). Zudem werden beim chemischen Recycling weiterhin neue fossile Rohstoffe gebraucht, um neue Kunststoffe herzustellen – zumindest solange die recycelten Endprodukte nicht wieder zu neuen Kunststoffen verarbeitet werden. Damit ist der Beitrag des chemischen Recyclings zur Kreislaufwirtschaft und zum Klimaschutz unklar; zumal die Etablierung des chemischen Recyclings die Suche nach nachhaltigen Alternativen für nicht recycelbare Kunststoffe schwächen kann.<sup>188</sup>

### 03.3 Chancen und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft

#### Chancen für Unternehmen

Neben den Vorteilen für Umwelt und Klima bietet die Kreislaufwirtschaft grundsätzlich auch Chancen für Unternehmen, bspw.:

1. Reduktion von Beschaffungsrisiken (z.B. Preisvolatilitäten, Lieferprobleme) durch Wiederverwendung von Materialien
2. Kosteneinsparungen (u.a. für Energie, Emissionszertifikate, Ressourcen, Lagerhaltung, Abfallentsorgung)
3. Verbesserung des Unternehmensimages (z.B. durch Umweltengagement, Vermeidung von Ressourcen, die unter fragwürdigen bzw. gefährlichen Bedingungen gefördert wurden)
4. Erschließung neuer Kundengruppen und Geschäftsfelder (z.B. Sharing Economy)
5. Stärkere Kundenbindung durch verlängerte Produktlebenszyklen
6. Erlöse aus dem Verkauf wiederaufbereiteter Materialien („Abfallverwertung“)
7. Generierung von Know-how und Wettbewerbsvorteilen in zukunftsträchtigen Bereichen (z.B. Wiederaufarbeitung, Wiederverwendung, Reparatur)

#### Herausforderungen für die Transformation

Die Kreislaufwirtschaft steht in weiten Teilen noch am Anfang. Schätzungen gehen davon aus, dass gegenwärtig unter zehn Prozent der globalen Wirtschaft zirkulär aufgestellt sind.<sup>189</sup> Noch bestehen vielfältige technische, betriebswirtschaftliche und gesellschaftliche Herausforderungen für die Transformation. Hemmnisse betreffen insbesondere die Verlängerung der Lebenszyklen und das Recycling:

#### Verlängerung der Lebenszyklen

Die Verlängerung der Lebenszyklen scheidet oftmals an mangelnden (kostengünstigen) Möglichkeiten der Reparatur bzw. der mangelnden Berücksichtigung der Reparatur in der vorgelagerten Designentwicklung. Bspw. sind viele Produkte nicht modular aufgebaut, sodass ein Austausch von Ersatzteilen (z.B. Akkumulatoren) nicht vorgesehen und teilweise auch nicht möglich ist. Zudem sind Sharing-Konzepte, die eine intensivere Nutzung von zeitweise ungenutzten Ressourcen ermöglichen, in vielen Bereichen noch nicht weit verbreitet und angenommen (z.B. Möbel, Elektro- und Haushaltgeräte).

<sup>188</sup> NABU, 2020.

<sup>189</sup> De Wit, M. et al., 2020.

### Recycling

Das Recycling scheitert oftmals an mangelnden „kreislauf-tauglichen“ Materialien, mangelnden (kostengünstigen und marktfähigen) Recyclingtechniken und -verfahren sowie mangelnder Berücksichtigung der Wiederverwertung in der vorgelagerten Designentwicklung. Neben den Kosten für die Abfallsammlung können viele Werkstoffe und Produkte oftmals nur kosten- oder energieintensiv recycelt werden (z.B. Lithium-Akkumulatoren, chemisches Recycling von Kunststoffen). Zudem sind die Sekundärrohstoffe bei Preis und Qualität oftmals nicht konkurrenzfähig mit Primärrohstoffen (Neuware). Weitere Hemmnisse stellen teilweise hohe Kosten und strenge Vorschriften (u.a. zum Schutz der menschlichen Gesundheit) bei der Wiederverwendung recycelter Materialien dar. Bspw. erfüllen Kunststoffzyklate häufig nicht die Qualitätsanforderungen an bestimmte Verwendungen (z.B. Lebensmittelkontaktqualität) und die Nutzung der Rezyklate kann teilweise energie- und kostenintensiver sein als bei Neuware. Nachfrageseitig wird der Einsatz von Verpackungen mit Recyclingkunststoffen u.a. durch die mangelnde Akzeptanz von Graufärbungen und die mangelnde Bereitschaft, für Verpackungen mit Recyclingkunststoffen einen Mehrpreis zu zahlen, gehemmt.<sup>190</sup> Auch sind Bereitschaft oder Wissen zur ordnungsgemäßen Mülltrennung zum Teil noch gering, was die Zuführung zur stofflichen Verwertung erschwert bzw. verhindert. Bspw. wird in Deutschland nur rund die Hälfte der Geräte-Alt-Batterien Sammelstellen zugeführt. Beim „Gelben Sack“, über den Leichtverpackungen abgegeben und dem Recyclingprozess zugeführt werden können, liegt die Quote für „Fehlwürfe“ schätzungsweise zwischen 40

und 60 Prozent. Problematisch ist auch das Recycling von Verbundwerkstoffen, da die verschiedenen Materialien häufig nicht sortenrein voneinander trennbar und somit stofflich nicht verwertbar sind. Mit der Digitalisierung verbessern sich die Möglichkeiten, Produkte so zu kennzeichnen, dass Stoffgruppen besser getrennt und qualitativ hochwertigere Rezyklate erzeugt werden können.

Angesichts der vielfältigen Herausforderungen kann eine umfängliche Transformation zur Kreislaufwirtschaft nur gelingen, wenn alle Stakeholder aus Wirtschaft, Gesellschaft und Politik eingebunden werden. Auf Ebene der Unternehmen liegt der Fokus bisher zumeist auf der Schließung der Kreisläufe innerhalb des jeweiligen Unternehmens. Zusätzliche Potenziale können durch Kooperationen zwischen allen Akteuren in der Wertschöpfungskette, vom Design bis zur Recyclingwirtschaft, sowie durch (branchenübergreifende) Zusammenarbeit gehoben werden, bspw. durch die Verwendung nicht benötigter Reststoffe des einen Unternehmens als Werkstoffe in anderen Unternehmen.<sup>191</sup> Bisher existiert zwar ein relativ großes Angebot an nicht benötigten Reststoffen bzw. verwertbaren Abfällen, es fehlt allerdings oftmals die entsprechende Nachfrage. Um Nachfrager besser über die Angebote zu informieren und Anbieter und Käufer zusammenzubringen, werden gegenwärtig entsprechende Datenbanken entwickelt, bspw. die branchenübergreifenden Plattformen ReUse and Trade, Excess Materials Exchange und IHK-Recyclingbörse oder speziell für die Bauwirtschaft Madaster.

### 03.4 Politische Zielsetzungen und Bedeutung der Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Bayern

Die Kreislaufwirtschaft ist eines der prägenden politischen Leitmotive für eine nachhaltige Ausrichtung des Wirtschaftssystems. Die Europäische Kommission hat 2015 einen ersten Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft beschlossen, der klare, rahmengebende Ziele setzt. Im Jahr 2020 wurde ein neuer Aktionsplan angenommen, der wesentlicher Bestandteil des Green Deals ist.

#### Situation in Deutschland

Deutschland erfüllt bei der stofflichen Verwertung als einziges Land die EU-Ziele für das Recycling von Siedlungsabfällen von 65 Prozent bis 2035. Da die stoffliche Verwertung auch die thermische Verwertung umfasst, liegen die deutschen Recyclingquoten über 65 Prozent. In vielen EU-Staaten ist noch die Abfalldeponierung üblich, die in Deutschland 2005 verboten wurde. Gleichzeitig ist das absolute Aufkommen von Siedlungsabfällen pro Einwohner in Deutschland besonders hoch und liegt deutlich über dem Aufkommen anderer EU-Staaten.<sup>192</sup>

<sup>190</sup> Industrievereinigung Kunststoffverpackungen, 2019.

<sup>191</sup> EME, 2019.

<sup>192</sup> BDE et al., 2018.

In Deutschland bestehen verschiedene nationale und regionale Programme, die sich mit Teilaspekten der Kreislaufwirtschaft beschäftigen bzw. deren Umsetzung adressieren. Auf Bundesebene sind dies bspw. das Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess I und II sowie künftig ProgRess III) und das Forschungsprogramm für Nachhaltige Entwicklung (FONA), die beide u.a. der Umsetzung der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie dienen.<sup>193</sup> Das ProgRess benennt Maßnahmen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz (und Energieeffizienz) entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Rohstoffgewinnung über Produktgestaltung, Produktion und Konsum bis hin zur Kreislaufwirtschaft.<sup>194</sup> Ziel des Rahmenforschungsprogramms FONA ist es, dass Deutschland seine Position als Technologieführer „in den Bereichen Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel, nachhaltiges Ressourcenmanagement sowie innovative Umwelt- und Energietechnologien erhält und weiter ausbaut“.<sup>195</sup> Dabei steht für die Transformation der deutschen Wirtschaft hin zur ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft steht ein Fördervolumen von insgesamt 150 Mio. Euro bereit. In Bayern beschäftigen sich u.a. die Bayerische Forschungsallianz im Rahmen des INTERREG-Projekts MOVECO<sup>196</sup> sowie bayern innovativ<sup>197</sup> und bayern design<sup>198</sup> sowie die Industrie- und Handelskammern<sup>199</sup> mit Aspekten der Kreislaufwirtschaft.

Anders als in vielen Ländern innerhalb und außerhalb Europas (z.B. Schottland, Finnland, Spanien, Niederlande, China, Japan oder Kanada) existiert in Deutschland bisher keine explizite Kreislaufwirtschaft-Strategie. Anfang 2019 wurde deshalb von acatech mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) die Circular Economy Initiative Deutschland ins Leben gerufen. Ziel der Initiative ist die Entwicklung einer Roadmap, die aufzeigt, wie eine systemische Trendwende vom linearen zum zirkulären Wirtschaften gestaltet werden kann und welche Potenziale die Kreislaufwirtschaft für Deutschland bietet.<sup>200</sup>

#### Bedeutung der Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Bayern

Aufgrund ihrer breiten Wirkung in einer Vielzahl von Bereichen und Branchen lässt sich die Kreislaufwirtschaft, verstanden als zirkuläre Wertschöpfung, statistisch nicht vollständig erfassen. In den amtlichen Statistiken Deutschlands werden der Kreislaufwirtschaft lediglich die Bereiche

Abfallsammlung und -transport, Abfallbehandlung und -verwertung sowie Technik für die Abfallwirtschaft und Großhandel mit Altmaterialien zugerechnet. Obwohl die Statistiken damit nur einen Teil der Kreislaufwirtschaft abbilden, zeigen sie bereits, dass die Kreislaufwirtschaft ein relevanter Wirtschaftszweig in Deutschland ist. Die Bruttowertschöpfung in der so abgegrenzten Kreislaufwirtschaft belief sich im Jahr 2015 auf rund 21,5 Mrd. Euro und die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2016 auf 290.000 (das entspricht etwa 3,5 Prozent der gesamten Wertschöpfung und 4,3 Prozent der Beschäftigten im verarbeitenden Gewerbe).<sup>201</sup>

In Bayern ist die Kreislaufwirtschaft im Vergleich zur bayerischen Wirtschaftsstärke eher unterdurchschnittlich vertreten. Hier umfasste die Kreislaufwirtschaft 2014 rund 30.000 Erwerbstätige in 1.100 Unternehmen. Der Umsatz der Unternehmen nahm zwischen 2010 und 2014 um durchschnittlich 5,6 Prozent p. a. auf 5,1 Mrd. Euro zu. Ausschlaggebend hierfür waren Exportzuwächse und vor allem der Bereich „Anlagentechnik für die Kreislaufwirtschaft“, dessen Umsätze zwischen 2010 und 2014 um jahresdurchschnittlich 13,5 Prozent gestiegen sind. Umsatzstärker als die Kreislaufwirtschaft sind in Bayern drei andere Bereiche (Leitmärkte) der Umweltwirtschaft, die enge Verbindungen zur Kreislaufwirtschaft aufweisen:<sup>202</sup>

1. Im Leitmarkt Energieeffizienz (energieeffiziente Gebäude, Produktion und Geräte) erwirtschafteten 120.000 Beschäftigte in 13.000 Unternehmen im Jahr 2014 einen Umsatz von 22,4 Mrd. Euro (das entspricht etwa 6,8 Prozent der bayerischen Umsätze im verarbeitenden Gewerbe),
2. im Leitmarkt umweltfreundliche Energieerzeugung und -speicherung (Speichertechnologien, intelligente Energiesysteme und Netze sowie erneuerbare Energien) erwirtschafteten 39.000 Beschäftigte in 11.000 Unternehmen 2014 einen Umsatz von 9,8 Mrd. Euro (das entspricht etwa 3,0 Prozent der bayerischen Umsätze im verarbeitenden Gewerbe) und
3. im Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz (nachwachsende Rohstoffe und materialeffiziente Produktion) erwirtschafteten 51.000 Beschäftigte in 4.100 Unternehmen 2014 einen Umsatz von 5,9 Mrd. Euro (das entspricht etwa 1,8 Prozent der bayerischen Umsätze im verarbeitenden Gewerbe).

<sup>193</sup> Als Beispiele für Initiativen und strategisch-politische Positionierung nennen Weber und Stuchtey (2019: 23) „die Rohstoffstrategie der Bundesregierung (Versorgungssicherheit des Wirtschaftsstandorts), die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (SDGs 8 und 12), das Integrierte Umweltprogramm 2030 (planetare Grenzen), das Nationale Programm für Nachhaltigen Konsum (gesellschaftlicher Wandel), die Hightech-Strategie (Innovationen zur Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität), der Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe oder die Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 (biobasierte Wirtschaft), das Umweltinnovationsprogramm und das Programm GreenTech made in Germany (Umwelttechnologie als Wachstumstreiber)“.

<sup>194</sup> BMU, 2019c.

<sup>195</sup> BMBF, 2020.

<sup>196</sup> MOVECO Project, 2019.

<sup>197</sup> bayern innovativ, 2019.

<sup>198</sup> bayern design, 2017.

<sup>199</sup> DIHK, 2020.

<sup>200</sup> Weber und Stuchtey 2019.

<sup>201</sup> BDE et al., 2018.

<sup>202</sup> StMWi, 2017.

## 04 Zentrale Technologien für eine klimaschonende Zukunft

Von zentraler Bedeutung sind Klima-Technologien, die die Emissionsreduktion einfacher, effektiver oder kostengünstiger machen. Sie sind im Wesentlichen bereits bekannt und am Markt eingeführt.

### Inhalte

<b>04.1 Erneuerbare-Energien-Technologien</b>	<b>108</b>
04.1.1 Windenergie	112
04.1.2 Solarenergie	114
04.1.3 Wärmepumpen	115
04.1.4 Bioenergie	116
04.1.5 Geothermie	117
04.1.6 Wasserkraft	118
<b>04.2 Technologien zur Minderung des Energiebedarfs und der Emissionen</b>	<b>118</b>
04.2.1 Gebäude	118
04.2.2 Industrie	120
04.2.3 Verkehr	122
04.2.4 Landwirtschaft	126
<b>04.3 CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung</b>	<b>127</b>
04.3.1 CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung (CCS)	130
04.3.2 CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Nutzung (CCU)	130
04.3.3 Negativ-Emissionstechnologien (NET)	131
<b>04.4 Power-to-X</b>	<b>135</b>
04.4.1 Wasserstoff als grundlegendes PtX-Produkt und zentraler Energieträger	136
04.4.2 PtX-Syntheseprodukte	137
04.4.3 Hemmnisse bei der Herstellung und Nutzung von PtX-Produkten	138
<b>04.5 Einzelmaßnahmen „Was wäre wenn?“</b>	<b>138</b>

Die Technologien, die für eine klimaschonende Zukunft erforderlich sind, sind im Großen und Ganzen bereits bekannt und weitgehend ausgereift bzw. auf einem deutlichen Weg zur Marktreife. Hierbei geht es vor allem um Technologien, die die Umsetzung von Treibhausgas-Reduktionsmaßnahmen einfacher, effektiver oder kostengünstiger machen. In den vergangenen Jahrzehnten wurden in vielen Bereichen deutliche technologische Fortschritte erzielt. Zudem sind teilweise erhebliche Preisrückgänge („Lernkurven“) zu verzeichnen, was die Rentabilität und folglich die Diffusion der Technologien grundsätzlich verbessert.

Neben Erneuerbare-Energien-Technologien zur klimafreundlichen Bereitstellung von Energie (Teil III Kapitel 04.1) sind auch Technologien zur Minderung des Energiebedarfs (Teil III Kapitel 04.2) eine notwendige Voraussetzung, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Game-Changer, also neue Lösungstechnologien, die über die bereits bekannten am Markt verfügbaren hinausgehen, sind zwar ebenfalls Gegenstand der Analyse (Teil V Kapitel 02), aber für Klimaschutz und Klimaanpassung nur bedingt erforderlich.

### 04.1 Erneuerbare-Energien-Technologien

Der bei weitem größte Teil der globalen Treibhausgas-Emissionen (mehr als 70 Prozent) entsteht bislang bei der Verwendung und Umwandlung fossiler Energieträger – bspw. Stein- und Braunkohle in Kraftwerken zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung, Mineralölprodukte für Mobilität von Menschen und den Transport von Gütern, Erdgas für die Erzeugung von Strom, Raum- und Prozesswärme. Die Transformation des Energiesystems hin zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Versorgung auf Basis erneuerbarer Energieträger ist von zentraler Bedeutung, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Die Beiträge der einzelnen Sektoren (Strom/ Energieträgerumwandlung, Wärme und Verkehr) hierzu sind jeweils unverzichtbar und mit sehr unterschiedlichen technischen Maßnahmen sowie politischen Instrumenten erreichbar. Die Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind im Wesentlichen bereits bekannt und am Markt verfügbar. Die wichtigsten erneuerbaren Energiequellen bzw. -technologien sind:

<b>Windenergie</b>  On- und Offshore  Seite 112	<b>Solarenergie</b>  Photovoltaik und Solarthermie, z. T. inklusive „Umweltwärme“  Seite 114	<b>Wärmepumpen</b>    Seite 115
<b>Bioenergie</b>  feste Biomasse und Biogas  Seite 116	<b>Geothermie</b>    Seite 117	<b>Wasserkraft</b>    Seite 118

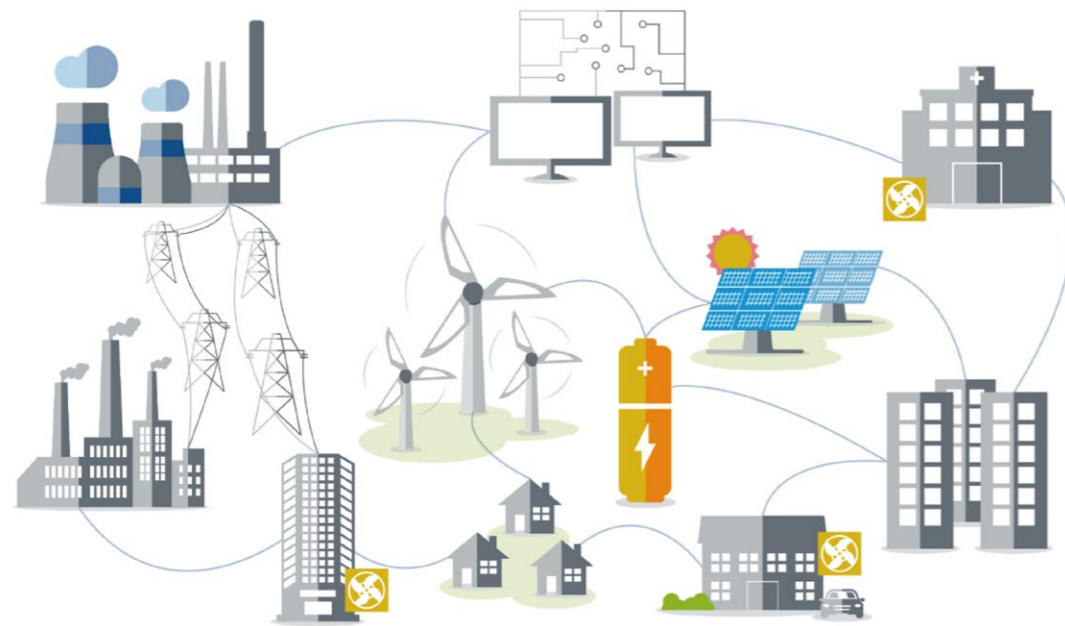
Ihre Einsatzmöglichkeiten und Potenziale hängen stark von dem jeweiligen technologischen Entwicklungsstand, der Verfügbarkeit der erneuerbaren Energiequelle und den lokalen geografischen Gegebenheiten ab. Grundsätzlich bieten Solar- und Windenergie unter den erneuerbaren Energiequellen die größten realisierbaren Potenziale. Ihr Dargebot ist jedoch Fluktuationen unterworfen, und der Ort der Stromerzeugung liegt oftmals nicht in der Nähe der großen Stromverbrauchszentren (v. a. bei offshore Windenergie). Zudem wird Energie, insbesondere Strom, auf Basis erneuerbarer Energien zunehmend dezentral erzeugt, und neue Abnehmer kommen hinzu (z. B. Wärmepumpen, Fern- und Nahwärmeerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung oder Großwärmepumpen, Elektromobilität). Diese Faktoren bedingen eine komplexere Struktur und einen erhöhten Flexibilisierungs-, Überwachungs- und Steuerungsbedarf des Stromsystems, aber auch insgesamt des Energiesystems, als bisher. Das erfordert auch Anpassungen der Struktur und Netztopologie. Zur Sicherung der Netzstabilität sind v. a. intelligente Stromnetze (Smart Grid) mit regelbaren Kraftwerken, Speicherkapazitäten sowie Möglichkeiten zur Abregelung von Anlagen nötig.

In intelligenten Stromnetzen werden Stromerzeugung, -verbrauch und -speicherung durch Einsatz von IKT miteinander vernetzt (Abbildung 48). Dies ermöglicht den Netzbetreibern eine dynamische Steuerung und Koordination der einzelnen Komponenten des Energiesystems und damit eine Optimierung der Netzauslastung und -stabilität. Damit können intelligente Stromnetze dazu beitragen, die Energieeffizienz zu erhöhen und die Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren. Probleme beim Aufbau intelligenter Stromnetze betreffen neben dem Ausbau von Speicherkapazitäten insbesondere die mindestens europaweite Normung und Standardisierung sowie die Gewährleistung von IT-Sicherheit und Datenschutz. Zudem sind in den verschiedensten Bereichen der Energiedienstleistungen neue Geschäftsmodelle erforderlich, um die Potenziale der Energie- und insbesondere der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien in vollem Umfang zu nutzen, zum Beispiel um Flexibilitätspotenziale anzureizen und auszuschöpfen. Der Transport der produzierten Energie (Netzeinbindung, ggf. Produktion von Wasserstoff etc.) muss ebenfalls gewährleistet werden, dies betrifft aber eher Systemfragen und ist nicht direkt von den einzelnen Erzeugungstechnologien abhängig. Zur Notwendigkeit des Netzausbaus siehe Kasten 19.



Die Technologie für den Bau und die Erneuerung von Netzen entwickelt sich stetig weiter. Für die großen Übertragungsstrassen wird Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnologie (HGÜ) eingesetzt. Es wird immer wieder diskutiert, ob nahezu verlustfrei leitende supraleitende Materialien mittel- und längerfristig für das Übertragungsnetz eingesetzt werden und damit die Leitungsverluste deutlich reduziert werden können. Derzeit müssten solche Infrastrukturen aber noch stark gekühlt (Sprungtemperatur von mindestens -77 Grad C) werden, um die supraleitende Eigenschaft aufrecht zu erhalten, daher werden für eine Umsetzung noch weitere Entwicklungen von Materialien mit höherer Sprungtemperatur erforderlich sein.

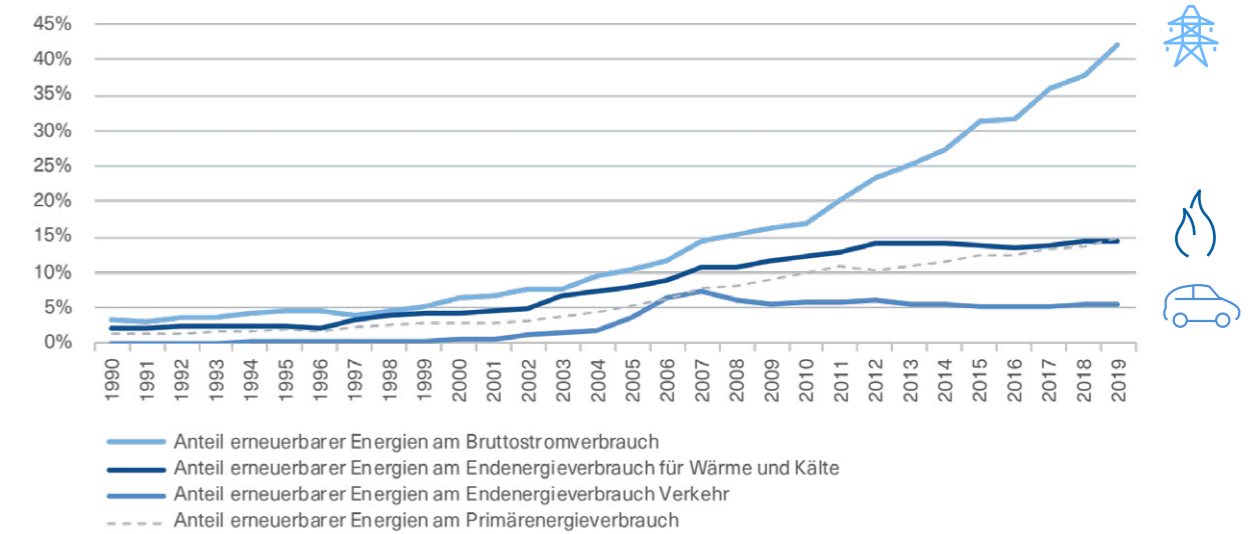
Abbildung 48  
Schematische Darstellung der Vernetzung von Stromerzeugung und Stromverbrauch durch intelligente Steuerung



Quelle: eigene Darstellung Prognos, 2020

In 2019 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Primärenergieverbrauch über alle Sektoren hinweg rund 14,8 Prozent und am Brutto-Endenergieverbrauch rund 17,1 Prozent. Dazu trug insbesondere der Stromsektor bei. Hier lag der Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch bei 42,1 Prozent; gefolgt vom Wärmesektor mit 14,5 Prozent und dem Verkehrssektor mit 5,6 Prozent (Abbildung 49). Infolge der Substitution entsprechender fossiler Energieträger durch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen konnten 2019 insgesamt etwa 203 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq. (netto) vermieden werden, davon 159 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq. im Stromsektor. Rund die Hälfte der Endenergie wird in Deutschland für die Erzeugung von Wärme und Kälte genutzt (Raumwärme, Klimatisierung, Warmwasser, Prozesswärme und -kälte). Im Sektor private Haushalte sind es sogar über 90 Prozent. Somit ist der Ausbau der klimafreundlichen Bereitstellung von Wärme und Kälte zur Erreichung der Klimaschutzziele zwingend erforderlich.<sup>203</sup>

Abbildung 49  
Anteile erneuerbarer Energien am Energieverbrauch



Quelle: BMWi und AGEE-Stat (Stand Februar 2020); eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Kasten 19 Notwendigkeit Netzausbau

Der zur Transformation erforderliche Ausbau erneuerbarer Energien geht mit hohen Erfordernissen beim Netzausbau und -anschluss sowie bei der Entwicklung und Zurverfügungstellung von Flexibilitätspotenzialen, die für die Integration fluktuierender erneuerbarer Energien benötigt werden, einher. Der Ausbau erneuerbarer Energien wird in der Gesellschaft zwar als generell notwendig anerkannt, konkrete Projekte (z. B. Windparks, Netzausbau, insbesondere auf der Übertragungsnetzebene) stoßen aber immer wieder auf erhebliche Widerstände in den betroffenen Regionen (NIMBY-Verhalten). Wie bei anderen großen Infrastrukturprojekten mangelt es hier oftmals an vertrauens- und akzeptanzbildenden Maßnahmen sowie an frühzeitiger professioneller Kommunikation bei der Organisation der Prozesse.

Aufgrund der aktuellen Akzeptanzprobleme beim Ausbau erneuerbarer Energien und der Stromnetze werden derzeit verstärkt Potenziale ausgelotet, durch große Speicherprojekte die vorhandenen Netze möglichst stark auszunutzen, auch wenn dadurch der regionale Austausch von großen Mengen an Windenergie (vor allem im Winter!) im Norden, Photovoltaik im Süden und den großen Verbrauchsschwerpunkten in Nordrhein-Westfalen und im Süden nicht vollständig gewährleistet werden kann. Hiermit werden jedoch effiziente Möglichkeiten zur Steuerung und Ausregelung lokaler und dezentraler Systeme weiterentwickelt. Allerdings ist dies kein Ersatz für den Ausbau der Höchstspan-

nungsebene, die nach wie vor dringend erforderlich ist, um den überregionalen Ausgleich der unterschiedlichen Produktions- und Nachfragemengen sowie ihrer zeitlichen Profile effizient zu gewährleisten. Auch für die Entwicklung und den Einsatz von Wasserstofftechnologien (v. a. in der Industrie) ist eine gute Versorgung mit Netzen erforderlich, um die benötigten Leistungen bereitzustellen. Auf europäischer Ebene ist ein Austausch und eine stärkere Vernetzung mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetzen (HGÜ-Netze) ebenfalls sinnvoll und notwendig für eine effiziente Ausgestaltung der Energietransformation, da insbesondere an den Westküsten große Windenergiepotenziale bestehen und die norwegischen großen Hydropotenziale bestehen und die norwegischen großen Hydropotenziale per Market Coupling gut eingebunden werden können (das norwegische Pumpspeicherpotenzial ist sehr klein, da die meisten hohen Süßwasserspeicher in die See entwässern). Durch einen konsequenten Abbau der Netzengpässe können die benötigten Backup-Kapazitäten deutlich reduziert werden, weil ein besserer Ausgleich von räumlich und zeitlich unterschiedlichen Einspeise- und Lastmustern organisiert werden kann.

Darüber hinaus sind für den weiteren Umbau des Energiesystems in den kommenden Jahr(zehnt)en zahlreiche Weiterentwicklungen vorhandener Technologien erforderlich. Außerdem wird erwartet, dass gerade die Weiterentwicklung der Informationstechnologien auch die Steuerung des künftigen Energiesystems und damit seine Ausprägung

stark beeinflussen wird. In diesem Kontext werden erhebliche Erwartungen an „smarte“ Technologien sowohl zur Verfügbarmachung großer Mengen an hoch differenzierten (Echtzeit-)Verbrauchsdaten (mittels Smart Meter) als auch zur differenzierten in Teilen selbstorganisierten Steuerung von verknüpften Energienetzen (Verknüpfung von Strom-, Wärme- und ggf. Gasnetzen mittels Smart Grid-Technologien) formuliert. Insbesondere ist die Umgestaltung der Verteilnetze für diese veränderten Anforderungen von kleinräumiger Ausregelung von fluktuierendem Angebot und Nachfrage eine Kernaufgabe, die mit starker IT-Unterstützung angegangen werden muss. Zudem fehlt zur Entwicklung und Zurverfügungstellung von Flexibilitätspotenzialen ein konsistenter und gegenüber heute deutlich veränderter (Regulierungs-)Rahmen, der u. a. Anreize für eine flexible effiziente Steuerung von Netzen und Verbrauchern auf unterschiedlichen Regionalitätsebenen setzt. Erst mit einem solchen Rahmen werden verlässliche Bedingungen für die Entwicklung entsprechender Geschäftsmodelle geschaffen, mit denen Flexibilitätspotenziale auf der Nachfrage- wie auf der Erzeugungsseite in verschiedenen Märkten effizient gehoben und verknüpft werden können.

#### 04.1.1 Windenergie

Die Nutzung von Windenergie zur Stromerzeugung ist technologisch weitgehend ausgereift, wird weltweit eingesetzt und bildet ein tragendes Element der Energiewende. Die Erzeugung erfolgt ohne „Brennstoffe“ mit Grenzkosten gleich null, der Ertrag ist abhängig von der geografischen Lage, der Standortqualität und der von den Rotoren überstrichenen Fläche. Gegenüber der Solarenergie hat Windenergie die Vorteile eines deutlich geringeren Flächenverbrauchs und höherer Volllaststunden in unseren Breiten, zumal Windleistung sowohl tagsüber als auch nachts anfällt. Die Stromerzeugung mit Windkraftanlagen hat onshore und offshore in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Lernkurven durchlaufen und ist gegenüber neuen konventionellen Kraftwerken konkurrenzfähig. In Deutschland leistet Windenergie den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Ihr Anteil betrug im Jahr 2019 über 50 Prozent, wobei sich die Winderzeugung an Land auf 41, 5 Prozent und auf See auf 10,1 Prozent belief. Insgesamt leistete die Windenergie im Jahr 2019 einen Beitrag von etwa 28 Prozent zur gesamten Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern.<sup>207</sup>

#### Verschiedene Techniken

Zur Nutzung der Windkraft existieren verschiedene Techniken, die sich in den Anlagenelementen bspw. hinsichtlich der Rotoren, des Generators oder auch des Turms unterscheiden. Im Allgemeinen wird in Windenergieanlagen die Bewegungsenergie des Windes über Rotoren (kinetisch) genutzt und in Generatoren in elektrische Energie umgewandelt. Bei diesen Umwandlungsschritten kommt es – wie bei allen Energiewandlungen – zu Verlusten. Von der Auftriebsenergie, die der Wind beim Vorbeiströmen an den Anlagenflügeln erzeugt, können physikalisch nicht mehr als etwa 60 Prozent genutzt werden. Weitere Verluste ergeben sich v. a. durch Reibung und Verwirbelungen. Infolge deutlicher Leistungssteigerungen erreichen moderne Windenergieanlagen mit einem mittleren Wirkungsgrad von rund 45 bis 50 Prozent, bezogen auf die kinetische Energie des anströmenden Windes über die von den Rotoren überstrichene Fläche, annähernd das theoretische Maximum.

#### Energieertrag

Für einen hohen Energieertrag sind v. a. hohe mittlere Windgeschwindigkeiten und große Rotorflächen nötig. Da Wind grundsätzlich in der Höhe gleichmäßiger und stärker weht, können höhere Anlagen das Windangebot besser ausnutzen. Zudem erlauben sie längere Rotorblätter. Das Größenwachstum der Anlagen ist eine Folge der physikalischen Gegebenheiten. Grundsätzlich gilt, dass der Stromertrag um das Achtfache bei einer Verdoppelung der Windgeschwindigkeit und um das Vierfache bei einer Verdoppelung des Rotordurchmessers steigt. Gegenüber Windenergieanlagen an Land sind Offshore-Anlagen zwar technisch komplexer und teurer, ihre Energieausbeute ist infolge der über dem Meer höheren und konstanteren Windgeschwindigkeiten jedoch in der Regel um etwa 40 Prozent größer.<sup>208</sup> Bei zu hohen Windgeschwindigkeiten müssen Windenergieanlagen in der Regel aus Gründen der Sicherheit (z. B. Überlastungen und Materialschäden) oder Leistungsregelung (z. B. konstante Leistungsabgabe) abgeregelt bzw. abgeschaltet werden. Zudem können an guten Standorten nicht beliebig viele Windenergieanlagen errichtet werden, da ein bestimmter Mindestabstand zueinander eingehalten werden muss, um die Ertragsreduktion durch gegenseitige Beeinflussung („Abschattung“) zu minimieren.

#### Windenergiepotenzial

Mehrere Studien kommen zu dem Schluss, dass das weltweite Windenergiepotenzial ausreicht, um den globalen Strombedarf problemlos zu decken.<sup>209</sup> Große Potenziale bestehen vor allem an Küsten, im Passatgürtel der Erde mit über 4.000 Volllaststunden sowie in Wüsten, in denen sich zumeist eine Kombination mit verschiedenen Formen der Solarenergienutzung anbietet. In Deutschland bietet die Windenergie kurz- bis mittelfristig das wirtschaftlichste Ausbaupotenzial unter den erneuerbaren Energien. Standorte mit gutem Winddargebot sind hier vor allem an den Küsten zu finden. Aber auch im Binnenland liefern standortoptimierte Anlagen attraktive Erträge, die erheblich zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele beitragen

können. Zusätzliches Potenzial bietet das „Repowering“, also der Ersatz alter durch leistungsstärkere neue Windenergieanlagen, ohne dabei neue Flächen in Anspruch zu nehmen. Bei der Errichtung von Windkraftanlagen gibt es in Deutschland traditionell zahlreiche auszuhandelnde Zielkonflikte mit Naturschutz und Landschaftsschutz. Zudem ist mit Einwänden und Vorbehalten der Gemeinden, Eigentümer und Anwohner vor Ort zu rechnen. Akzeptanzprobleme sollten bei Offshore-Anlagen grundsätzlich seltener auftreten, da mit Anlagen im Meer die (sichtbaren) Eingriffe in Landschaft und Umwelt minimiert werden können und die Eigentumsverhältnisse des Meeresbodens grundsätzlich besser definiert sind (zumindest innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone).

Eine Studie des UBA schätzt, dass sich in Deutschland theoretisch fast 14 Prozent der Fläche zur Windenergienutzung an Land (onshore) eignen. Damit könnte die installierte Windenergieleistung von 53 Gigawatt im Jahr 2019 theoretisch auf bis zu 930 Gigawatt ausgeweitet werden.<sup>204</sup> Allerdings liegt das realisierbare Potenzial sehr viel niedriger, da die Studie bei der Potenzialermittlung nur technische und ökologische Restriktionen berücksichtigt. Damit bleiben wesentliche Faktoren unbeachtet, bspw. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, besonderer Artenschutz, räumliche Entwicklungsziele oder Nutzungsansprüche Dritter (z. B. Flugsicherung, Militär). Zudem ist aufgrund mangelnder Akzeptanz mit Einwänden und Vorbehalten von Gemeinden, Grundstückseigentümern und Anwohnern vor Ort zu rechnen.<sup>205</sup>

#### Kosten

Die Kosten sind für Windkraftanlagen sowohl onshore als auch offshore innerhalb der letzten zehn Jahre um etwa die Hälfte gesunken. Zugleich ist die Effizienz der Anlagen gestiegen.<sup>206</sup> Entwicklungsfelder betreffen neben der Minimierung von Umweltauswirkungen insbesondere die Optimierung etablierter Technologien, etwa durch neue Werkstoffe, Anlagendesigns und intelligente Steuerungstechniken sowie Technologien zur Netzeinbindung. Bspw. müssen Flügelmaterialien einerseits den immer höheren Belastungen durch das Größenwachstum (hohe Flügelspitzenwindgeschwindigkeiten, Mikroturbulenzen, Schwingungsfragen etc.) standhalten und andererseits perspektivisch eine umweltgerechte Entsorgung bzw. ein Recycling ermöglichen. Die heutigen Hochleistungs-Verbundmaterialien weisen hier noch deutliche Verbesserungsnotwendigkeiten auf. Bei Offshore-Anlagen betreffen aktuelle Entwicklungen vor allem die Fundamentierung (schwimmend oder fixiert), Schwingungsverhalten, Korrosionsresistenz und Reduktion des Wartungsaufwands. Abgesehen von technologischen Fragen sind schnellere Genehmigungsverfahren und die Netzanbindung an die Stromverbrauchszentren in Mittel- und Süddeutschland eine zentrale Voraussetzung für den weiteren Ausbau der Windkraft.

<sup>204</sup> Unter Einbezug von Standorten, an denen weniger als 2.200 Volllaststunden erwartet werden, ergibt sich ein Potenzial von 1.200 Gigawatt installierbarer Leistung.

<sup>205</sup> UBA, 2013b.

<sup>206</sup> Bloomberg NEF, 2019.

#### 04.1.2 Solarenergie

Solarenergieanlagen nutzen die Sonnenenergie zur Erzeugung von Strom oder Wärme. Von Bedeutung sind insbesondere die Photovoltaik zur Umwandlung der Sonnenstrahlung in elektrische Energie sowie die Solarthermie zur Erzeugung von Wärme für Raumheizung und Warmwasser bzw. von Kälte (sowie zur Erzeugung von Strom, vor allem im Sonnengürtel der Erde). Gegenüber der Windenergie hat Solarenergie den entscheidenden Nachteil eines deutlich höheren Flächenverbrauchs. Zudem steht Sonnenenergie nur tagsüber zur Verfügung. Die Photovoltaik hat erhebliche Lernkurven durchlaufen und ist bezüglich der reinen Stromerzeugung mittlerweile gegenüber neuen konventionellen Kraftwerken konkurrenzfähig. Insgesamt wird die Nutzung von Solarenergie weniger kritisch gesehen als die Errichtung von Windparks. Eine besonders hohe Akzeptanz finden Photovoltaik- und Solarthermieanlagen auf Dächern sowie an Fassaden von Gebäuden und Lärmschutzwänden. Allerdings sind diese Flächen aufgrund ihrer Ausrichtung und Neigung sowie durch Beschattungen (bspw. durch Gebäude oder Bäume) zur solaren Nutzung oftmals ungeeignet. Freiflächenanlagen finden weniger Zustimmung,<sup>207</sup> haben aber den Vorteil, dass ihr Standort besser gewählt werden kann.

In Deutschland leistet Photovoltaik den zweitgrößten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Ihr Anteil betrug im Jahr 2019 etwa 19,5 Prozent. Damit trug die Solarenergie 2019 etwa zwölf Prozent zur gesamten Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern bei, davon entfielen zehn Prozentpunkte auf die Photovoltaik und zwei Prozentpunkte auf die Solarthermie.<sup>208</sup>

#### Photovoltaikanlagen

Das Kernelement von Photovoltaikanlagen bilden miteinander verschaltete Solarzellen, die aus einem Halbleitermaterial bestehen. Sehr vereinfacht (und nicht ganz korrekt) ausgedrückt setzt Licht (Photonen) Elektronen in der Solarzelle in Bewegung und erzeugt dadurch einen elektrischen Strom, der durch Metallkontakte an der Zelle abgeführt wird. Inzwischen existieren viele verschiedene Zelltypen, die sich hinsichtlich ihrer Dicke und des verwendeten Halbleitermaterials unterscheiden. Am weitesten verbreitet sind Solarzellen mit Silizium als Halbleitermaterial; sie werden in rund 90 Prozent der weltweit installierten Photovoltaikanlagen genutzt. Dies ist nicht zuletzt auf den deutlichen Preisrückgang zurückzuführen. Die Preise für mono- und polykristalline Solarzellen aus Silizium sind zwischen 2006 und 2016 um über 80 Prozent gefallen – bei gleichzeitig steigender Effizienz.<sup>209</sup> Die Siliziumzellen sind technologisch zwar weitgehend ausgereift, es sind aber weitere Entwicklungen und Optimierungen denkbar und möglich, etwa bezüglich des Verhältnisses von Wirkungsgrad, Ressourcenaufwand, Kosten, Langlebigkeit und spezifischen Energieverbräuchen bei der Fertigung.

Die nächsten Generationen von Photovoltaiktechnologien (z. B. Perowskit-Zellen, Farbstoffzellen, sonstige organische Materialien) werden sich erst allmählich im Markt entwickeln und diesen dann voraussichtlich auch für unterschiedliche Einsatzzwecke stärker ausdifferenzieren, als dies heute der Fall ist. Daher liegt der Schwerpunkt der technologischen Entwicklungen der kommenden Jahre – analog zur Windkraft – auf der Optimierung etablierter Technologien, etwa durch neue Werkstoffe, Anlagensignals und intelligente Steuerungstechniken sowie Technologien zur Netzeinbindung.

#### Solarthermie

Solarthermie bezeichnet verschiedene Verfahren zur thermischen Nutzung solarer Strahlung. Die Anwendungen reichen von einfachen Absorbermatten zur Erwärmung von Schwimmbadwasser über solare Trink-, Heiz- und Brauchwassererwärmung bis hin zu großen solarthermischen Kraftwerken, die in einem thermischen Kraftwerksprozess Strom erzeugen. Zudem kann Solarthermie zur Erzeugung von Kälte und von Prozesswärme eingesetzt werden. Bei fast allen Technologien erfolgt die Umwandlung der Sonnenstrahlung in Wärme durch Kollektoren, die entweder direkt wärmeabsorbierende Flächen mit einem Wärmeträgermedium aufweisen (z. B. Absorbermatten) oder die Sonnenstrahlen durch Spiegelsysteme auf bestimmte Punkte bzw. Flächen mit einem Wärmeträgermedium bündeln (z. B. für solarthermische Kraftwerke).<sup>210</sup> Die Techniken sind relativ unkompliziert und die Anwendungen weitgehend ausgereift.

Wie Photovoltaik hat auch Solarthermie einen relativ hohen Flächenbedarf und ist auf ähnliche Flächenqualitäten angewiesen. Daher besteht eine gewisse Konkurrenz zwischen den beiden Technologien, die zeitweise zugunsten der Photovoltaik entschieden wurde. Bei mehrstöckigen Gebäuden besteht oftmals ein Missverhältnis zwischen der für Solarthermie verfügbaren Dachfläche und der zu beheizenden Flächen oder der mit Warmwasser zu versorgenden Personenanzahl. Gegenüber der Photovoltaik weisen solarthermische Anlagen den Vorteil auf, bei Einbindung großer Wärmespeicher eine stetige und durchgängige Stromerzeugung gewährleisten zu können. Da die Technologie direkte Sonnenstrahlung konzentriert, ist sie vor allem im Wüstengürtel der Erde (bis etwa zur spanischen Region Extremadura) attraktiv. In Deutschland sind die Einstrahlungsbedingungen für die Nutzung dieser Technologie in großtechnischem Maßstab zur Stromerzeugung oder zur Erzeugung von Prozesswärme auf hohen Temperaturniveaus ungünstig.

#### 04.1.3 Wärmepumpen

Wärmepumpen ermöglichen es, Umweltwärme zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme, die v. a. dem Heizen (oder Kühlen) von Gebäuden dient, zu nutzen. Hierzu wird einer Wärmequelle mit niedrigem Temperaturniveau (z. B. Grundwasser, Umgebungsluft, Erdreich) thermische Energie entzogen und durch Verdichtung auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Zum Antrieb des Kompressors benötigt die Wärmepumpe Energie, zumeist in Form von Strom oder Gas. Durch die Einbindung von Umweltwärme erreicht die zum Betrieb der Wärmepumpe eingesetzte Energie hohe Nutzungsgrade. Gasbetriebene Wärmepumpen haben den Vorteil, dass zum Heizen zusätzlich die Abwärme des Gasmotors und seiner Abgase genutzt werden kann. Im Vergleich zu elektrischen Wärmepumpen ist dies zwar technisch komplexer und rentiert sich erst bei größeren Gebäuden, es ermöglicht aber einen höheren Gesamtnutzungsgrad, wodurch der Bedarf für ein zusätzliches Heizsystem für sehr kalte Tage reduziert wird. Hybridanlagen kombinieren herkömmliche Erdgas-Heiztechnik und Wärmepumpentechnik. Dabei kommt die meiste Wärme zumeist allerdings von der Gasflamme und nur ein kleinerer Teil (ca. 20–30 Prozent) wird über die Wärmepumpe bereitgestellt. Gegenüber der reinen Erdgas-Anlage entstehen deutliche Energie- und Treibhausgas-Einsparungen – sie fallen allerdings deutlich niedriger aus als bei der alleinigen Nutzung einer Wärmepumpe. Grundsätzlich können Wärmepumpen in jedem Gebäude eingebaut werden. In unsanierten Bestandsgebäuden mit Systemen mit hohen Vorlauftemperaturen (z. B. keine Fußbodenheizung) und hohem spezifischen Wärmeverbrauch ist ihr Einsatz aufgrund der dort notwendigen hohen Betriebstemperaturen jedoch kaum sinnvoll und zudem relativ teuer, da dann die Energiedichte der Wärmequelle nicht gut mit der Energiedichte der Nachfrage korrespondiert.

#### Koppelung mit Solarthermieanlagen

Zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme nutzen Wärmepumpen in der Regel die Umgebungsluft, das Erdreich oder das Grundwasser. Bei der Koppelung mit Solarthermieanlagen stellt diese entweder die Wärmequelle bereit (direkte Einbindung) oder wird zur Regeneration der Wärmequelle (z. B. Erdboden) genutzt (indirekte Einbindung). Die indirekte Einbindung hat neben der Regeneration den Vorteil, dass die Wärmepumpe in der Regel kleiner dimensioniert werden kann und ihre Anschaffungs- und Betriebskosten dadurch reduziert werden. Die direkte Einbindung hat den Vorteil, dass die Effizienz der beiden Einzelsysteme erhöht wird. Bspw. kann Solarthermie durch die Kopplung mit einer Wärmepumpe auch bei geringer Sonneneinstrahlung, z. B. im Winter, noch länger ausreichend Wärme zur Deckung des Heizwärmebedarfs produzieren, als dies ohne gekoppeltes Wärmepumpensystem der Fall wäre.

207 SFV, 2003.

208 UBA, 2020a, 2020b.

209 Bundesverband Solarwirtschaft, 2016.

210 Thermikkraftwerke und Solarteichkraftwerke funktionieren etwas anders.

#### 04.1.4 Bioenergie

Bioenergie beschreibt unterschiedliche Energieträger, die mit verschiedensten Anlagentechnologien zur Umwandlung von Biomasse in elektrische Energie, Wärme oder Kraftstoffe hergestellt wurden (eigentlich bezeichnet der Begriff die Energieträger, gelegentlich werden damit auch verkürzt die Anlagentechnologien bezeichnet). Bei größeren Anlagen ist eine gleichzeitige Gewinnung von Strom und Wärme durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Biomasseheizkraftwerken (BMHKW) üblich. Hier gibt es sowohl Anlagen, die feste Brennstoffe verarbeiten, als auch solche, die Biogas als Energieträger verwenden. Kleinere Anlagen, die vorzugsweise am Ort des Verbrauchs (z. B. Wohnhaus, Unternehmen) betrieben werden, dienen zumeist der Produktion von Wärme. Häufig sind dies Holzheizungen, die v. a. mit Pellets oder Hackschnitzeln betrieben werden. Es existieren jedoch auch kleine – vor allem mit Biogas betriebene – KWK-Anlagen, die auch Strom erzeugen. Aufgrund unterschiedlicher Technologien und Dimensionierungen können Anlagen zur Nutzung von Biomasse einzelne Häuser, über Fern- und Nahwärmenetze aber auch ganze Stadtviertel mit Strom bzw. Wärme versorgen. Allerdings fehlen vielerorts die erforderlichen Wärmeverteilnetze. Diese bieten sich insbesondere für verdichtete urbane Gebiete an. In weniger dicht besiedelten Regionen ist der Aufbau von Wärmeverteilnetzen grundsätzlich mit hohen spezifischen Infrastrukturkosten und höheren Wärmeverlusten verbunden. Neben der Versorgung von Wohnhäusern kann Biomasse auch zur Erzeugung von Prozesswärme im Gewerbe und in der Industrie genutzt werden.

Als energetisch nutzbare Bioenergieträger dient neben biogenen Festbrennstoffen (z. B. Scheitholz, Holzpellets, Holzhackschnitzel) v. a. Biogas (produziert z. B. aus Energiepflanzen, Gülle, biogenen Abfällen oder Klärschlamm). Biomasse als materieller (Primär-)Energieträger muss geerntet, verarbeitet und transportiert werden und bringt entsprechende Kosten mit sich. Damit unterscheidet sich Bioenergie deutlich von den anderen erneuerbaren Energien wie bspw. Solar- oder Windenergie, bei denen der primäre Energieträger Sonne oder Wind „kostenlos“ anfällt und die Kosten der produzierten Energie durch die Anlageninvestition dominiert werden. Zur energetischen Nutzung von Biomasse sowie der Veredelung von Rohbiomassen zu höherwertigen Energieträgern werden verschiedene Verfahren und Technologien eingesetzt (z. B. Verkohlung, Vergasung, Pyrolyse, anaerober Abbau). Bei fast allen Konversionswegen findet eine anschließende Verbrennung der Umwandlungsprodukte statt. Dabei wird zwar CO<sub>2</sub> freigesetzt, dies gilt aber aufgrund des biogenen Ursprungs als klimaneutral. Grundsätzlich ist aber dabei zu beachten, dass nur solche Biomassen energetisch genutzt werden, die nachhaltig angebaut wurden, d. h., dass beim Flächenbedarf Flächenkonkurrenz zu anderen Nutzungsformen (z. B. Nahrungs- und Futtermittelproduktion oder auch biobasierte Kunststoffe oder Chemikalien) sowie zur Aufrechterhaltung der Funktionen des Ökosystems

berücksichtigt und ausgeschlossen werden. Darüber hinaus ist die Biomasse nur so lange klimaneutral, wie die Kohlenstoffbilanz einigermaßen ausgeglichen ist, d. h. geerntete Biomasse auch wieder durch entsprechende Flächenbewirtschaftung nachwächst. In Entwicklungsländern ist energetische Biomassenutzung häufig nicht nachhaltig, da mehr entnommen wird als nachwächst, da die entsprechenden Flächen nicht wieder angepflanzt werden. Zudem kann die Umwandlung bestimmter ökologischer Flächen, insbesondere von bedeutenden Kohlenstoffsenken wie von (Regen-)Wäldern und Mooren in Ackerland, große Mengen an CO<sub>2</sub> freisetzen und die Albedo der betroffenen Flächen verändern.<sup>211</sup> In Deutschland ist dieses Problem mit entsprechenden „Greening“-Vorgaben adressiert. Bei importierten Biomassen lassen sich solche Voraussetzungen, wie auch die Anforderungen an die Nachhaltigkeit, nicht immer nachvollziehen, auch wenn entsprechende Label existieren.

#### Probleme

Weitere Probleme im Zusammenhang mit dem Biomasseanbau betreffen mögliche Klima- und Umweltbelastungen infolge intensiver Landwirtschaft (z. B. durch Monokulturen, Pestizid- und Düngemittelsatz). Insgesamt liegt die Flächeneffizienz, also der Energieertrag pro (Anbau-)Fläche, bei der Nutzung von Biomasse unter 0,5 Watt pro Quadratmeter und ist damit geringer als bspw. bei Wind- oder Solarenergie.<sup>212</sup> Aufgrund des hohen Flächenbedarfs ist der Einsatz von Anbaubiomasse zur Energieversorgung schon allein rein rechnerisch stark begrenzt. Biomasse aus anderen Quellen, bspw. Gülle, Grünschnitt oder biogene Abfälle, muss zwar nicht angebaut werden, ihr Potenzial ist aufgrund des relativ geringen Aufkommens jedoch klein und wird in Deutschland bereits zum Großteil ausgeschöpft.<sup>213</sup> Zudem entstehen sowohl bei Anbaubiomasse als auch bei Biomasse aus anderen Quellen meist Treibhausgas-Emissionen durch Transport und Umwandlung, im Falle von Anbaubiomasse zusätzlich durch Anbau und Ernte. In Deutschland leistet Bioenergie derzeit einen großen Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Ihr Anteil betrug im Jahr 2019 mehr als 20 Prozent, wobei Biogas zwölf Prozent, feste Biomasse 4,3 Prozent und der biogene Anteil des Abfalls 2,4 Prozent ausmachten. Bioenergie wird außer zur Stromerzeugung auch für die Bereitstellung von Wärme und zur Herstellung von Kraftstoffen genutzt. Insgesamt trug Bioenergie 2019 mehr als 50 Prozent zur gesamten Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern bei (34 Prozent Wärmeherzeugung, elf Prozent Stromerzeugung und sieben Prozent Herstellung von Biokraftstoffen).<sup>214</sup> Bei einer Betrachtung künftiger Entwicklungen, insbesondere wenn perspektivisch Klimaneutralität angestrebt wird, werden zunehmend detaillierte Analysen zum Zusammenspiel der einzelnen Fraktionen, der Umwandlungsmethoden sowie der Einsatzzwecke durchgeführt, um die begrenzten Potenziale optimal und systemdienlich zu nutzen.

<sup>211</sup> Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG und die entsprechenden Verordnungen in Deutschland legen fest, dass bestimmte Gebiete wie bspw. Primärwälder, Torfmoore, Feuchtgebiete, Grünland mit hoher biologischer Vielfalt für den Biomasseanbau ausscheiden. Allerdings kann es zu Verdrängungseffekten (Indirect Land Use Change, ILUC) kommen, bei dem durch die Ausweitung des Biomasseanbaus die vorangegangene Produktion (z. B. von Nahrungsmitteln) auf bislang ungenutzte Flächen verdrängt wird.

<sup>212</sup> Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2013.

<sup>213</sup> Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2015.

<sup>214</sup> UBA, 2020a, 2020b.

#### 04.1.5 Geothermie

Bei der Nutzung der in der Erdkruste gespeicherten Wärmeenergie wird zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie unterschieden. Die oberflächennahe Geothermie nutzt in der Regel Erdschichten von bis zu 400 Metern Tiefe für die Versorgung von Gebäuden mit Wärme (oder Kälte). Da in diesen Schichten in der Regel Temperaturen zwischen etwa zehn und höchstens 25 Grad C herrschen, muss die Wärme mittels Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden (zu Wärmepumpen siehe Teil III Kapitel 04.1.3). Die Tiefengeothermie nutzt im Wesentlichen die deutlich höheren Temperaturen in geeigneten Erdschichten von rund 2.000 bis 4.000 Meter (in selteneren Fällen bis zu 7.000 Meter) Tiefe für die Nah- bzw. Fernwärmeversorgung, gelegentlich auch ergänzend zur Stromerzeugung, wobei die Wärmeherzeugung zumeist einen deutlich höheren Anteil hat. Bei Gewinnung der geothermischen Energie können hydrothermale und petrothermale Verfahren zur Anwendung kommen. Bei hydrothermaler Geothermie wird durch entsprechend tiefe Bohrungen heißes Wasser aus Aquiferen (Grundwasserleiter) gefördert und nach der Zirkulation in einem Wärmetauscher in abgekühltem Zustand wieder zurückgepumpt. Bei der petrothermalen Geothermie wird kaltes Wasser unter hohem Druck in heißes Tiefengestein gepresst und nach Erwärmung wieder zurück an die Oberfläche gefördert, wo es in einem Wärmetauscher zirkuliert. Geothermie bietet vor allem Potenziale für die Wärmeversorgung in Verbindung mit Nah- und Fernwärmenetzen.

An Geothermiestandorten mit ausreichend hohem Temperaturniveau und ausreichender Ergiebigkeit kann die Tiefengeothermie ohne Rückgriff auf Speichermedien kontinuierlich Strom liefern. Damit kann sie einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz und zur Versorgungssicherheit des Stromsystems leisten. Wird die bei der geothermischen Stromerzeugung anfallende Wärme genutzt, fällt die Klimabilanz infolge des erhöhten Gesamtnutzungsgrads noch günstiger aus.<sup>215</sup>

#### Technologie

Die Technologien zur geothermischen Stromerzeugung befinden sich in weiten Teilen noch in einem frühen Entwicklungsstadium – insbesondere hinsichtlich der Nutzung der petrothermalen Ressourcen. Zwar ist die Bohrtechnik weitgehend ausgereift, doch bestehen bei der Kraftwerkstechnik noch Optimierungspotenziale und Entwicklungsnotwendigkeiten, bspw. bei der Stimulationstechnik zur Steigerung der Ergiebigkeit der Wärmereservoirs. Zudem ist die geothermische Stromerzeugung mit den heute verfügbaren Technologien deutlich teurer als mit fossilen oder den meisten anderen erneuerbaren Energieträgern. Die technologischen Entwicklungen lassen aber Kostenreduktionen erwarten. Ein zentrales Hemmnis für die wirtschaftliche Erschließung und Nutzung geothermischer Ressourcen ist die (geringe) Erfolgswahrscheinlichkeit der Erreichung der Mindestfließrate und Mindesttemperatur. Um das damit verbundene Fündigkeits- bzw. Investitionsrisiko zu mindern, ist eine bessere Datenlage erforderlich (u. a. Kartierung von Untergrundtemperaturen und hydraulischen Eigenschaften, Erstellung tektonischer Atlanten).

Fast die gesamte Fläche Deutschlands ist grundsätzlich zur Nutzung oberflächennaher Geothermie geeignet, bei der Tiefengeothermie sind es nur bestimmte Regionen. Dennoch beträgt das technische Gesamtpotenzial zur geothermischen Stromerzeugung in Deutschland ein Vielfaches des deutschen Nieder- und Mitteltemperaturwärmebedarfs, aber auch des Strombedarfs. Der Großteil der geothermischen Ressourcen Deutschlands ist in den petrothermalen Ressourcen gespeichert, deren Nutzung hier noch im Versuchs- und Erprobungsstadium sind. Weiter fortgeschritten ist die Nutzung der hydrothermalen Reservoire, die sich vor allem in den oberrheinischen und norddeutschen Tiefen sowie im süddeutschen Molassebecken befinden.<sup>216</sup> In Bayern sind über 22 Anlagen (Stand Juli 2019) zur hydrothermalen Wärmeversorgung und/oder Stromerzeugung in Betrieb bzw. in Probebetrieb, v. a. im Molassebecken.<sup>217</sup> Insgesamt hatte die Geothermie in 2019 einen Anteil von 0,1 Prozent an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland. Der Anteil der Geothermie an der gesamten Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern im Jahr 2019 lag unter 0,05 Prozent.<sup>218</sup>

<sup>215</sup> TAB, 2003.

<sup>216</sup> TAB, 2003.

<sup>217</sup> Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2018.

<sup>218</sup> UBA, 2020a, 2020b.

#### 04.1.6 Wasserkraft

Wasserkraft zählt global zu den am intensivsten genutzten erneuerbaren Energien;<sup>219</sup> die entsprechenden Anlagen sind technisch ausgereift. In Deutschland werden die Potenziale zur Stromerzeugung aus Wasserkraft zu rund 80 Prozent genutzt und sind damit weitgehend ausgeschöpft. Das verbleibende Potenzial besteht im Wesentlichen in der Optimierung, Modernisierung und Reaktivierung bestehender Anlagen. Allerdings dürfte der Klimawandel die Ertragssituation der Wasserkraft zukünftig verändern, langfristig auch vermindern, u. a. aufgrund des Abschmelzens der Gletscher. Insbesondere in der Schweiz mit ihrem hohen Anteil der Wasserkraft an der Stromerzeugung wurden hierzu detaillierte Studien über die künftige Entwicklung der Einzugs- und Abflussregimes durchgeführt.<sup>220</sup> Mit der Vergrößerung des Anteils der Niederschläge, die im Herbst und Winter als Regen statt als Schnee niedergehen, entfällt die Speicherwirkung des Schnees, wodurch sich die Abflussmuster in alpinen Regionen allmählich um bis zu mehrere Wochen nach vorn verschieben. Die höheren Sommertemperaturen erhöhen die Verdunstung, sodass geringfügig weniger Wasser in den Laufwasserkraftwerken zur Verfügung steht. In der Schweiz haben sich mehrere Dürrejahre hintereinander signifikant auf die Füllstände der großen Speicherseen ausgewirkt, sodass die Fahrweise der Wasserkraftwerke verändert werden musste. Günstige Bedingungen zur Nutzung von Wasserkraft finden sich in den abfluss- und gefällereichen Regionen Bayerns und Baden-Württembergs, in denen über 80 Prozent des deutschen Wasserkraftstroms erzeugt werden. Der Anteil der Wasserkraft an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien betrug in Deutschland im Jahr 2019 etwa 8,3 Prozent. Zur gesamten Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern trug die Wasserkraft 2019 mit etwa vier Prozent bei.<sup>221</sup> In Bayern als dem einzigen Bundesland mit Hochgebirgsanteil ist der Anteil der Wasserkraft an der Deckung des Bruttostromverbrauchs mit 13 Prozent (2018) signifikant höher als im Bundesdurchschnitt.

### 04.2 Technologien zur Minderung des Energiebedarfs und der Emissionen

Neben den Technologien zur klimafreundlichen Bereitstellung von Energie sind auch Technologien zur Minderung des Energiebedarfs eine notwendige Voraussetzung, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Denn nur bei verringertem Energieverbrauch wird mittel- bis langfristig eine treibhausgasneutrale Energieversorgung möglich sein. Die Technologien zur Minderung des Energiebedarfs umfassen zum einen Effizienztechnologien und zum anderen Technologien zur Direktnutzung von erneuerbarem Strom in Bereichen, die zuvor primär auf fossile Energieträger angewiesen waren. In Teilbereichen können sich Effizienztechnologien, Technologien der Nutzung erneuerbarer Energien und Suffizienz-Maßnahmen im Bereich Verhaltens- und Konsumentscheidungen (Teil III Kapitel 02) überschneiden bzw. ist ihre Kombination für eine klimaschonende Wirkung der Maßnahmen oftmals erforderlich.

#### 04.2.1 Gebäude

Gebäude verursachten in Deutschland 2018 etwa 33 Prozent des Endenergieverbrauchs, davon rund 78 Prozent für Raumwärme und 15 Prozent für Warmwasser.<sup>222</sup> Damit waren Gebäude 2018 für etwa 30 Prozent der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich.<sup>223</sup> Effizienztechnologien zur Reduktion des Wärme- bzw. Kältebedarfs von Gebäuden sind im Großen und Ganzen bereits ausgereift. Sie umfassen insbesondere Dämmmaterialien, mit denen der Wärmeverlust durch Fassaden, Dächer und Keller erheblich (um bis zu 80 Prozent) gesenkt werden kann. Dämmstoffe bestehen in der Regel aus porösen Kunststoffen wie Styropor, Polystyrol oder auch aus Mineralwolle. Diese sind günstig in der Herstellung, haben eine hohe Dämmwirkung und können inzwischen gut entsorgt und recycelt werden. In vielen Fällen stehen gegenwärtig noch Kostengründe einem umfassenden Recycling entgegen.

<sup>219</sup> Agentur für Erneuerbare Energien, 2010; UBA, 2019e.

<sup>220</sup> Siehe Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie und Hydrologische Kommission (2011) als Überblick, sowie die dort genannte weiterführende Literatur.

<sup>221</sup> UBA, 2020a, 2020b. UBA, 2020c.

<sup>222</sup> UBA, 2020c.

<sup>223</sup> UBA, 2019g.

Zunehmende Bedeutung erlangen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (v. a. aus Fasern aus Holz, Flachs und Stroh sowie Papierresten). Diese sind jedoch noch mit höheren Kosten in der Herstellung und damit auch für den Kunden verbunden. Zudem können hocheffiziente Fenster einen bedeutenden Beitrag zur Reduktion der Wärmeverluste von Gebäuden leisten. Hierzu dienen v. a. bessere Rahmen, Doppel- und Dreifachverglasungen sowie wärmedämmende Gase zwischen den Scheiben und spezifische Beschichtungen. In neueren Gebäuden sind hocheffiziente Fenster heute bereits Standard; im Bestand gibt es noch große Potenziale mit Einsparungen von bis zu 50 Prozent der Wärmeverluste durch die Fenster bei hoher Wirtschaftlichkeit des Einsatzes.

Neben der Dämmung können Gebäude mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgestattet werden. Eine weitere mögliche und teilweise systemdienliche Option ist das Kühlen mithilfe von Kältemaschinen (Adsorptions- und Absorptionskälteanlagen, elektrische Kälteanlagen) in Kombination mit Solarenergie. Die Kombination bietet den Vorteil, dass heiße Tage mit hohem Kühl- und Energiebedarf grundsätzlich mit einer großen Strom- und Wärmeerzeugung vor allem aus Photovoltaik und Solarthermie einhergehen, die für Kühlzwecke genutzt werden kann.

Allerdings lässt sich der Wärme- bzw. Kältebedarf von Gebäuden nicht beliebig reduzieren; ein gewisser Teil der Wärme bzw. Kälte wird immer durch die Gebäudehülle nach außen dringen. Neben diesen nicht reduzierbaren Bedarfen können die reduzierbaren Bedarfe bei einem Teil des Gebäudebestandes aufgrund von Denkmalschutz oder anderen baulichen Restriktionen (z. B. Fachwerk, unzugängliche Wände und Keller) nicht oder nur teilweise realisiert werden. Dieser Teil entspricht etwa zehn Prozent des Endenergieverbrauchs für Raumwärme.<sup>224</sup> Dennoch kann durch energetische Sanierungen im Gebäudesektor der Endenergiebedarf auf bis zu 60 Prozent des aktuellen Niveaus reduziert werden.<sup>225</sup>

#### Beleuchtungstechnik

Weitere Möglichkeiten zur Minderung des Energieverbrauchs von Gebäuden liegen in Technologien zur Reduktion des spezifischen Strombedarfs bestimmter Anwendungen im Gebäudesektor. Diese sind hinsichtlich des möglichen Energieeinsparpotenzials gegenüber den Effizienztechnologien zur Reduktion des Wärme- bzw. Kältebedarfs zwar von untergeordneter Bedeutung. Gleichwohl kann bspw. der Stromverbrauch von herkömmlichen Glühbirnen durch den Ersatz durch effizientere Beleuchtungstechnik in der Regel um bis zu 80 Prozent reduziert werden. Hierzu eignen sich insbesondere Leuchtdioden (LED).<sup>226</sup>

<sup>224</sup> Prognos, IWU und ifeu, 2015.

<sup>225</sup> Fraunhofer, 2020.

<sup>226</sup> Nach EG-Verordnung 244/2009 dürfen alle Leuchtmittel als „Energiesparlampe“ bezeichnet werden, wenn sie bestimmte Wirkungsgradanforderungen erfüllen. Die Anforderung entspricht einer Minderung der Elektroleistung (Watt) um mindestens 70 Prozent gegenüber herkömmlichen Leuchtmitteln. Dieser Wert wird praktisch nur von LED-Lampen erreicht (UBA, 2014).

<sup>227</sup> Beste, 2019.

Während LEDs aus anorganischen Halbleitermaterialien eine zunehmend breite Verwendung finden, sind LEDs aus organischen Halbleitermaterialien (OLED) erst seit Kurzem am Markt verfügbar. Im Vergleich zu herkömmlichen (anorganischen) Leuchtdioden, die aufgrund ihrer geringen Leuchtfläche als Punktlichtquelle fungieren, leuchtet bei OLEDs die gesamte Fläche gleichmäßig und blendfrei. Damit eignen sich OLEDs sowohl als Anzeigetechnik in (biegsamen) Bildschirmen als auch zur Raumbelichtung. Entwicklungsbedarf besteht u. a. noch hinsichtlich der Lebensdauer und Lichtausbeute von OLEDs. Durch den Einsatz neuerer Materialien und Verkapselungstechnologien werden anorganische und organische LEDs zukünftig ohne kritische Metalle (z. B. bestimmte Seltene Erden) auskommen. Damit können Risiken hinsichtlich Verfügbarkeit, Rohstoffpreisen, Entsorgung und Umweltauswirkungen reduziert werden.<sup>227</sup>

#### Smart Home

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, mit bestimmten Anwendungen aus dem Bereich Smart Home den Energieverbrauch von Gebäuden zu reduzieren. Dies betrifft bspw. die anwesenheitsorientierte Steuerung von Beleuchtung und Raumwärme oder die flexible Steuerung bestimmter Verbrauchsgüter (z. B. Waschmaschine, Geschirrspüler und Trockner) in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien. Für die intelligente Verbrauchssteuerung sind grundsätzlich flexible Stromtarife und intelligente Stromzähler (Smart Meter) in den Gebäuden nötig. Das mögliche Einsparungspotenzial hängt neben dem individuellen Nutzungsverhalten u. a. von der Bausubstanz und der Gebäudegröße ab. Wichtig ist, dass die Nutzer die Smart-Home-Anwendung optimal auf ihre Gegebenheiten konfigurieren, anderenfalls kann der Energieverbrauch durch die Anwendungen auch steigen, da die Geräte ja ständig Stand-by sein müssen. Von besonderer Bedeutung sind Smart-Home-Anwendungen bei modernen Passiv-, Nullenergie- oder Plusenergiehäusern, die sich ohne intelligente Steuerungstechniken bei Energieverbrauch und -produktion kaum sinnvoll betreiben lassen.

#### Bauliche Vorkehrungen

Auch bauliche Vorkehrungen, wie bspw. Mauervorsprünge zum Sonnenschutz, können zur Reduktion des Wärme- bzw. Kältebedarfs beitragen; diese betreffen jedoch eher die Architektur und sind nicht direkt mit Effizienztechnologien verbunden. Ferner entstehen durch die Errichtung von Gebäuden Treibhausgas-Emissionen in vielen anderen Sektoren, die dort zu adressieren sind und bilanziert werden, insbesondere in der Industrie (z. B. durch die Produktion von Baustoffen, insbesondere von Zement als Grundlage für Beton) und im Verkehr (z. B. durch Transporte von Baustoffen).

#### 04.2.2 Industrie

Im Industriesektor wurden 2018 in Deutschland knapp 30 Prozent der Endenergie verbraucht, davon etwa zwei Drittel für Prozesswärme und ein Viertel für mechanische Energie (z. B. zum Betrieb von Motoren und Maschinen).<sup>228</sup> Damit trug die Industrie 2018 etwa 18 Prozent zu den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.<sup>229</sup> Hinzu kommen industrielle Prozessemissionen, die 2017 für rund sieben Prozent der gesamten Treibhausgas-Emissionen in Deutschland verantwortlich waren.<sup>230</sup> Die Erzeugung bzw. Herstellung von metallischen (u. a. Eisen, Stahl, Aluminium), mineralischen (u. a. Zement, Kalk, Glas) und chemischen Grundprodukten (u. a. Ammoniak, Adipin- und Salpetersäure) macht rund 70 Prozent der gesamten industriellen Prozessemissionen in Deutschland aus.<sup>231</sup>

#### Effizienztechnologien

In der Industrie bestehen viele Optionen, um die Treibhausgas-Emissionen durch den Einsatz von Effizienztechnologien zu reduzieren. Dies betrifft vor allem Querschnittstechnologien im Bereich der Drucklufterzeugung und -nutzung sowie der Wärme- und Kälteversorgung, die die Basis für die meisten Produktions- und Verarbeitungsprozesse darstellen. Beispiele reichen von einer intelligenten Verknüpfung von Abwärme mit Wärmebedarfen über effizientere Energiebereitstellung bis hin zur Beseitigung bestehender Verluste (bspw. bei der Druckluftverteilung) und zum Einsatz effizienterer Maschinen (z. B. Motoren, Pumpen, Kompressoren). Die zugrunde liegenden Technologien sind bereits am Markt und haben sich in der Praxis bewährt. Gleichwohl sind die Einsparpotenziale bei vielen Unternehmen – aufgrund von Beharrungskräften und der oft untergeordneten Bedeutung von Energiekosten – noch nicht ausgeschöpft. Schätzungen gehen z. B. von möglichen Einsparungen von 44 Mrd. kWh Strom durch effizientere Pumpen, Lüftungs- und Druckluftsysteme aus.<sup>232</sup>

Weitergehende Effizienzpotenziale können mit weiterer Technologieentwicklung erschlossen werden, z. B. mit dem Einsatz reibungsarmer Materialien oder supraleitender Materialien in hocheffizienten Motoren. Diese Entwicklungen vollziehen sich häufig „unter dem Radar“, sind im Einzelnen kaum zu quantifizieren, tragen aber zum stetigen Trend des verringerten Energieeinsatzes je Wertschöpfungseinheit bei.

#### Prozessemissionen

Prozessemissionen können in der Industrie durch neue Technologien direkt verringert werden. Hohe Prozessemissionen (und hoher Energieverbrauch) entstehen insbesondere bei der Erzeugung von Stahl und Zement, der v. a. im Bau als Grundlage zur Betonherstellung genutzt wird. Eine vielversprechende Möglichkeit zur kohlenstofffreien bzw. -ärmeren Stahlherstellung ist der Einsatz von Wasserstoff statt Kohle (Koks) im Hochofen. In der Zementindustrie bie-

ten sich neben der Substitution fossiler Brennstoffe und der Steigerung der Energieeffizienz insbesondere die Verwendung alternativer Rohstoffe in der Zementherstellung (v. a. in der Klinkerproduktion) sowie als Zuschlagstoffe bei der Zementmahlung an. Der Einsatz von Zement und Stahl kann zudem durch alternative Baustoffe reduziert werden. Bspw. sind moderne Verbundwerkstoffe auf der Basis von Holz bereits erprobt, allerdings aktuell aus Kostengründen noch wenig verbreitet. In der Chemieindustrie entstehen Emissionen vor allem durch den Einsatz von fossilen Brennstoffen bei der Prozesswärmebereitstellung. Bei der Verarbeitung fossiler Rohstoffe zum stofflichen Einsatz von Kohlenstoff, der praktisch nicht zu ersetzen ist, werden Prozessemissionen verursacht. Zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen kann hier – wie auch bei anderen Prozessemissionen – auf Technologien zur Abscheidung und Nutzung bzw. Speicherung von CO<sub>2</sub> zurückgegriffen werden (Teil III Kapitel 04.3). In einzelnen Prozessen, z. B. in der Methanolherstellung, können Prozessschritte CO<sub>2</sub>-ärmer gestaltet werden, z. B. durch den Einsatz von Wasserstoff, der mit erneuerbaren Energien produziert wurde, anstatt durch Dampfpreformierung aus Erdgas. Herausfordernd sind hierbei derzeit noch die im Vergleich hohen Kosten.

#### Digitalisierung

Die Digitalisierung eröffnet, insbesondere im Rahmen von „Wirtschaft 4.0“, neue Möglichkeiten zur Energieeinsparung durch die Vernetzung von Produktionsanlagen und die Neuorganisation von industriellen Zusammenhängen. Dies kann u. a. zu ökonomisch effektiveren Prozessen beitragen, z. B. durch weniger Ausschuss, Lagerung und Transporte, sowie gleichzeitig die Ressourcen- und Energieeffizienz steigern. Kasten 20 zeigt, welche Veränderungen der Beschäftigung auf Branchenebene durch den Übergang zu einer Wirtschaft 4.0 zu erwarten sind.

#### Additive Fertigungsverfahren

Die zunehmende Verbreitung additiver Fertigungsverfahren (3D-Druck) kann Klimaschutz begünstigen. Eine positive Wirkung wird bspw. in der Kreislaufwirtschaft erwartet, wenn künftig alle möglichen Ersatzteile mithilfe von 3D-Druckern (ohne weitere Produktionsanlagen) hergestellt und damit Produkte im Prinzip immer wieder repariert werden können, wodurch sich die Lebensdauer deutlich erhöht. Zudem kann 3D-Druck Industrieprozesse aufgrund passgenauer Fertigung effizienter, vor allem ressourceneffizienter, durch weniger Ausschuss und Abfall machen. Auch die angehängten Logistik- und Organisationsprozesse können damit verschlankt werden, was zu Einsparungen im Güterverkehr führt. Darüber hinaus ist der 3D-Druck ein wichtiges Verfahren, um Teile wichtiger Klimaschutztechnologien anforderungsgerecht, effizient und kostengünstig zu produzieren.

#### Kasten 20

#### Wirtschaft 4.0 / Digitalisierung

Der Übergang zu einer „Wirtschaft 4.0“ bedingt umfangreiche Umgestaltungen der Volkswirtschaft. Beispielhaft ist dies in den Wirkungen auf den Arbeitsmarkt in Wolter et al. (2019) betrachtet worden. Die Umgestaltungen betreffen im Wesentlichen drei Aspekte: eine Veränderung des Kapitalstocks, eine Veränderung der Produktionsweisen und eine Adaption des Nachfrageverhaltens, insbesondere privater Haushalte, aber auch des Auslands. Damit die getroffenen Annahmen zueinander konsistent sind, wird unterstellt, dass Unternehmen nur dann die neuen Möglichkeiten der „vierten industriellen Revolution“ (Wolter et al. 2016) nutzen, wenn sie einen Vorteil im Sinne einer positiven Renditeaussicht haben.

#### Kapitalstock

Zu den Annahmen: Die Veränderung des Kapitalstock bezieht sich auf die Infrastruktur („Schnelles Internet“) und auf die Umrüstung des bestehenden Bestands an Produktionsanlagen auf neue Sensorik. Gleichzeitig wird eine an sich höhere Investitionsneigung unterstellt, die den Übergang zu einer „Wirtschaft 4.0“ begleitet.

#### Produktionsweisen

Die Umgestaltung der Produktionsweisen führt zu verändertem Material- und Energieeinsatz, einer intensivierten Weiterbildung der Beschäftigten und einem verstärkten Einsatz von Beratungsleistungen für den Übergang. Wesentlich ist der gesteigerte Einsatz von Dienstleistungen der Branche „Information und Kommunikation“ zur Erhöhung des Digitalisierungsgrades. Zudem werden berufsspezifische „Ersetzungspotenziale“ berücksichtigt, die zu steigenden Branchendurchschnittslöhnen und höherer Arbeitsproduktivität führen.

#### Nachfrageverhalten

Die Veränderungen des Nachfrageverhaltens privater Haushalte beinhaltet eine steigende Konsumneigung bezogen auf ausgewählte Güter und Dienstleistungen. Leitbild der Verhaltensanpassungen sind die neuen Möglichkeiten der individualisierten Produkte und Leistungen sowie der Erwerb der dafür notwendigen Endgeräte. Unterstellt wird zudem, dass es dem verarbeitenden Gewerbe gelingt, den Vorsprung bei der Sensorik oder neuer Produktionsmöglichkeiten zu halten, und dass die Nachfrage auch in den übrigen Teilen der Welt im Zuge des Übergangs zu einer Wirtschaft 4.0 steigt.

Abbildung 50 zeigt die Veränderungen auf der Branchenebene für die Anzahl der Erwerbstätigen in 1.000 Personen, die sich durch den Übergang zu einer Wirtschaft 4.0 ergeben. Das verarbeitende Gewerbe zeigt leichte Arbeitsplatzverluste. Im Dienstleistungsbereich sind vor allem Verkehr, Lagerei, Handel, sonstige Unternehmensdienstleistungen, das Gesundheits- und Sozialwesen und das Gastgewerbe betroffen. Eindeutige Zuwächse zeigen sich in der Branchen Information und Kommunikation.

Zwar nimmt insgesamt die Zahl der Arbeitsplätze bis 2035 im Zuge des Übergangs zu einer Wirtschaft 4.0 zu. Der Verlust an Arbeitsplätzen (-350 Tsd.) und der Zugewinn (+211 Tsd.) zeigen aber, dass bereits bei einer Betrachtung auf Branchenebene viele Arbeitskräfte und Betriebe sich auf neue Bedingungen werden einstellen müssen.

228 UBA, 2020d.

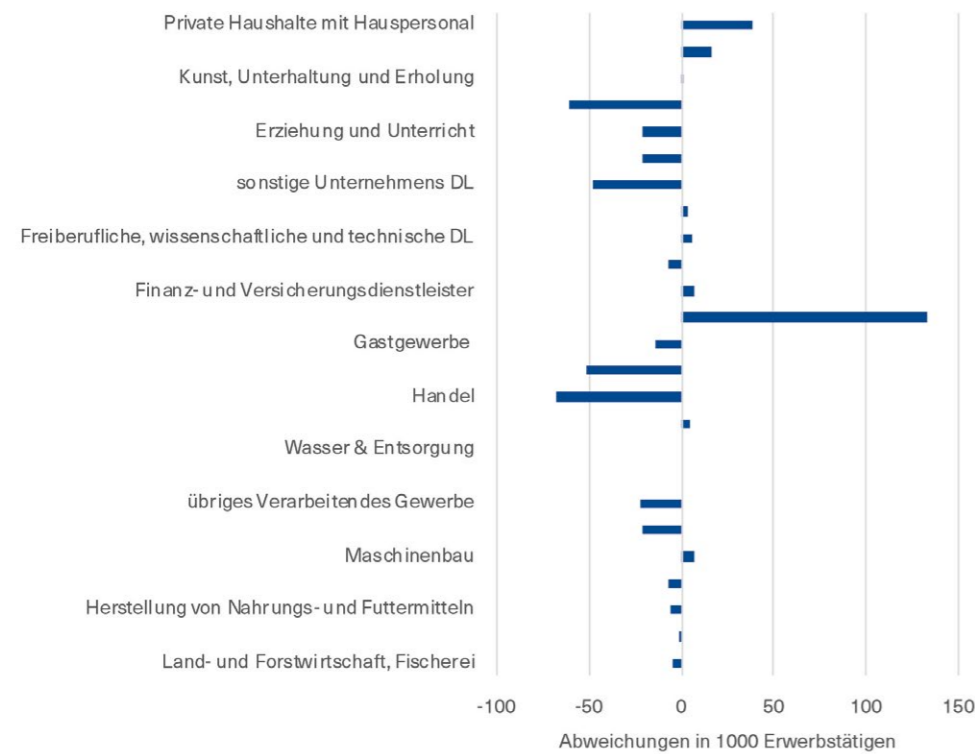
229 UBA, 2020e.

230 UBA, 2019h.

231 IREES, 2018.

232 ifeu, 2011.

Abbildung 50  
**Wirkung des Übergangs zu einer Wirtschaft 4.0 auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Branchen für das Jahr 2035 – Abweichungen zu einer Situation ohne Übergang**



Quelle: QuBe-Projekt (Wolter et al. 2019)

#### 04.2.3 Verkehr

Knapp 30 Prozent der Endenergie wurden 2018 in Deutschland im Verkehrssektor verbraucht, davon entfielen rund 94 Prozent auf konventionelle Kraftstoffe; Biokraftstoffe spielten mit vier Prozent und Strom mit weniger als zwei Prozent kaum eine Rolle.<sup>233</sup> Durch die Substitution fossiler durch biogene Kraftstoffe (v. a. Biodiesel) konnten 2018 insgesamt etwa 7,7 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. (netto) vermieden werden.<sup>234</sup> Insgesamt war der Verkehrssektor im Jahr 2018 für rund 22 Prozent der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen Deutschlands verantwortlich.<sup>235</sup> Rund 95 Prozent der Verkehrsemissionen werden von Pkw (zu etwa zwei Dritteln) und Lkw (zu etwa einem Drittel) ausgestoßen. Der Rest ist auf den nationalen Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr zurückzuführen.<sup>236</sup>

In den letzten Jahrzehnten wurden große Effizienzgewinne bei Verbrennungsmotoren realisiert. Aufgrund insgesamt steigender Fahrleistungen, leistungstärkerer Motoren und größerer Fahrzeuge führten diese aber nicht zu einem Rückgang der absoluten Treibhausgas-Emissionen. Hierfür stehen vor allem zwei Faktoren im Fokus: zum einen die Elektrifizierung des Verkehrs (Kasten 21) und zum anderen der Einsatz nicht fossiler Treibstoffe. Als Alternative zu fossilen Treibstoffen bieten sich grundsätzlich Biokraftstoffe an. Sie kommen gegenwärtig v. a. als Beimischung zu fossilen Kraftstoffen zum Einsatz, da die Nutzung reiner Biokraftstoffe teilweise Anpassungen bei Motoren und Kraftstoffsystemen voraussetzen

<sup>233</sup> UBA, 2020d.

<sup>234</sup> UBA, 2019i.

<sup>235</sup> UBA, 2020e.

<sup>236</sup> BMU, 2019d.

würde. Eine vollständige Umstellung auf Biokraftstoffe ist aufgrund der begrenzten Biomassepotenziale keine Option. Auch Beimischungen in deutlich größerem Ausmaß scheitern an der Begrenztheit der Biomassepotenziale und der „Konkurrenz“ um die Nutzungen. Eine weitere Alternative sind synthetische Kraftstoffe, die mit erneuerbar produziertem Strom auf Basis von aus der Luft gewonnenem CO<sub>2</sub> (oder übergangsweise unter Nutzung von aus Anlagen emittiertem CO<sub>2</sub> – sogenanntes Carbon Capture and Utilization, CCU) produziert werden. Sie werden unter dem Kürzel PtX subsummiert und in Teil III Kapitel 04.4 behandelt.

Im Zuge des Umbaus des Verkehrssektors werden die Anteile alternativer Antriebe in der jeweiligen Neuwagenflotte jährlich steigen müssen. Jedoch spielt in einer Übergangszeit der Verbrennungsmotor weiterhin eine Rolle, insbesondere im Schwerlastverkehr. Umso wichtiger ist, dass hier weitere Effizienzpotenziale erschlossen werden, auch wenn parallel die alternativen Antriebe vorangetrieben werden. Die Effizienzpotenziale stecken neben der Motorenteknologie vor allem in der Optimierung des Gesamtsystems sowie der Hybridisierung. Die Gefahr, dass, selbst wenn diese Potenziale erschlossen würden, sie durch die oben beschriebenen gegenläufigen Trends kompensiert würden, bleibt allerdings bestehen. Bislang zeigen sich keine Anzeichen für eine Veränderung dieser Trends.

#### Elektrifizierung des Verkehrs

Die Elektrifizierung des Verkehrs ist zur Erreichung der Klimaschutzziele von zentraler Bedeutung. Sie ermöglicht die nahezu direkte Nutzung von erneuerbarem Strom in Bereichen, die zuvor primär auf fossile Energieträger angewiesen waren, und nutzt insbesondere den Wirkungsgradvorteil von Elektromotoren. Damit haben Elektroautos in der Regel eine bessere Gesamtemissionsbilanz als Verbrenner (Kasten 21). Zur Elektrifizierung existieren verschiedene Technologien mit unterschiedlichem Reifegrad und unterschiedlichen Einsatzbereichen.

#### – Batteriebasierte Elektromobilität

Die batteriebasierte Elektromobilität hat die Funktionsfähigkeit grundsätzlich nachgewiesen, befindet sich in der Phase des großtechnischen Markteintritts und findet in der Pkw-Modellpalette der Anbieter zunehmende Verbreitung. Gegenüber der (wasserstoffbetriebenen) Brennstoffzelle bietet die batteriebasierte Elektromobilität den Vorteil, dass die Ladeinfrastruktur schneller ausgebaut werden kann und deren Grundlagen durch die flächendeckende Stromversorgung bereits vorhanden sind. Gleichwohl erschweren beschränkte Reichweiten und Ladeinfrastrukturen die Nutzung von Elektroautos im Fernverkehr noch. In der Batterieentwicklung sind daher noch Steigerungen der Energiedichte erforderlich, aber auch aufgrund der dynamischen Entwicklung zu erwarten. Zudem muss die Rohstoffeffizienz der Batteriezellen für einen erheblichen Ausbau der batteriebasierten Elektromobilität erhöht werden, damit bestimmte metallische Rohstoffe (z. B. Kobalt) für einen weltweiten Hochlauf der Elektromobilität in ausreichender Menge verfügbar sind. Perspektivisch müssen die Prozessketten so gestaltet werden, dass die kostbaren Rohstoffe möglichst in geschlossenen Zyklen geführt werden können. Auch ist das Batterierecycling aufwendig, z. B. aufgrund vieler unterschiedlicher Batteriearten, des Transports alter Batterien als Gefahrguttransport und der überwiegend händischen Demontage. Noch deckt der gewonnene Materialwert die Kosten des aufwendigen Recyclingprozesses nicht. Diese Herausforderungen betreffen grundsätzlich auch batteriebasierte elektrische Zugantriebe, die als Alternative zu Dieselmotoren auf kürzeren, nicht elektrifizierten Strecken künftig infrage kommen werden. In Deutschland sind bisher 20.726 Kilometer (etwa 54 Prozent) der insgesamt 38.466 Kilometer Schienenstrecken elektrifiziert.<sup>237</sup> Im Schwerlastverkehr sind batterieelektrische Antriebe aufgrund des großen Transportgewichts, der geringen Reichweiten und der hohen Anschaffungspreise bisher keine wirkliche Option. Direktelektrische Antriebe könnten hier über den Aufbau einer entsprechenden Oberleitungsinfrastruktur ermöglicht werden. Verbrennungsmotoren wären für größere Strecken ohne Oberleitungen weiterhin nötig, sodass Oberleitungs-Hybrid-Lkw eine Option darstellen.

<sup>237</sup> Deutscher Bundestag, 2018.

### – Brennstoffzellentechnologie

Die Brennstoffzellentechnologie zur Stromerzeugung aus Wasserstoff wird nach wie vor als mögliche ergänzende oder konkurrierende Technologie zum batterieelektrischen Antrieb im Mobilitäts- und Transportsektor eingeschätzt. Dies gilt insbesondere für den Schwerlastverkehr, bei dem das „Technologieren“ noch nicht entschieden ist. Voraussetzung für die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen ist die Nutzung von „grünem“ Wasserstoff, der mithilfe erneuerbarer Energien produziert wird. Hierfür gibt es verschiedene Technologien mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten, die teilweise bereits als kommerzielle Produkte verfügbar und teilweise in der großtechnischen Erprobung sowie im Pilot- und Demonstrations-Einsatz sind (zu PtX siehe Teil III Kapitel 04.4). Ob in verstärktem Maße Wasserstoff für Mobilitätszwecke dezentral eingesetzt werden kann, hängt u. a. davon ab, ob entsprechende Speichermöglichkeiten rechtzeitig entwickelt und aufgebaut werden können (Kasten 24 in Teil III Kapitel Power-to-X 04.4).

#### Kasten 21

#### Öko- bzw. Umweltbilanz unterschiedlicher Pkw-Antriebe

Zur Öko- bzw. Umweltbilanz unterschiedlicher Pkw-Antriebe existieren verschiedene Studien, die sich methodisch sowie hinsichtlich der betrachteten umweltrelevanten Parameter (z. B. Art der betrachteten Schadstoffe), des Umfangs des betrachteten Lebenszyklus sowie hinsichtlich der unterstellten Rahmenbedingungen und Annahmen (z. B. Lebensdauer von Akkumulatoren, Fahrsituation, Strommix) unterscheiden. Die Studienlage ist dabei dynamisch, da auch die Entwicklung der Batterietechnologie samt den verschiedenen Technologien zur Förderung der Rohstoffe gerade sehr dynamisch sind. Die folgende Darstellung basiert im Wesentlichen auf den umfangreichen Studien des Umweltbundesamts Österreichs (2014, 2016, 2018).<sup>238</sup>

#### Grundlagen

Die beiden neuesten Studien des Umweltbundesamts Österreichs vergleichen die Ökobilanz von konventionellen Benzin-/Diesel-Pkw (Abgasnorm Euro 6d<sub>temp</sub>; 1,4 bis 2,0 Liter Hubraumklasse) mit Hybrid-, Plug-in-Hybrid- und Batterie-Elektrofahrzeugen mit Li-Ionen-Akkumulatoren. Dabei werden die folgenden drei Parameter, die bei der Pkw-Nutzung direkt oder indirekt bzw. vorgelagert entstehen, berücksichtigt:

- Treibhausgasemissionen
- Luftschadstoffemissionen (Stickoxid-Emissionen (NO<sub>x</sub>) und Partikelemissionen)
- Kumulierter Energieaufwand über den ganzen Lebenszyklus eines Fahrzeugs

Diese Parameter sind wesentlich für die Ermittlung der Umweltperformance einzelner Pkw und werden über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs berechnet. Dieser gliedert sich in fünf Bereiche:

- Rohstoffabbau und -bereitstellung
- Verarbeitung zu Inputmaterialien
- Fahrzeugherstellung (ggf. inkl. Akkumulatorherstellung)
- Einsatz („Autofahren“)
- Recycling und Entsorgung (End-of-Life-Prozess)

Für den Vergleich der unterschiedlichen Antriebssysteme wird für jedes Fahrzeug von der gleichen Jahreskilometerleistung (15.000 Kilometer; 34 Prozent Autobahn, 37 Prozent außerorts, 28 Prozent innerorts) und Lebensdauer (15 Jahre) ausgegangen. Bei Elektrofahrzeugen wird angenommen, dass der Akku innerhalb dieser 15 Jahre einmal erneuert werden muss (zweifache Produktion, Recycling und Entsorgung). Der Strommix ist ein entscheidender Faktor bei der Bilanzierung der Antriebe. Daher erfolgt die Berechnung zum einen anhand des durchschnittlichen Strommix in Österreich 2012 (fossile Energieträger machen rund ein Drittel aus) sowie zum anderen anhand von „Grünstrom“ aus erneuerbaren Energieträgern. Bei konventionellen Benzin-/Diesel-Pkw mit Verbrennungskraftmaschinen wird die im Handel verfügbare Treibstoffzusammensetzung in Österreich, unter Berücksichtigung von Bioanteilen, betrachtet.

#### Ergebnisse

Die Gesamtbetrachtung direkter und indirekter Emissionen zeigt das folgende Bild:

- Bei den Treibhausgas-Emissionen schneiden Batterie-Elektrofahrzeuge deutlich besser ab als Verbrenner. Bei Nutzung von „Grünstrom“ nimmt der Vorteil noch zu. Dann sind die Treibhausgas-Emissionen rund 80 Prozent niedriger als bei konventionellen Benzin-/Diesel-Pkw, bei denen insbesondere die direkten Emissionen aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe zu Buche schlagen. Die Emissionen

nen aus der Akkuherstellung sind bei Elektrofahrzeugen zwar ebenfalls beträchtlich, es entfallen aber die direkten Emissionen sowie herstellungsbedingte Emissionen für Bauteile wie Getriebe und Abgasnachbehandlung. Entscheidend für die Treibhausgasbilanz ist vor allem der Energieeinsatz für den Betrieb des Fahrzeugs. Somit können effizientere Verbrennungsmotoren als Überbrückungstechnologie vorübergehend zum Klimaschutz beitragen, insbesondere im Schwerlastverkehr und in der kurzen Frist im Fernverkehr (siehe unten).

- Bei den Stickoxid-Emissionen schneiden Batterie-Elektrofahrzeuge bei Nutzung von „Grünstrom“ besser ab als Verbrenner. Bei Annahme des österreichischen Strommix haben sie zwar noch einen Vorteil gegenüber Diesel-Pkw, sie emittieren aber mehr als Benzin-Pkw.
- Bei den Partikel-Emissionen sind Batterie-Elektrofahrzeuge aufgrund des hohen Energieeinsatzes bei der Akkuherstellung im Nachteil – sowohl bei Annahme des österreichischen Strommix als auch bei Nutzung von „Grünstrom“.
- Beim kumulierten Energieaufwand schneiden Batterie-Elektrofahrzeuge besser ab als Verbrenner. Bei Nutzung von „Grünstrom“ nimmt der Vorteil deutlich zu.

Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass Fahrsituation (innerorts, außerorts/Landstraße oder Autobahn), Akku-Lebensdauer und Fahrzeugherstellung (Primär-, Sekundärrohstoffe) die Ökobilanz zwar wesentlich beeinflussen, aber die Reihenfolge des Abschneidens von konventionellen Benzin-/Diesel-Pkw und Batterie-Elektrofahrzeugen nicht wesentlich verändern.

#### Antriebswahl von Fahrprofil abhängig

Letztlich sollte die Antriebswahl zumindest in der aktuellen Phase, in der sich die Batterien und Speicherkapazitäten noch stark in der Entwicklung befinden, insbesondere vom Fahrprofil abhängen. Gemäß der bundesweiten Erhebung „Mobilität in Deutschland“ (MiD)<sup>239</sup> kann das Fahrprofil in Deutschland wie folgt beschrieben werden:

- Über alle Fahrzwecke hinweg werden durchschnittlich 20 Kilometer pro Tag mit dem Auto zurückgelegt (in Großstädten etwas weniger und auf dem Land etwa mehr).
- Für die Fahrzwecke „Arbeit“ (also Pendelverkehr) und „dienstlich“ (Geschäftsreisen und direkter arbeitsbezogener Verkehr) werden im Mittel ungefähr 19 Kilometer pro Tag zurückgelegt, für „Einkaufen“ sieben Kilometer, für „Freizeit“ 21 Kilometer und für sonstige „Erledigungen“ 13 Kilometer.
- 64 Prozent der Pkw-Fahrten im Alltagsverkehr sind kürzer als zehn Kilometer und 95 Prozent kürzer als 50 Kilometer.
- Nur etwas mehr als ein Prozent der Pkw-Fahrten ist länger als 100 km, auf diese Fahrten entfallen allerdings 25 Prozent der Pkw-Fahrleistungen.

Der sehr hohe Anteil kurzer Strecken an den Pkw-Fahrten zeigt, dass die meisten Strecken und Fahrzwecke mit entsprechender Ladeinfrastruktur batterieelektrisch gut zu bedienen sind. Allerdings findet ein Großteil der Pkw-Gesamtfahrleistung im Fernverkehr statt. Hier bietet der Verbrenner in der aktuellen Phase, in der sich die Batterien und Speicherkapazitäten noch stark in der Entwicklung befinden, praktische Vorteile, die derzeit bei Kaufentscheidungen eine wichtige Rolle spielen dürften, da fast alle Pkw mindestens einmal jährlich lange Strecken zurücklegen – die klimabezogenen Nachteile spielen dann tendenziell eine untergeordnete Rolle. Perspektivisch wären hier veränderte Angebote erforderlich, die unterschiedliche Nutzungsformen mit unterschiedlichen Fahrzeugen und Geschäftsmodellen verbinden.

<sup>238</sup> Die 2014er-Studie bildet die Grundlagenstudie. In der 2016er- und 2018er-Studie wurden die Berechnungen auf Basis aktueller Entwicklungen und Erkenntnisse zur Ökobilanzierung von Antrieben aktualisiert. Die relevantesten Anpassungen in der neuesten Studie sind zum einen eine Erhöhung der zugrunde gelegten Methan-Emissionen, die bei der Erdölförderung freigesetzt werden, und zum anderen eine Erhöhung der Emissionen bei der Akkuherstellung.

<sup>239</sup> BMVI, 2018.



### Verkehrsmanagementsysteme

Weitere Möglichkeiten zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen im Verkehrssektor bietet bspw. die Umstellung hin zu neuen, auf multimodaler Mobilität basierenden Verkehrsmanagementsystemen. Schätzungen gehen davon aus, dass dadurch im Verkehr bis 2050 die Treibhausgas-Emissionen um bis zu 60 Prozent und der Energieverbrauch um bis zu 30 Prozent reduziert werden können.<sup>240</sup> Im Güterverkehr bietet auf Autobahnen zudem Platooning eine Möglichkeit, Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei jedem mit dieser Technologie zurückgelegten Kilometer um etwa zehn Prozent zu verringern.<sup>241</sup> Allerdings werden die Potenziale von Platooning in Deutschland aufgrund vieler Auf- und Abfahrten als eher gering erachtet.

### Flugverkehr

Im Flugverkehr werden gegenwärtig neuartige Antriebstechniken entwickelt, um Treibstoffverbrauch und Emissionen zu reduzieren. Bereits heute existieren Prototypen rein elektrisch betriebener Kleinflugzeuge. Insbesondere Großflugzeuge werden auf absehbare Zeit jedoch nicht rein elektrisch betrieben werden können; hybrid-elektrische Antriebe sind künftig aber möglich. In den nächsten Jahren ist vielmehr mit einer Optimierung der konventionellen Antriebe (z.B. durch verbesserte Getriebefans) zu rechnen. Darüber hinaus wird damit gerechnet, dass insbesondere für Langstreckenflüge synthetische Treibstoffe früher oder später die fossilen ablösen werden.

#### 04.2.4 Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist für den Endenergieverbrauch zwar von untergeordneter Bedeutung, ist aber für rund 60 Prozent der gesamten Methan- und 80 Prozent der gesamten Lachgas-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Im Jahr 2017 betrug der Anteil der Landwirtschaft an den gesamten Treibhausgas-Emissionen in Deutschland etwa 7,3 Prozent, davon sind rund 40 Prozent auf Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden infolge der Stickstoffdüngung, 38 Prozent auf Methan-Emissionen aus der Tierhaltung und 14 Prozent auf die Ausbringungen von Wirtschaftsdünger (Gülle, Festmist) zurückzuführen.<sup>242</sup> Schätzungen gehen davon aus, dass der weltweite Anteil der Landwirtschaft an den Treibhausgas-Emissionen rund 14 Prozent und unter Einbezug der agrarbedingten Entwaldung 25 Prozent beträgt.<sup>243</sup> Die Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft können durch neue Technologien nur in begrenztem Umfang reduziert werden. Vielmehr sind die wesentlichen Stellgrößen die konsumierten Produkte und die Produktions- und Handelsketten.

Einen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen kann insbesondere die Präzisionslandwirtschaft leisten. Ziel der Präzisionslandwirtschaft ist es, mithilfe der Digitalisierung ein optimales standortspezifisches Inputmanagement von Agrarflächen zu schaffen, das einerseits den tatsächlichen Bedürfnissen der Pflanzen und Böden für einen optimalen Ertrag gerecht wird und andererseits durch einen geringeren bzw. effizienteren Einsatz von Dünger, Pflanzenschutzmitteln, Wasser und Energie Ressourcen und Umwelt schont. Dafür dient insbesondere die intelligente Verknüpfung von Datenmanagementsystemen, Satellitennavigationssystemen, Wetterdaten, Sensordaten sowie von (teil-)autonomen Fernerkundungssystemen und Landmaschinen. Bspw. können GPS-Daten genutzt werden, um den Fahrweg von (selbstfahrenden) Landmaschinen zu optimieren und damit Treibstoff zu sparen. Werden zudem Wetterdaten und Erkundungsdaten von Drohnen einbezogen, kann dies helfen, Sä- und Pflege- sowie Erntemaßnahmen von Pflanzen (und Böden) zu präzisieren und zu optimieren. Zudem kann der Einbezug der Logistik helfen, den weiteren Verarbeitungsprozess zu verbessern.

<sup>240</sup> Europäische Kommission, 2017.

<sup>241</sup> Davila, 2013.

<sup>242</sup> UBA, 2019h.

<sup>243</sup> Deutsche Bank Research, 2011.

Weitere Möglichkeiten zur Verringerung der Treibhausgas-Emissionen des Landwirtschaftssektors:<sup>244</sup>

- **Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden**, bspw. durch den Anbau von Zwischenfrüchten und mehrjährigen Nutzpflanzen sowie durch reduzierte Bodenbearbeitung,
- **Substitution anorganischer Düngemittel**, bspw. durch Düngung mit Mist oder Fruchtwechsel mit Leguminosen (Hülsenfrüchtler), die Stickstoff fixieren können,
- **Erhalt bzw. die Reaktivierung von Kohlestoffsinken**, bspw. durch die Rekultivierung degradierter Böden sowie durch die Vermeidung von agrarbedingter Rodung,
- **Reduktion der tierischen Methan-Emissionen**, bspw. durch Futtermittelzusätze, die zu einer leichteren Verdaulichkeit führen, oder künftig durch „Anti-Methan-Pillen“, die die Methan-produzierenden Mikroorganismen im Magen direkt beeinflussen,
- **Ersatz tierischer Produkte**, bspw. durch die Nachbildung aus rein pflanzlichen Bestandteilen. Neuere Optionen sind „In-vitro-Züchtung“ aus Stammzellen oder In-vitro-Nachbau aus entsprechenden Aminosäure-, Fettsäuren- und Collagenbausteinen. Damit können sowohl die direkten tierischen Methan-Emissionen als auch die Treibhausgas-Emissionen im Zusammenhang mit dem Anbau bzw. der Produktion von Futtermitteln abgesenkt werden. Allerdings setzen auch Fleischersatz und „Nachbauten“, wenn diese Produkte ähnliche ernährungsphysiologische Qualitäten haben sollen wie Fleisch – Quelle hochwertiger Proteine, Collagenstabilisatoren und Fettsäureprofile –, entsprechende Ausgangsstoffe bzw. Input in Nährlösungen voraus, welche bereits prozessierte und konzentrierte Pflanzenextrakte beinhalten. Ob der Ersatz tierischer Produkte einen signifikanten Beitrag zur Treibhausgas-Minderung leisten kann, hängt somit einerseits von der rohstoffeffizienten Produktion und entsprechenden Produktionsketten der Inputs ab, andererseits von der Akzeptanz der Konsumenten.
- **Reduktionspotenziale auf der Energieseite** betreffen vor allem Gebäude (z. B. Treibhäuser) und Fahrzeuge / landwirtschaftliche Maschinen und werden üblicherweise im Dienstleistungssektor berücksichtigt. Hier handelt es sich um die weiter vorn beschriebenen Effizienztechnologien sowie den Einsatz biogener Energieträger, der sich in der Landwirtschaft bei hinreichend großen Betrieben anbietet.

### 04.3 CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung (CCU, CCS, NET)

Die ambitionierteren Klimaschutzziele (z.B. Paris-Abkommen) können nur durch den Einsatz neuerer Technologien erreicht werden, die nicht auf die direkte Vermeidung von Treibhausgasen abzielen, sondern darauf, emittiertes bzw. vorhandenes CO<sub>2</sub> der Atmosphäre zu entziehen und zu speichern oder zu verwerten. Diese Technologien können in drei Gruppen eingeteilt werden:

#### - CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung

Bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) wird CO<sub>2</sub> an Punktquellen, bspw. Industrieprozessen oder Müllverbrennungsanlagen, technisch entzogen, transportiert und im Untergrund gespeichert (Teil III Kapitel 04.3.1). Falls der Kohlenstoff aus Biomasseanlagen (z. B. Kraftwerken) stammt, können auf diese Weise bilanziell negative Emissionen „erzeugt“ werden.

#### - CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung

Bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung (Carbon Capture and Utilization, CCU) wird CO<sub>2</sub> an Punktquellen technisch entzogen, transportiert und als Rohstoff genutzt (Teil III Kapitel 04.3.2).

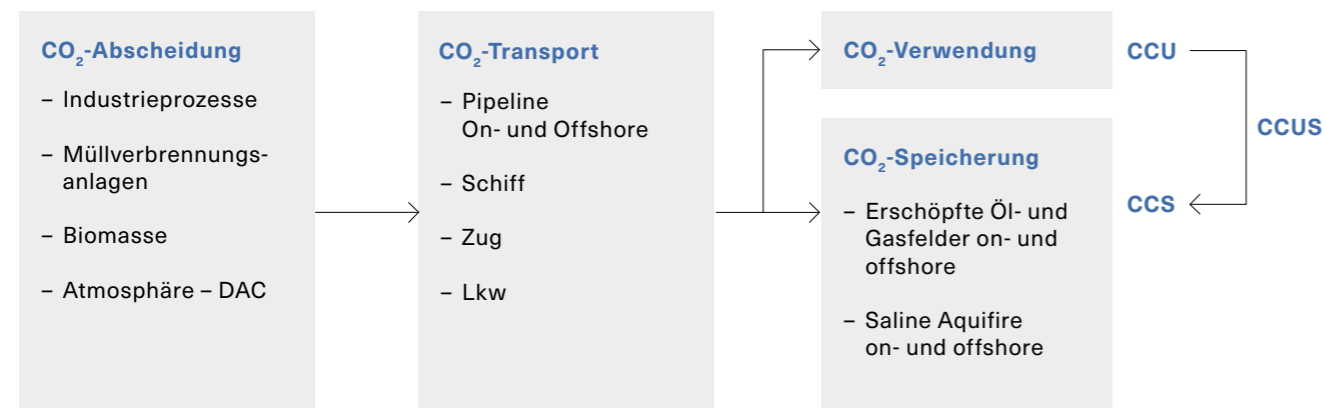
#### - Negative Emissionstechnologien

Bei negativen Emissionstechnologien (NET) wird CO<sub>2</sub> mittels natürlicher oder technologischer Optionen aus der Atmosphäre entzogen und in Kohlestoffsinken gespeichert (Teil III Kapitel 04.3.3).

Abbildung 51 zeigt den Ablauf von CO<sub>2</sub>-Speicherung und -Nutzung. Die technischen Verfahren zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> an Punktquellen werden in Kasten 22 erläutert.

<sup>244</sup> Deutsche Bank Research, 2011.

Abbildung 51  
Ablauf von CO<sub>2</sub>-Speicherung und -Nutzung



Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, 2020

Insgesamt sind die technologischen Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung relativ aufwendig und mit hohen Kosten verbunden. Zudem bestehen teilweise noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsnotwendigkeiten. Europa verfügt aufgrund der gut entwickelten Pipeline-Transportinfrastruktur sowie der Erfahrungen in Bohraktivitäten und Seismik grundsätzlich über gute Voraussetzungen, um die großskalige Umsetzung voranzutreiben. Die natürlichen Optionen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Speicherung lassen sich i. d. R. schneller und zu geringeren Kosten umsetzen. Hier besteht jedoch ein erhöhtes Risiko, dass das gespeicherte CO<sub>2</sub> infolge von Umwelteinflüssen wieder zurück in die Atmosphäre gelangt.

#### Kasten 22

#### Verfahren zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> an Punktquellen

##### Vorverbrennungsverfahren

Die Abscheidung von CO<sub>2</sub> an Punktquellen (das sind z. B. große Industriebetriebe wie Stahl- oder Zementwerke, bestimmte chemische Prozesse, Raffinerien, Abfallverbrennungsanlagen) kann grundsätzlich entweder vor der Verbrennung („pre-combustion“) oder nach der Verbrennung („post-combustion“) aus dem Rauchgas bzw. Abgas erfolgen (Abbildung 52). Beim Vorverbrennungsverfahren wird in einer Vergasungsanlage aus reinem Sauerstoff aus einer Luftzerlegungsanlage und Wasserdampf sowie einer Kohlenstoffquelle Syngas (Synthesegas) erzeugt. Das Syngas wird in einem nachgelagerten Prozess in ein Gemisch aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgewandelt. Das CO<sub>2</sub> wird anschließend abgeschieden und der verbleibende Wasserstoff kann weiterverwendet werden – bspw. in einer CO<sub>2</sub>-freien Gas- und Dampfanlage (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) zur Energieerzeugung. Ein wesentlicher Vorteil des Vorverbrennungsverfahrens liegt darin, dass der CO<sub>2</sub>-Anteil im Abgasstrom deutlich höher ist als beim Nachverbrennungsverfahren. Damit wird die CO<sub>2</sub>-Absorption stark ver-

einfacht. Nachteilig ist die gegenüber der Nachverbrennung erhöhte Komplexität infolge der erforderlichen Brennstoffumwandlungsprozesse. Dies erschwert die Integration der Technologie in bestehende Anlagen und beschränkt den Anwendungsbereich im Wesentlichen auf Kraftwerksprozesse.

##### Nachverbrennungsverfahren

Beim Nachverbrennungsverfahren wird das CO<sub>2</sub> erst nach der Verbrennung von z. B. fester Biomasse aus dem Rauchgas entfernt. Die Abscheidung des CO<sub>2</sub> erfolgt mittels chemischer Absorption (Aminwäsche), physikalischer Adsorption, Adsorption, Kryogentechnik oder mittels membranbasierter Verfahren. Der Vorteil des Post-Combustion-Verfahrens ist, dass es für viele bestehende Anlagen nachgerüstet werden kann. Nachteilig ist der hohe thermische Energiebedarf.

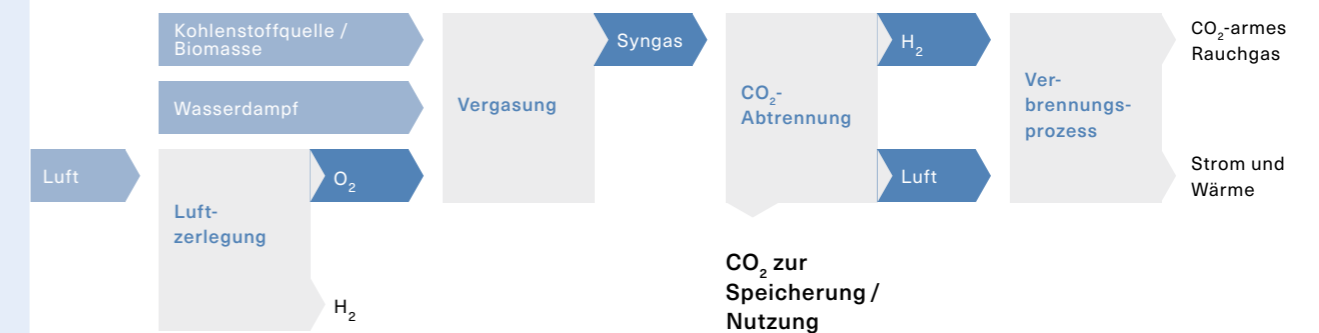
##### Oxyfuel-Verfahren

Beim Oxyfuel-Verfahren wird das CO<sub>2</sub> ebenfalls erst nach der Verbrennung aus dem Rauchgas entfernt. Allerdings wird hier die Tatsache genutzt, dass bei einer Verbrennung mit reinem Sauerstoff reineres Rauchgas entsteht als bei einer konventionellen Verbrennung mit Luft. Das entstehende Rauchgas im Verbrennungsprozess besteht hauptsächlich aus CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, sodass eine technische CO<sub>2</sub>-Abtrennung nach der Verbrennung nicht nötig ist. Für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit dem Oxyfuel-Verfahren wird elektrische Energie nur für die Luftzerlegungsanlage in Stickstoff und Sauerstoff und für die Verdichtung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> benötigt.

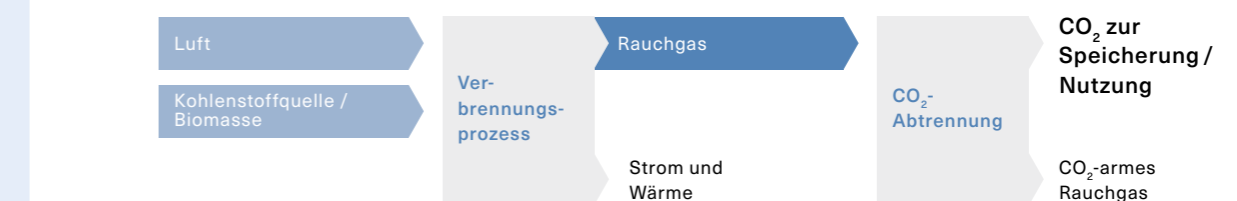
In allen drei Verfahren wird das CO<sub>2</sub> nach der Abscheidung in der Regel auf 80 bis 110 bar komprimiert, um es mit höherer Dichte mittels Pipeline, Schiff, Lkw oder Bahn zu seinem Bestimmungsort zu transportieren. Die aus energetischer und ökonomischer Sicht sinnvollste Transportoption hängt im Wesentlichen von dem jährlich anfallenden CO<sub>2</sub>-Strom, der Entfernung zu der CO<sub>2</sub>-Lagerstätte, den Transportkosten sowie von Sicherheitsaspekten ab. Der Bestimmungsort ist eine unterirdische CO<sub>2</sub>-Lagerstätte im Falle von CCS oder der Ort der Weiterverarbeitung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> im Fall von CCU. Wenn das CO<sub>2</sub> z. B. in Industrieparks abgeschieden und dort direkt verarbeitet wird, benötigt dies keine große Transportinfrastruktur.

Abbildung 52  
Schematische Darstellung der Verfahren zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> an Punktquellen

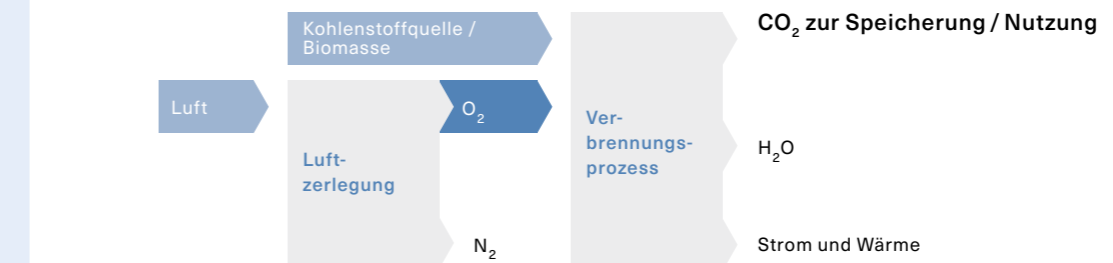
##### Vorverbrennungsverfahren (Pre-Combustion)



##### Nachverbrennungsverfahren (Post-Combustion)



##### Oxyfuel-Verfahren



Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, 2020

#### 04.3.1 CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS)

Bei CCS wird CO<sub>2</sub> an Punktquellen abgeschieden, verdichtet, abtransportiert und in geologischen Tiefen(lagern) verpresst und damit langfristig gespeichert (Abbildung 53). Als Lagerstätten kommen insbesondere ausgeförderte Öl- und Gasfelder sowie saline Aquifere (> 800 Meter Tiefe) on- und offshore in Betracht. In Europa wird von einem theoretischen CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzial von 300 Gigatonnen ausgegangen, davon liegen rund 200 Gigatonnen in der Nordsee. In Deutschland liegt das CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzial vermutlich zwischen zwölf und 50 Gigatonnen.<sup>245</sup>

Allerdings besteht noch Forschungsbedarf hinsichtlich der konkreten Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Speicherung im Untergrund und insbesondere der Folgen möglicher ungeplanter Austritte (u.a. Eintragungen ins Grundwasser). Bspw. wird diskutiert, inwieweit die Verpressung von CO<sub>2</sub> in den Untergrund die Wahrscheinlichkeit von (schwachen) Erdbeben im Speichergebiet erhöht, sodass es zu Rissen bzw. Lecks in den unterirdischen Speichern kommt, durch die das CO<sub>2</sub> wieder entweichen kann.<sup>246</sup> Käme es infolge der Lecks zu einer Entleerung der Speicher, würde CCS aufgrund der Treibhausgas-Emissionen, die bei Abscheidung, Transport und Verpressung entstehen, dazu führen, dass der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre langfristig höher ausfiele als ohne den Einsatz von CCS. In Deutschland sind CCS-Technologien in der Öffentlichkeit zwar recht wenig bekannt, dennoch stoßen Planung und Umsetzung von CCS-Projekten häufig auf Widerstand bei der Bevölkerung vor Ort (u.a. NIMBY-Verhalten).<sup>247</sup> Da CO<sub>2</sub> ein schweres Gas ist, das am Boden liegen bleibt und sich in Senken sammelt, sind Lecks nicht ungefährlich, aus denen CO<sub>2</sub> in größeren Mengen entweicht. CO<sub>2</sub> ist zwar nicht giftig im eigentlichen Sinne, führt aber in hoher Konzentration zur Erstickung. Daher erfordern CO<sub>2</sub>-Speicherprojekte gute Sicherheitskonzepte und gute öffentliche Kommunikation.

Das erste großskalige CCS-Projekt in Europa ist das norwegische Sleipner-Projekt, in dessen Rahmen seit 1996 rund 0,9 Megatonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr eingelagert wurden. Inzwischen gibt es eine Vielzahl laufender bzw. geplanter CCS-Projekte in der Nordsee. Das neueste CCS-Projekt Norwegens ist das Northern Lights-Projekt in der Nordsee. Geplant ist, jährlich bis zu fünf Megatonnen CO<sub>2</sub> aus industriellen Anlagen wie der Zementproduktion, aus Müllverbrennungsanlagen oder aus ausländischen Quellen offshore in rund 3.000 Metern Tiefe zu speichern. Neben Norwegen planen auch Großbritannien und die Niederlande langfristige CO<sub>2</sub>-Einlagerungen (u.a. aus der Wasserstoffproduktion) in der Nordsee.

#### 04.3.2 CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung (CCU)

Neben der langfristigen Speicherung im Untergrund kann das abgeschiedene CO<sub>2</sub> als Rohstoff in Produkten und weiteren Produktkreisläufen verwendet werden (Abbildung 53). Damit ist CCU für die Kreislaufwirtschaft zwar von Bedeutung, der direkte Klimaschutzbeitrag hängt im Wesentlichen aber davon ab, ob das abgeschiedene CO<sub>2</sub> zur Herstellung kurz- oder langlebiger Produkte genutzt wird, also ob das CO<sub>2</sub> am Ende wieder in die Atmosphäre gelangt. Dies gilt, zumal bei CCU infolge der Abscheidungsprozesse und Transportwege zusätzliche Treibhausgase freigesetzt werden. Bspw. kann das CO<sub>2</sub> als Rohstoff zur Produktion synthetischer Treibstoffe wie Diesel oder Kerosin genutzt werden. Bei deren Verbrennung wird das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt; es wird der Atmosphäre also nicht langfristig entzogen. Werden hingegen synthetische Kunststoffe aus dem abgeschiedenen CO<sub>2</sub> hergestellt und nach Durchlaufen mehrstufiger Recyclingzyklen am Ende des Produktzyklus in einer Müllverbrennungsanlage mit CCS verbrannt, ergeben sich negative CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine solche Kombination von CCU und CCS wird als CCUS bezeichnet. Weitere gegenwärtige Anwendungsfelder von CCU sind eher kurzfristiger Natur, wie bspw. die Nutzung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> zur Produktion kohlenstoffhaltiger Getränke sowie zur Beschleunigung des Wachstums in Gewächshäusern oder von Mikroalgen.

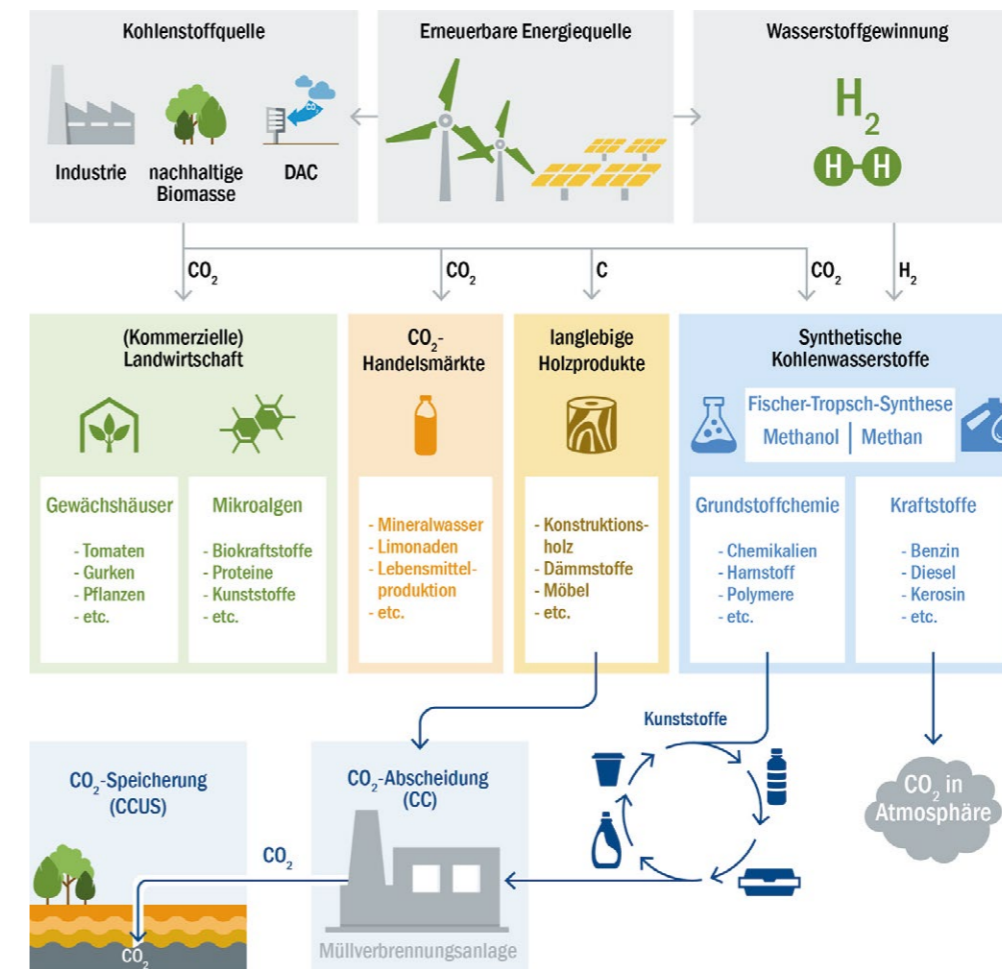
<sup>245</sup> acatech, 2018; GCCSI, 2019.

<sup>246</sup> Verdon und Stork, 2016.

<sup>247</sup> Wuppertal Institut et al., 2008; Fraunhofer Institut, 2015.

Abbildung 53

#### Schematische Darstellung von CCS und CCU



DAC = CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture).

Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, 2020

#### 04.3.3 Negativ-Emissionstechnologien (NET)

Um das Ziel der Klimaneutralität spätestens bis 2050 zu erreichen, ist es notwendig, die Treibhausgas-Emissionen auf „Netto Null“ zu reduzieren. Dafür müssen die nur schwer vermeidbaren Restemissionen, die bspw. im Flugverkehr, in der Landwirtschaft oder in Zementwerken emittiert werden, durch Negativ-Emissionstechnologien kompensiert werden. Diese umfassen ein breites Feld an Möglichkeiten, der Atmosphäre CO<sub>2</sub> dauerhaft (zumindest für einige Jahrzehnte) zu entziehen und es in Kohlenstoffsinken zu speichern. Bei den hierfür aus heutiger Sicht infrage kommenden Lösungen kann zwischen natürlichen, natürlichen-technologischen und technologischen Optionen differenziert werden (Abbildung 54).<sup>248</sup> Besonders relevant sind die Verbrennung von Biomasse mit nachgelagerter CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) und die direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Umgebungsluft mit nachfolgender Speicherung (DACCS).<sup>249</sup>

<sup>248</sup> Fuss et al., 2018; EASAC, 2018.

<sup>249</sup> Diese beiden Möglichkeiten dienen im Wesentlichen dem Erreichen der Treibhausgas-Neutralität 2050 in den Klimaschutzszenarien der Europäischen Kommission, die von einer Kompensation zwischen 281 Megatonnen CO<sub>2</sub>Äq. (Szenario 1.5 LIFE) und 606 Megatonnen CO<sub>2</sub>Äq. (Szenario 1.5 TECH) durch Negativ-Emissionstechnologien ausgehen (Europäische Kommission, 2018).

Abbildung 54

## Schematische Übersicht zu den Negativen Emissionstechnologien

Natürliche Optionen	Natürliche-technologische Optionen	Technologische Optionen
Aufforstung und Wiederaufforstung	Biomasseverbrennung mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung (BECCS)	Direkte CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus der Umgebungsluft (DACCS)
Pflanzenkohle		Beschleunigte Verwitterung (Enhanced Weathering)
Kohlenstoffspeicherung im Boden (Soil Carbon Sequestration) Kohlenstoff-Speicherung in langlebigen Materialien		Ozean-Düngung (Ocean Alkalinity Enhancement)
Wiederbewässerung von Mooren und Management von Küsten-ökosystemen (blauer Kohlenstoff)		
→ Geringe Kosten → Schneller umsetzbar → CO <sub>2</sub> -Senke verwundbar durch Umwelteinflüsse (z. B. Waldbrände)	→ Potenzial beschränkt durch Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse → Erzeugt zusätzlich Strom und Wärme	→ Höhere Kosten → Noch viel Forschung und Entwicklung notwendig → CO <sub>2</sub> -Senke weniger beeinflussbar durch Umwelteinflüsse

Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, 2020

## Natürliche-technologische Optionen

Im Mittelpunkt der natürlichen-technologischen Optionen steht Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). Ausgangspunkt des Verfahrens bildet zellulosehaltige Biomasse (z. B. Holz), die durch Photosynthese CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufgenommen hat. Das in der Biomasse enthaltene CO<sub>2</sub> wird durch die oben beschriebenen Abscheidungsverfahren abgeschieden und verdichtet. Anschließend wird es zu der Speicherstätte transportiert und dort im Boden verpresst. Damit wird es langfristig der Atmosphäre entzogen. Die bei der Abscheidung (Verbrennung oder Vergasung) freigesetzte Energie kann bspw. zur Strom- und Wärmeenergieerzeugung oder zur Herstellung von Wasserstoff, der u. a. für die Ammoniakproduktion oder andere industrielle Prozesse verwendet werden kann, genutzt werden.

Der hohe Bedarf an nachhaltiger Biomasse bedingt einerseits eine hohe Inanspruchnahme von Landfläche und Wasser und andererseits Nutzungskonkurrenzen, etwa mit anderen landwirtschaftlichen Erzeugnissen für die stoffliche Nutzung. (Eine Konkurrenz mit der Nahrungskette wird bei nachhaltiger Produktion explizit ausgeschlossen.) Schätzungen gehen davon aus, dass der Atmosphäre durch BECCS jährlich bis zu fünf Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> entzogen werden könnten. Um dies zu erreichen, wären rund 200 Mio. Hektar Biomasse-Plantagen nötig, was rund einem Sechstel der gesamten heutigen globalen Agrarfläche entspricht.<sup>250</sup>

Neben der Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse beschränkt die Verfügbarkeit geeigneter CO<sub>2</sub>-Speicherstätten das Potenzial von BECCS-Anlagen. Bisher gibt es weltweit erst wenige BECCS-Anlagen. Eine Pilotanlage befindet sich bspw. in Großbritannien. Im Jahr 2019 wurde im Wärmekraftwerk in North Yorkshire (Kraftwerk DRAX) damit begonnen, in vier der sechs 660-MW-Kessel Kohle- durch Biomasseverbrennung zu ersetzen.

## Technologische Optionen

Im Mittelpunkt der technologischen Optionen steht die direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Umgebungsluft mittels chemischer Prozesse und anschließender CO<sub>2</sub>-Speicherung in geologischen Tiefen. Dieses Verfahren wird als Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) bezeichnet und in Kasten 23 näher erläutert.<sup>251</sup> Die direkte Luftabscheidung befindet sich noch in der Pilotphase; Anlagen gibt es bspw. in Kanada, der Schweiz, den USA und den Niederlanden. Weitgehend ungelöst ist bisher der hohe Energieverbrauch von DACCS-Anlagen. Zusätzlich zum Energiebedarf für die Abscheidung durch Absorption oder Adsorption wird bei beiden Verfahren Strom benötigt, um der DACCS-Anlage mit Ventilatoren Luft zuzuführen sowie um Flüssigkeitspumpen und CO<sub>2</sub>-Kompression zu betreiben. Neben dem Energiebedarf ist die Verfügbarkeit geeigneter CO<sub>2</sub>-Speicherstätten – wie schon bei BECCS – ein begrenzender Faktor. Ein bedeutender Vorteil von DACCS gegenüber BECCS liegt in dem geringen Flächenverbrauch.

<sup>250</sup> Spektrum, 2018b; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019.

<sup>251</sup> Neben der Speicherung kann das abgeschiedene CO<sub>2</sub> als Ressource weitergenutzt werden, was als direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung (Direct Air Carbon Capture and Utilization, DACCU) bezeichnet wird.

Kasten 23

## DACCS-Verfahren

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Umgebungsluft kann grundsätzlich durch das Absorptions- oder das Adsorptionsverfahren erfolgen:

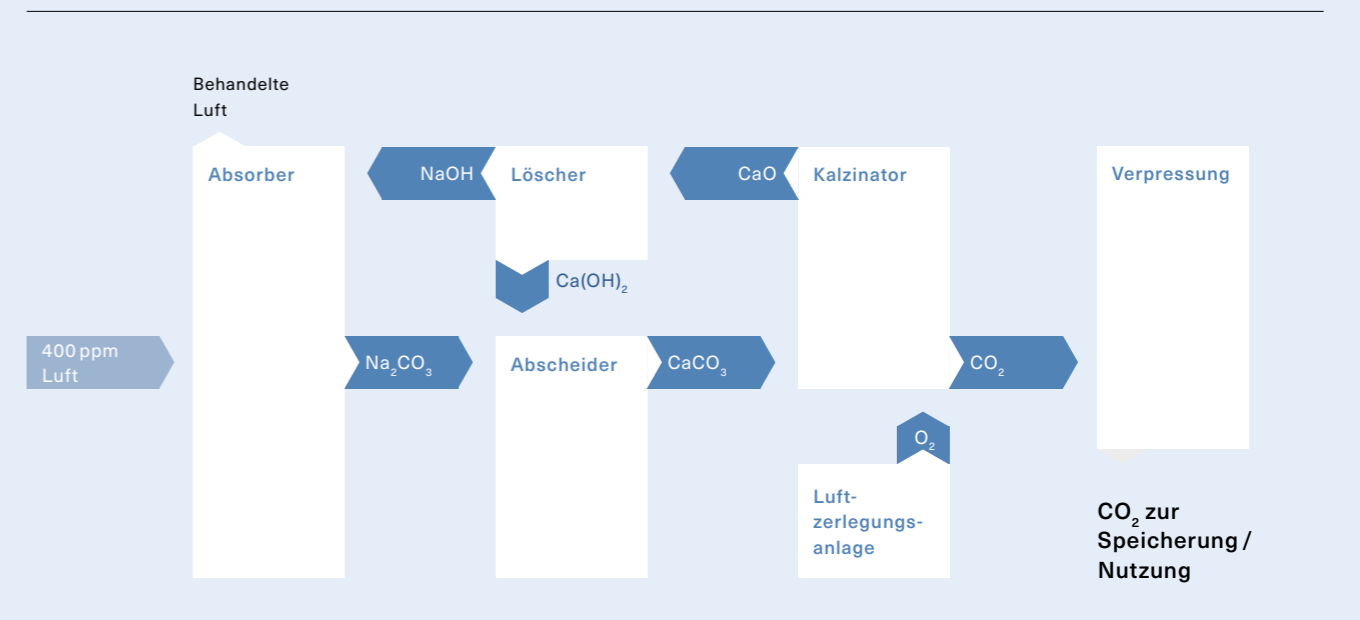
– Bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung mittels Absorption wird ein chemisches Sorptionsmittel verwendet, das mit dem CO<sub>2</sub> der angesaugten Luft reagiert. Aufgrund der starken CO<sub>2</sub>-Bindungsaffinität werden typischerweise Lösungsmittel auf Hydroxidbasis wie Natriumhydroxid (NaOH), Kaliumhydroxid (KOH) oder Kalziumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>) eingesetzt. Zur Regeneration des Sorbens muss die Bindungsenergie zwischen CO<sub>2</sub> und Hydroxid überwunden werden. Die erfordert einen großen Energieaufwand, meist hochwertige Wärme bei einer Temperatur von 900 bis 1.000 Grad C. Die Wärme kann durch die Verbrennung von Erdgas in Kombination mit reinem Sauerstoff durch eine Luftzerlegungsanlage bereitgestellt werden. Das bei der Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub> muss aber zusätzlich abgeschieden werden, sodass dadurch ein höherer Energiebedarf entsteht. Die zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung von Erdgas können vermieden werden, wenn die benötigte Wärme vollständig aus erneuerbaren Energien stammt.

– Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung mittels Adsorption basiert auf einem wiederholenden Zyklus von Adsorption und Regeneration. Als Sorptionsmittel wird i. d. R. feststoffgestütztes Aminmaterial verwendet. Da das erforderliche Temperaturniveau für die Regeneration des Sorbens beim Adsorptionsverfahren mit unter 120 Grad C niedriger ist als beim Absorptionsverfahren, sind Standorte in der Nähe von Industrie- und Müllverbrennungsanlagen bei diesem Verfahren besonders geeignet.

Bisher gibt es weltweit erst eine DACSS-Anlage, die das Absorptionsverfahren nutzt. In der Pilotanlage der kanadischen Firma Carbon Engineering reagiert Natriumhydroxid (NaOH) mit dem gering konzentrierten CO<sub>2</sub> (rund 400 ppm) aus der Luft zu Natriumkarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Zur Regeneration des Abscheidelösungsmittels wird das Karbonat mit Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>) umgesetzt. Ca(OH)<sub>2</sub> wird durch thermische Zersetzung von Kalk (CaCO<sub>3</sub>) in einem Kalzinator und anschließende Hydratisierung gewonnen (Abbildung 55).

Abbildung 55

## Absorptionsbasierter DACCS-Prozess mit Natriumhydroxid



Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, 2020

Weitere technologische Optionen betreffen bspw. die verstärkte Verwitterung und Ozean-Düngung. Bei der verstärkten Verwitterung (Enhanced Weathering) werden Silikat- und Karbonatgesteine zerkleinert und auf den Böden bzw. Agrarflächen verteilt, um deren Verwitterung zu beschleunigen und dabei CO<sub>2</sub> zu binden. Das Potenzial des Verfahrens hängt im Wesentlichen von der Feinkörnigkeit und Verwitterungsrate des eingesetzten Gesteins ab. Bei Basalt müssten über drei Mrd. Tonnen ausgebracht werden, um eine Milliarde Tonnen CO<sub>2</sub> zu binden. Bezogen auf das Jahr 2018 würden damit etwa 2,6 Prozent der jährlichen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen gebunden, während die auszubringende Gesteinsmenge rund 40 Prozent der weltweiten Kohleförderung entspricht und sich auf etwa einem Fünftel der weltweiten Agrarflächen verteilen würde. Angesichts des nötigen hohen Energieeinsatzes, der aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden müsste, und der Kosten für die Zerkleinerung und Ausbringung des Gesteins bleibt das wirtschaftlich machbare Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasen begrenzt und deutlich hinter dem theoretischen Potenzial zurück. Zudem sind die Auswirkungen der Prozesse, etwa auf die Eigenschaften von Böden, Flüssen und Ozeanen, noch nicht vollständig bekannt.<sup>252</sup>

#### CO<sub>2</sub>-Düngung von Ozeanen

Bei der CO<sub>2</sub>-Düngung von Ozeanen wird der Ozean mit Eisen, Phosphat oder Stickstoff „gedüngt“, um das Algenwachstum zu beschleunigen und durch die Photosynthese der Algen vermehrt CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu binden. Damit das CO<sub>2</sub> langfristig gespeichert wird, müssen die abgestorbenen Algen und Ausscheidungen ihrer Konsumenten auf den Ozeanboden sinken (über Jahrhunderte kommt es auch dann zu einem langsamen Abbau und folglich einer Wiederfreisetzung des CO<sub>2</sub>). Erste Erfahrungen zeigen allerdings, dass ein wesentlicher Teil der Biomasse nicht auf den Meeresboden absinkt. Zudem müsste eine enorme Fläche gedüngt werden, um einen nennenswerten Effekt zu erzielen.<sup>253</sup> Ferner kann die Ozeandüngung zur Störung von Meeresökosystemen, zum Rückgang der Biomasseproduktion in nachgelagerten Gebieten und zur Versauerung der Ozeane führen.

#### Natürliche Optionen für negative Emissionen

Bei den natürlichen Optionen für negative Emissionen geht es primär um die Nutzung und Vergrößerung natürlicher Kohlenstoffsinken, also das biologische Einfangen von CO<sub>2</sub> durch Photosynthese und Speicherung in Form lebendiger oder toter Biomasse. Anders als die technologischen Optionen lassen sich die natürlichen Optionen i.d.R. direkt, schnell und zu geringeren Kosten umsetzen. Die natürlichen Senken sind jedoch reversibel, d.h. das entzogene CO<sub>2</sub> kann unter Umständen schnell wieder freigesetzt werden. Dies gilt insbesondere, da natürliche Senken Umwelteinflüssen stärker ausgesetzt sind als die technologischen Optionen. Dies muss bei der Ausgestaltung von entsprechenden Maßnahmen berücksichtigt werden, um mittel- bis langfristig eine positive Klimawirkung zu erzielen. Als natürliche Optionen in Betracht kommen insbesondere:

##### – Verbesserte Waldbewirtschaftung

Verbesserte Waldbewirtschaftung, bspw. durch Aufforstung und Wiederaufforstung

##### – Renaturierung von Feuchtgebieten

Dies kann zum einen durch die Wiederbewässerung von Mooren und das Management von Küstenökosystemen, bspw. Mangrovenwäldern (blauer Kohlenstoff), erfolgen.

##### – Erhöhung des Kohlenstoffgehalts von Böden

Erhöhung des Kohlenstoffgehalts von Böden, bspw. durch günstige Bewirtschaftungsmethoden und Zwischenkulturen. Dies steigert die Bodenfruchtbarkeit und damit die landwirtschaftliche Produktion, verbessert die Wasser- und Luftqualität, benötigt aber zusätzlich Dünger.

##### – Einlagerung von Pflanzenkohle im Boden

Die Herstellung der Kohle erfolgt durch sauerstoffarme Verbrennung (Pyrolyse) von Biomasse bei Temperaturen von 300 bis über 600 Grad C. In den Boden eingebracht, kann Pflanzenkohle das Pflanzenwachstum beschleunigen, die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens erhöhen und N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen des Bodens reduzieren. Die Herstellung von Pflanzenkohle konkurriert mit BECCS, da beide Optionen nachhaltige Biomasse benötigen. Die mit der Biomasse zusammenhängenden Nachteile von BECCS treffen damit grundsätzlich auch auf die Pflanzenkohle zu.

##### – Speicherung von Kohlenstoff in langlebigen Holzprodukten

Durch den vermehrten Einsatz von langlebigen Holzprodukten können CO<sub>2</sub>-intensive Produkte, bspw. Stahl und Zement im Bauwesen, teilweise substituiert werden. Wird das genutzte Holz am Ende des Produktlebenszyklus verbrannt und das abgeschiedene CO<sub>2</sub> in Form von Pflanzenkohle oder durch CCS im Boden eingelagert, werden dem Kreislauf CO<sub>2</sub>-Emissionen langfristig entzogen.

#### 04.4 Power-to-X

Der Begriff Power-to-X (PtX), also Strom-zu-X, steht für verschiedene Verfahren der Produktion von synthetischen gasförmigen oder flüssigen chemischen Energieträgern bzw. Brenn-, Kraft- und (chemischen) Grundstoffen unter Einsatz von elektrischem Strom, der idealerweise aus erneuerbaren Quellen stammen sollte. Bspw. kann Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen zur Wasserstoffgewinnung, Kohlenwasserstoffsynthese und Ammoniak-synthese genutzt werden. Die gewonnenen Grundstoffe (u. a. Wasserstoff, Methanol, Ammoniak) können in der chemischen Industrie genutzt werden oder als Energieträger dienen. Anwendungsfelder betreffen u. a. die Nutzung von Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen in Fahrzeugen sowie die Nutzung von Ammoniak in der Düngemittelproduktion. Zur Erzeugung von PtX-Produkten kommen vorrangig Weltregionen mit einem deutlichen Überschuss an günstigem erneuerbarem Strompotenzial in Frage, bspw. der Mittlere Osten oder Nordafrika.

#### Vorteile und mögliche Einsatzbereiche

PtX-Technologien bieten zwei zentrale Vorteile. Zum einen wird die Energie durch die Umwandlung transport- und lagerfähig. Zum anderen bieten PtX-Technologien die Perspektive, treibhausgasneutrale chemische Energieträger und Chemierohstoffe auf Basis erneuerbarer Energiequellen, wie z.B. Wind- und Solarenergie, bereitzustellen. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, wird aus heutiger Sicht zukünftig ein großtechnischer Einsatz dieser Technologien notwendig sein.

Allerdings können in vielen Bereichen durch die Direktnutzung von erneuerbarem Strom deutliche Effizienz- und Kostenvorteile gegenüber PtX-Produkten erzielt werden, bspw. in der Wärmeerzeugung oder in großen Teilen der Mobilität. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass Herstellung, Speicherung (Kasten 24) und Transport von PtX-Produkten sehr kosten- und energieintensiv sind. Bspw. ist die Herstellung von PtX-Produkten grundsätzlich mit größeren Umwandlungsverlusten und höheren Kosten verbunden als die Förderung und Produktion fossiler Energieträger.

Infolge der geringeren energetischen Effizienz und der höheren Kosten ist PtX in vielen Bereichen keine sinnvolle Option. Der Einsatz von PtX-Produkten ist deshalb besonders in Bereichen anzustreben, die nicht mit erneuerbarem Strom direkt betrieben werden können. Dies betrifft bspw. den Luft- und Schwerlastverkehr, der sich aufgrund hohen Gewichts und erforderlicher Reichweite für eine direktelektrische Nutzung aus heutiger Sicht nicht eignet, sowie den Einsatz von PtX-Produkten als Chemierohstoff (z. B. bei der Düngemittelherstellung).

#### Kasten 24

##### Speichermöglichkeiten von Wasserstoff

Als leichtestes Element und auch leichtestes sowie reaktives Molekül ist die sichere Speicherung von Wasserstoff eine Herausforderung. Verflüssigung (bei -253 Grad C) und Druckspeicherung bei typischerweise 200 bis 700 bar werden technisch beherrscht und eingesetzt. Weitere mögliche Speicheroptionen sind Ammoniak, flüssige organische Substanzen, die effizient katalytisch hydriert und dehydriert werden können, und Alkohole. Einige dieser Speicheroptionen sind mit Start-ups in einer „Experimentierphase“ am Markt. Allen diesen Optionen ist gemein, dass das Be- und Entladen der Speicher aus physikalischen und chemischen Gründen mit erheblichem Energieaufwand verbunden ist, was wiederum die Attraktivität des Energieträgers reduziert. Ammoniak als recht effizienter Speicher ist selbst wieder ein toxisches Gas, Luftschadstoff und Treibhausgas mit der Gefahr, dass Verluste zur Bildung von troposphärischem Ozon sowie Lachgas mit hohem Treibhausgaspotenzial führen können. LOHC haben den Vorteil, dass es sich um relativ ungefährliche Flüssigkeiten handelt, deren Handhabung einfach ist und die mit bereits existierender Infrastruktur transportiert werden können. An all

diesen Verfahren wird geforscht. Z. T. werden sie bereits im World Energy Outlook als Optionen für den Langstreckentransport von Wasserstoff mit Tankschiffen, z. B. von Australien nach Japan, genannt.

Eine weitere, seit Jahrzehnten beforschte Option sind Metallhydride, die den Vorteil hoher Stabilität und volumetrischer Energiedichte, aber den Nachteil niedriger gravimetrischer Energiedichte, langsamer Be- und Entladung und hoher Kosten mit schwer einschätzbaren Reduktionspotenzialen haben. Ob und welche Methoden der Wasserstoffspeicherung sich letztlich für welche Anwendungszwecke entwickeln und durchsetzen werden, ist aus heutiger Sicht noch offen. Die künftige Ausgestaltung und Ausprägung des Energiesystems wird aber eng mit den Ausprägungen und Eigenschaften sowohl von Strom- als auch von Wasserstoffspeichern zusammenhängen. Hier ist eine aktive Forschungsunterstützung notwendig, um die entsprechenden Technologieentwicklungen voranzutreiben und die Veränderungen des Gesamtsystems eng mit diesen zu verzahnen, sodass möglichst wenig Reibungsverluste entstehen.

252 Strefler et al., 2018; PIK, 2018.

253 UBA, 2011.

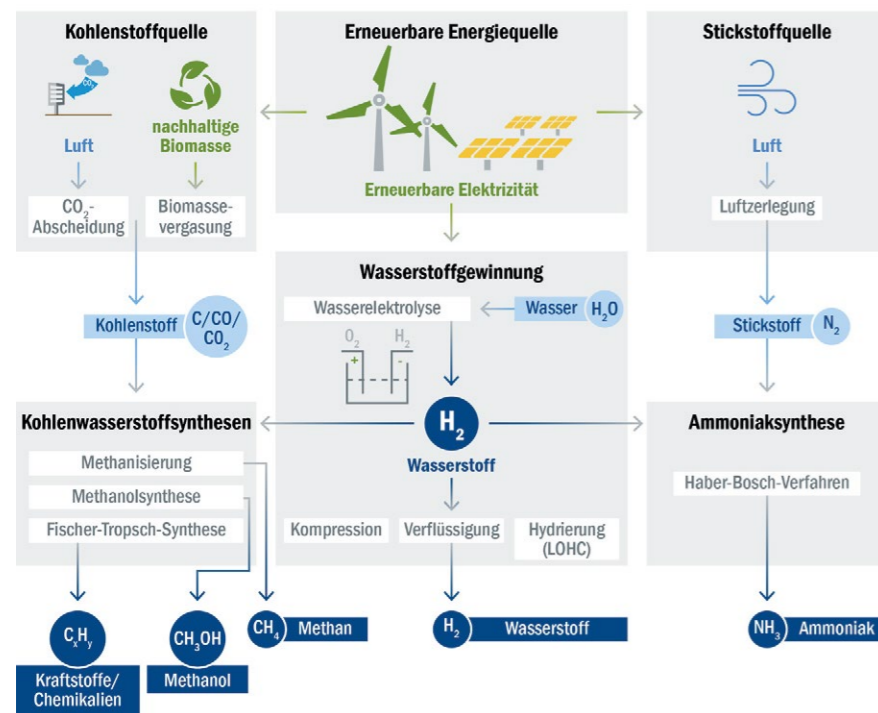
#### 04.4.1 Wasserstoff als grundlegendes PtX-Produkt und zentraler Energieträger

Wasserstoff ist das grundlegende PtX-Produkt. Er kann entweder direkt energetisch oder stofflich genutzt werden oder als Basis zur Herstellung komplexerer PtX-Syntheseprodukte wie Kohlenwasserstoffe oder Ammoniak dienen (Abbildung 56). Die Herstellung von PtX-Wasserstoff kann per Definition (Power-to-X) nur durch die Elektrolyse von Wasser erfolgen, also durch die Spaltung von Wasser mithilfe von elektrischer Energie. Für treibhausgasneutrale PtX-Produkte wird dazu Strom aus erneuerbaren Energiequellen benötigt. Der so gewonnene Wasserstoff wird auch „grüner“ Wasserstoff genannt.<sup>254</sup>

Vor der Nutzung wird der Wasserstoff zumeist gespeichert und transportiert. Aufgrund seiner geringen volumenbezogenen Energiedichte wird Wasserstoff dafür bspw. komprimiert (200 bis 700 bar), verflüssigt (-253 Grad C) oder in flüssige organische Trägermedien überführt (Liquid organic hydrogen carriers, LOHC). Letztere Option erscheint aufgrund ihrer Energiedichte, ihres relativ einfachen Handlings und der Möglichkeit, Abwärme für den Ausspeicherprozess zu nutzen, vielversprechend. In Bayern erfolgen hier derzeit dynamische Entwicklungsarbeiten. Die Speicher- bzw. Transportoptionen sind alle mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden. Die heutigen Erzeugungskosten von grünem Wasserstoff aus Wasserelektrolyse liegen in der Größenordnung des Drei- bis Vierfachen der Kosten von grauem Wasserstoff aus Erdgas-Dampfreformierung. Selbst bei günstigen Bedingungen, wie stark sinkenden Kosten für Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien, wird grüner Wasserstoff noch etwa das Doppelte kosten wie grauer Wasserstoff.<sup>255</sup>

Abbildung 56

#### Power-to-X: Umwandlung elektrischer Energie zu Brenn-, Kraft- und Grundstoffen



Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, 2020

<sup>254</sup> Im Unterschied zu strombasiertem „grünem“ Wasserstoff wird „grauer“ Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern und Wasser hergestellt und ist damit kein PtX-Produkt.

<sup>255</sup> Prognos, 2019.

#### 04.4.2 PtX-Syntheseprodukte

Neben der direkt energetischen oder stofflichen Nutzung kann der Wasserstoff in PtX-Syntheseprodukte überführt werden, bspw. Kohlenwasserstoffe oder Ammoniak. Dies bietet den entscheidenden Vorteil, dass die bestehenden Infrastrukturen (z. B. in der Luftfahrt) weiter genutzt werden können. Zudem können PtX-Syntheseprodukte gegenüber Wasserstoff mit geringem Aufwand gespeichert und transportiert werden, u. a. weil sie bei Umgebungsbedingungen mit hoher Energiedichte vorliegen.

Die für die Überführung von Wasserstoff in PtX-Syntheseprodukte erforderliche Prozesskette bedingt jedoch einen zusätzlichen Aufwand an Anlagen und Energie. So müssen zur Synthese in der Regel Reaktionsumgebungen mit hohen Temperaturen (mehrere 100 Grad C) und hohem Druck erzeugt und (meist teure) Katalysatoren eingesetzt werden. Die molekularen Bausteine, die dazu notwendig sind, bspw. Stickstoffatome im Fall von Ammoniak und Kohlenstoffatome im Fall von Kohlenwasserstoffen, liegen nicht einfach vor, sondern müssen mit erheblichem Aufwand gewonnen werden. Die Synthese ist – wie jede chemische Umwandlung – mit energetischen Verlusten verbunden.

#### Kohlenwasserstoffe

Wasserstoff kann mit Kohlenstoff zu Kohlenwasserstoffen synthetisiert werden. Die drei zentralen Kohlenwasserstoff-Synthesen und Syntheseprodukte sind:

- Methanisierung zur Erzeugung von Methan
- Methanolsynthese zur Erzeugung von Methanol, einem einfachen Alkohol
- Fischer-Tropsch-Synthese, durch die ein Gemisch aus kurz- bis langkettigen Kohlenwasserstoffen (Wachse) erzeugt wird. Dieses Gemisch, das sogenannte Fischer-Tropsch-Syncrude, muss in Raffinerieprozessen weiter „umgebaut“ werden, um z. B. synthetische Kraftstoffe wie Benzin, Diesel, Kerosin oder Chemierohstoffe bereitzustellen.

Mit ca. 86 Prozent macht Kohlenstoff den größten Massenanteil von Kohlenwasserstoff aus. Bei der energetischen Nutzung von Kohlenwasserstoffen wird der Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub> frei. Für die Treibhausgas-Neutralität der PtX-Kohlenwasserstoffe ist deshalb neben der Nutzung von grünem Wasserstoff die Kohlenstoffquelle entscheidend. Als nicht fossile Kohlenstoffquellen kommen nachhaltige Biomassen oder aus der Luft abgeschiedenes CO<sub>2</sub> infrage (zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung siehe Teil III Kapitel 04.3).<sup>256</sup> Der technische Entwicklungsstand der CO<sub>2</sub>-basierten Pfade befindet sich noch in der Pilotphase: Das gilt sowohl für die CO<sub>2</sub>-Gewinnung aus der Luft als auch für die Synthesen auf Basis von H<sub>2</sub> mit CO<sub>2</sub> als Ausgangsstoff. Dazu kommt die Tatsache, dass eine großtechnische PtX-Gesamtanlage, die alle Teilkomponenten der Prozesskette in Kombination mit erneuerbarer Stromerzeugung abbildet, bis heute nicht existiert. Zur Realisierung der notwendigen Lernkurven ist der Aufbau entsprechender Anlagen erforderlich. Insgesamt sind Kohlenwasserstoffe, die mit grünem Wasserstoff hergestellt werden, aufgrund des enormen technischen und energetischen Aufwandes gegenwärtig und wohl auch in naher Zukunft erheblich teurer als fossile Alternativen, die das Resultat geologisch vorzeitlicher Synthese- und Konzentrationsprozesse sind.

#### Ammoniak

Wasserstoff kann mit Stickstoff zu Ammoniak (NH<sub>3</sub>) synthetisiert werden. Stickstoff wird mit technisch ausgereiften Verfahren und geringerem Aufwand als CO<sub>2</sub> aus der Luft gewonnen. PtX-Ammoniak auf Basis von Elektrolysewasserstoff kann – chemisch gesehen – die meist auf fossilen Energieträgern (Erdgas) basierende Ammoniakproduktion ersetzen. Diese macht heute einen Anteil von ein bis drei Prozent des globalen Energieverbrauchs aus. Rund 80 Prozent des Ammoniaks werden für die Düngemittelherstellung eingesetzt. Diese Mengen durch PtX-Ammoniak zu ersetzen, bietet ein großes Potenzial zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen. Eine darüber hinausgehende zukünftige Nutzung als Energieträger z. B. in der Schifffahrt erscheint aus heutiger Sicht vielversprechend, erfordert aber entsprechend angepasste Motoren und weitere Forschung und Entwicklung in diesem Bereich.

<sup>256</sup> Die Verwendung einer fossilen industriellen CO<sub>2</sub>-Quelle (vgl. CCS in Teil III Kapitel 04.3.2) führt zu einer entsprechenden Treibhausgas-Emission bei der weiteren Verwendung des PtX-Energieträgers. Deshalb sind bei einer fossilen CCU-Quelle Standards bezüglich der Zuordnung der fossilen Emission zu Produkt oder Emissionsquelle notwendig. Für treibhausgasneutrale Energieträger kommen fossile Kohlenstoffe oder CO<sub>2</sub>-Quellen langfristig nicht infrage.

#### 04.4.3 Hemmnisse bei der Herstellung und Nutzung von PtX-Produkten

Szenarien, in denen ein „Weiter-Wie-Bisher“ in Bezug auf die Nutzung fossiler Brenn- und Kraftstoffe damit begründet wird, dass zur Treibhausgas-Reduktion in Zukunft auf „grüne“ PtX-Produkte umgestellt werden könne, bergen ein Lock-in-Risiko: Wenn aufgrund der Perspektive „grüner Brenn- und Kraftstoffe“ notwendige Anpassungen der Endanwendungen (z. B. Antriebsarten von Fahrzeugen, Heizungstechnik) und Infrastrukturen (Strom- und Gasnetze) ausbleiben oder verzögert werden, kann es deutlich teurer oder sogar unmöglich werden, die Klimaschutzziele zu erreichen.

Ein weiteres Risiko besteht in der hohen Unsicherheit bezüglich der realisierbaren Mengen und der erreichbaren Kostenniveaus, sowohl bezüglich der Gestehungskosten von PtX-Produkten als auch der Transportkosten von Wasserstoff. Je komplexer die Verfahrensketten, desto größer sind diese Unsicherheiten. Darum ist aus dieser Perspektive die direkte Nutzung von Wasserstoff dem Einsatz in PtX-Prozessketten grundsätzlich vorzuziehen. Allerdings sind Transport und Lagerung bei Wasserstoff technisch aufwendiger als bei Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak und erfordern neue und teure Infrastrukturen, z. B. angepasste bzw. neue Pipelinetekniken, Kompressions- oder Verflüssigungsanlagen und Transportschiffe.

#### 04.5 Einzelmaßnahmen: „Wäs wäre, wenn ...?“

Im Folgenden erfolgt unter Nennung der getroffenen Annahmen eine näherungsweise Bestimmung des Klimaschutzbeitrags bzw. der Treibhausgas-Einsparungen ausgewählter Einzelmaßnahmen aus den Bereichen private Haushalte, Gebäude und Verkehr. Dabei ist zu beachten, dass dabei keine Gesamtsystembetrachtungen erfolgen, sondern ausgewählte Aspekte nur punktuell und in ihren direkten Wirkungen, also ohne ihre Auswirkungen auf andere Bereiche, beleuchtet werden. Das bedeutet, dass z. B. die Berechnungen zum Ausbau von Photovoltaikanlagen auf Dächern die damit verbundenen Folgen für Freiflächen-Photovoltaikanlagen nicht abbilden. Gesamtsystembetrachtungen erfolgen im Rahmen der Szenarienanalysen in Teil IV. Gesellschaftliche Fragen, insbesondere bezüglich der Akzeptanz, stehen nicht im Fokus der Studie (für einen kurzen Abriss siehe Teil III Kapitel 05).

<p><b>Photovoltaik</b> Was wäre, wenn in jedem selbstgenutzten Ein- und Zweifamilienhaus (EZFH) mit geeigneter Dachausrichtung eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher eingerichtet wäre?</p> <p>Seite 139</p>	<p><b>Raumtemperatur</b> Was wäre, wenn die Raumtemperatur in Wohngebäuden im Winter auf 19 Grad C begrenzt würde?</p> <p>Seite 139</p>	<p><b>Wohnfläche</b> Was wäre, wenn im Durchschnitt 15 Prozent weniger Wohnfläche pro Kopf bewohnt würde und sich ansonsten an der Beheizungsstruktur nichts verändern würde?</p> <p>Seite 140</p>
<p><b>Ölheizungen</b> Was wäre, wenn alle Ölheizungen durch Brennwert-, Gas- oder Erneuerbare-Energien-Heizungen ersetzt würden?</p> <p>Seite 140</p>	<p><b>Flugverkehr</b> Was wäre, wenn wir dauerhaft deutlich weniger fliegen oder pendeln würden (Dienstreisen / Urlaub)?</p> <p>Seite 141</p>	<p><b>Homeoffice</b> Was wäre, wenn wir dauerhaft mehr per Telearbeit erledigen bzw. mehr aus dem Homeoffice arbeiten würden?</p> <p>Seite 142</p>

#### Was wäre, wenn in jedem selbstgenutzten Ein- und Zweifamilienhaus (EZFH) mit geeigneter Dachausrichtung eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher eingerichtet wäre?

**Die Maßnahme könnte unter den getroffenen Annahmen zu einer Gesamtstromerzeugung aus Photovoltaik von 87 TWh und damit zu einer Einsparung von ca. 35 Megatonnen CO<sub>2</sub> führen, was etwa zwölf Prozent der heutigen Emissionen aus der Stromerzeugung entspricht.**

##### Berechnung und Annahmen

Laut Statistischen Bundesamt gab es zum Ende des Jahres 2019 rund 19,1 Mio. Wohngebäude. Hiervon enthalten 12,8 Mio. eine Wohnung und 3,1 Mio. zwei Wohnungen. Im Mittel hat ein Wohngebäude mit einer Wohnung einen Grundriss von etwa 129 m<sup>2</sup>, womit eine durchschnittliche Dachfläche (bei Dachneigung) von etwa 155 m<sup>2</sup> angenommen werden kann. Im Mittel hätte ein Einfamilienhaus (EFH) somit genug Platz, um eine 8 kW Photovoltaikanlage – mit einem Flächenverbrauch von etwa 50 m<sup>2</sup> – auf der jeweils ertragreichsten Dachflächenseite anzubringen. Dabei erreicht eine nach Osten oder Westen ausgerichtete Photovoltaikanlage etwa 80 Prozent des Ertrags, welche eine nach Süden ausgerichtete Photovoltaikanlage erzielen würde. Unter Berücksichtigung einer gleichverteilten Dachflächenausrichtung und unter der Annahme, dass etwa 20 Prozent der Gebäude u. a. durch Verschattung nicht für das Anbringen von Photovoltaikanlagen in Betracht kämen, gäbe es in Deutschland 12,7 Mio. Ein- bis Zweiparteien-Wohngebäude mit einem mittleren Stromertrag von rund 850 kWh/kW (Volllaststunden), einer Gesamtleistung von 102 Gigawatt und einer Gesamt-

stromerzeugung von 87 TWh. Etwa 34 TWh Strom wurden 2019 durch Photovoltaik-Dachanlagen produziert – allerdings auch auf Nichtwohngebäuden.

In einem flexiblen System mit genügend Batteriespeichern würde sich die Stromerzeugung durch die Photovoltaikanlage in das Stromsystem integrieren lassen. In Bezug auf die heutige Stromerzeugung würde der zusätzlich auf Dächern produzierte Strom konventionell erzeugten Strom verdrängen und somit bei einem Ausstoß konventioneller Energieerzeugung von etwa 600 g CO<sub>2</sub>/kWh (ein Gaskraftwerk hat einen Ausstoß von etwa 400 g CO<sub>2</sub>/kWh, ein Steinkohlekraftwerk etwa 750 g CO<sub>2</sub>/kWh) etwa 35 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> einsparen, was etwa zwölf Prozent der Emissionen aus der heutigen Stromerzeugung entspricht. Im Jahr 2050 benötigen wir laut der vom BDI (2018) publizierten Klima- und Energieszenarien 114 TWh Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen. Die 87 TWh der EZFH sind davon ein wichtiger Bestandteil.

#### Was wäre, wenn die Raumtemperatur in Wohngebäuden im Winter auf 19 Grad C begrenzt würde?

**Die Maßnahme könnte unter den getroffenen Annahmen zu einer Einsparung von ca. 5,5 Megatonnen CO<sub>2</sub>Äq. führen, was etwa 0,6 Prozent der gesamten Emissionen Deutschlands und acht Prozent der mit der Raumwärme in Wohngebäuden verbundenen Emissionen entspricht.**

##### Berechnung und Annahmen

Die mit der Raumwärmeerzeugung in privaten Haushalten verbundenen Treibhausgas-Emissionen betragen derzeit knapp 69 Megatonnen CO<sub>2</sub>Äq. Die winterlichen Heiztemperaturen bewegen sich in einer Verteilung mit einem Mittelwert von 20 Grad C. Wenn die Heiztemperaturen auf 19 Grad C abgesenkt werden, bedeutet dies für diejenigen Haushalte, die mittlere Heiztemperaturen von ca. 22 Grad C benötigen, eine deutliche Einschränkung des Komforts, für diejenigen, die ca. 20 Grad C benötigen, eine leichte Einschränkung des Komforts und für diejenigen Haushalte, die

mit 18 Grad C oder 19 Grad C auskommen, keine Veränderung. Insgesamt ergibt eine Simulation einer Absenkung der mittleren Heiztemperatur auf 19 Grad C über einen durchschnittlichen Gebäudepark mit heutiger energietechnischer Ausstattung eine mittlere Reduktion von ca. 5,5 Megatonnen CO<sub>2</sub>Äq. – bezogen auf die Emissionen, die mit der Raumwärme in Wohngebäuden verbunden sind, entspricht die Einsparung ca. acht Prozent, bezogen auf die gesamten Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (Stand 2018, aktuelles Treibhausgas-Inventar) etwa 0,6 Prozent.

### Was wäre, wenn im Durchschnitt 15 Prozent weniger Wohnfläche pro Kopf bewohnt würde und sich ansonsten an der Beheizungsstruktur nichts verändern würde?

Die Maßnahme könnte unter den getroffenen Annahmen zu einer Einsparung von ca. 10,5 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. führen, was etwa 1,2 Prozent der gesamten Emissionen Deutschlands entspricht.

#### Berechnung und Annahmen

Eine Reduktion der Wohnfläche um 15 Prozent pro Kopf bedeutet eine Reduktion der Wohnfläche insgesamt und somit auch der beheizten Fläche um 15 Prozent. Bei gleicher Beheizungsstruktur bedeutet dies also eine Reduktion der mit der Raumwärmebereitstellung in privaten Haushalten verbundenen Treibhausgas-Emissionen um 15 Prozent, was einer Reduktion um ca. 12,5 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. entspricht. Bezogen auf die gesamten Emissionen in Deutschland von 2018 bedeutet dies eine Reduktion um 1,5 Prozent.

Ergänzend zu dieser statischen Betrachtung muss beachtet werden, dass eine solche Entwicklung über die direkten

Treibhausgas-Emissionen hinaus Folgewirkungen hätte: Angesichts der langfristig stagnierenden und abnehmenden Bevölkerung in Deutschland würde eine so deutliche Reduktion der spezifischen und absoluten Wohnfläche auch eine entsprechende Reduktion der Bau- und Sanierungstätigkeiten bedeuten. Damit verbunden wären entsprechende Effekte bezüglich Wertschöpfung und Beschäftigung sowie Folgeeffekte bei der Reduktion der Emissionen, etwa bei der Zement- und Kalksteinproduktion. Um diese zu beziffern, müssten allerdings detailliertere Szenarien berechnet werden, was den Rahmen dieser Abschätzung sprengen würde.

### Was wäre, wenn alle Ölheizungen durch Brennwert-, Gas- oder Erneuerbare-Energien-Heizungen ersetzt würden?

Die Maßnahme (ohne Erneuerbare-Energien-Heizungen) könnte unter den getroffenen Annahmen zu einer Einsparung von ca. 11,8 Megatonnen CO<sub>2</sub> führen, was etwa 1,4 Prozent der gesamten Emissionen Deutschlands und 14 Prozent der mit der Raumwärme in Haushalten verbundenen Emissionen entspricht.

#### Berechnung und Annahmen

Heute werden ca. 22,6 Prozent der Wohnflächen mit Ölheizungen beheizt. Mit der dadurch erzeugten Raumwärme sind im Mittel Treibhausgas-Emissionen in Höhe von 34,6 Megatonnen CO<sub>2</sub> verbunden. Wenn alle diese Ölheizungen durch moderne Gas-Brennwertheizungen ersetzt würden, betrüge die Einsparung an Treibhausgas-Emissionen ca. 11,8 Megatonnen bzw. 34 Prozent der mit den Ölheizungen in Haushalten verbundenen Emissionen (14 Prozent der insgesamt mit der Raumwärmeproduktion in Haushalten verbundenen Emissionen) – oder 1,4 Prozent der gesamten Emissionen in Deutschland.

Bei einem vollständigen Ersatz durch Heizsysteme auf Basis erneuerbarer Energien (Wärmepumpen, Solarthermie, in kleinen Anteilen ggf. auch Holz) würden die kompletten mit den Ölheizungen verbundenen Emissionen in Höhe von 34,6 Megatonnen abgebaut. Es blieben dann immer noch 47,5 Megatonnen an Emissionen aus der Raumwärmeerzeugung (i. W. aus Erdgas) zu reduzieren.

Zu diesen sehr pauschalen Abschätzungen sind folgende Anmerkungen zu ergänzen:

- Nicht alle Ölheizungen lassen sich durch Gasheizungen ersetzen, da es Orte und Gebiete gibt, die keinen Zugang zu Gas-Verteilnetzen haben.

257 BDH, 2019.

### Was wäre, wenn wir dauerhaft deutlich weniger fliegen oder pendeln würden (Dienstreisen / Urlaub)?

Die Einschränkung der dienstlichen und freizeitorientierten Reisaktivitäten um etwa die Hälfte könnte unter den getroffenen Annahmen zusammengenommen zu einer Einsparung von insgesamt ca. 45,2 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. führen, was etwa fünf Prozent der gesamten Treibhausgas-Emissionen Deutschlands entspricht.

#### Berechnung und Annahmen

Die Treibhausgas-Emissionen des Verkehrssektors inklusive der internationalen Verkehre (Absatzprinzip) betrug 2018 rund 196 Megatonnen, was etwa 22 Prozent der deutschen Treibhausgas-Emissionen inklusive der internationalen Verkehre entspricht. Dazu trug der Pkw-Verkehr 97 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. und der Luftverkehr 34 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. bei, wobei der nationale Flugverkehr gerade mal zwei Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. ausmachte (der Rest in Höhe von etwa 65 Megatonnen wird v. a. von leichten und schweren Nutzfahrzeugen verursacht). Zu den Emissionen des (nationalen und internationalen) Luftverkehrs tragen Personenflüge 23 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. bei (Auswertung gem. Treibhausgas-Inventar des UBA).

Von den (mit den Weglängen gewichteten) Pkw-Fahrleistungen gemäß „Mobilität in Deutschland 2017“ entfallen 25 Prozent auf „Arbeit“ (Pendelwege), 24 Prozent auf „Dienstreisen, Geschäftliches“ und 24 Prozent auf die Kategorie „Freizeit“. Bei einer proportionalen Zurechnung der Emissionen würde dies 47,5 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. für „Pendeln und Dienstreisen“ sowie 23,3 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. für die freizeitorientierten Fahrten bedeuten.

Von den Verkehrsleistungen der Personenflüge entfallen etwa 30 Prozent auf „Dienstreisen“ und 54 Prozent auf die Kategorie „Urlaub, Ausflug, touristische Kurzreise“. Bei einer proportionalen Zurechnung der Emissionen von Personenflügen würde dies 6,9 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. für „Dienstreisen“ sowie 12,4 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. für die freizeitorientierte Flüge bedeuten.

Eine Einschränkung der Dienstreisen um die Hälfte würde somit dauerhaft zu einer Reduktion von etwa 23,8 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Pkw-Verkehr und 3,5 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Luftverkehr führen. Bezogen auf die gesamten bundesweiten Treibhausgas-Emissionen (inkl. internationale Verkehre) bedeutet dies eine Einsparung von ca. drei Prozent.

Eine Reduktion der freizeitorientierten Aktivitäten per Pkw und Flugzeug um ungefähr die Hälfte (und ggf. Ersatz durch emissionsfreie Aktivitäten oder Nutzung des öffentlichen Verkehrs) würde zu einer Einsparung von ca. 17,9 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq. oder zwei Prozent der deutschen Treibhausgas-Emissionen führen.



### Was wäre, wenn wir dauerhaft mehr per Telearbeit erledigen bzw. mehr aus dem Homeoffice arbeiten würden?

**Eingesparte Pendelwege mit dem Pkw können einen direkten Beitrag zur Einsparung von Treibhausgasen leisten. In einer langfristigen Betrachtung des gesamten Verkehrssystems und -verhaltens ist bislang jedoch völlig unklar, ob diese Einsparungen auch insgesamt langfristig realisiert und erhalten bleiben können.**

#### Überlegungen

Wie im obigen Beispiel zur Reduktion von Pendler- und Flugstrecken durch Dienstreisen und Urlaub abgeschätzt, können eingesparte Pendelwege mit dem Pkw einen direkten Beitrag zur Einsparung von Treibhausgasen leisten: Insgesamt entfallen von Pkw-Fahrleistungen in Deutschland rund 25 Prozent auf Pendelwege und 24 Prozent auf „Dienstreisen, Geschäftliches“ (siehe oben). Bei einer proportionalen Zurechnung der Emissionen bedeutet dies 47,5 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äq., die bei einer Reduktion der Pendlerstrecken und Dienstreisen anteilig eingespart werden könnten.

In einer langfristigen Betrachtung des gesamten Verkehrssystems und Verkehrsverhaltens ist bislang jedoch völlig unklar, ob diese Einsparungen insgesamt langfristig realisiert und erhalten bleiben können. Der Wegezweck „Arbeit“ kommt im individuellen Verkehrsverhalten nicht nur von der täglichen Verkehrsleistung her eine besondere Bedeutung zu, dieser Wegezweck beeinflusst auch in hohem Maße längerfristige Entscheidungen der Haushalte bzgl. Wahl des Wohnstandorts und Fahrzeugbesitz. Hier wirken gegenläufige Dynamiken:

- Wenn mehr Telearbeit geleistet wird und die Pendelwege mit dem Pkw dadurch deutlich reduziert werden, könnte z.B. die Entscheidung fallen, den Pkw abzuschaffen und somit das gesamte Mobilitätsverhalten zu verändern. Unter diesen Bedingungen könnten weitere Einsparungseffekte auch bei allen anderen Wegezwecken die Folge sein und dadurch sehr starke Beiträge zur Verkehrsreduzierung verzeichnet werden.
- In der Verkehrswissenschaft ist das (scheinbare) Paradoxon des „konstanten Reisezeitbudgets“ bekannt, wonach die für Fortbewegung bzw. Reisen aufgewendete Zeit über Jahrzehnte und in unterschiedlichen räumlichen Kontexten sehr stabil ist.<sup>258</sup> Das bedeutet, dass sich der Aktionsradius der Menschen tendenziell vergrößert und weitere Strecken zurückgelegt werden, wenn Verkehrsmittel schneller werden. Ebenso kann die durch Telearbeit eingesparte Zeit für Pendelwege für andere Wegezwecke (z.B. Freizeit) verwendet werden. Untersuchungen z.B. der Auswirkungen des Online-Handels weisen auf solche Effekte hin, wenn bestimmte Wegezwecke an Bedeutung verlieren.
- Ähnliche Effekte können bei steigender Telearbeit vermutet werden, wenn die Bedeutung der Arbeitswege bei der

Wohnstandortwahl abnimmt: Wenn mehr Telearbeit geleistet wird, könnten dafür seltenere, aber längere Pendelwege in Kauf genommen werden (z. B. ein- bis zweimal pro Woche zwei Stunden statt täglich eine Stunde pendeln). Damit könnte langfristig die Entscheidung fallen, einen Wohnort weiter vom Arbeitsort entfernt zu suchen, der möglicherweise andere Vorteile hat – z. B. kostengünstigeres Wohnen, Garten etc. Durch diese räumliche Verlagerung können die verkehrlichen Effekte von selteneren Arbeitswegen (zunächst sinkende Verkehrsleistung) komplett aufgehoben oder sogar überkompensiert werden.

- Besonders gravierend wird dieser Effekt dann sein, wenn Haushalte vor diesem Hintergrund aus den zentralen Orten heraus in ländlichere Regionen ziehen. Dies kann das gesamte Verkehrsverhalten stark negativ beeinflussen: Zunächst können die vorher täglich mit dem Umweltverbund unternommenen Arbeitswege durch zwar seltene, aber längere und mit dem Auto unternommene Wege ersetzt werden. Zudem ist zu bedenken, dass in ländlichen Regionen die zu erbringende Verkehrsleistung bei allen Wegezwecken höher ist als in urbanen Räumen und diese oftmals mangels ÖPNV-Alternativen mit dem Auto unternommen werden. Somit kann langfristig die Auto-Abhängigkeit sogar steigen. Dieser Effekt wird dann besonders starke Auswirkungen zeigen, wenn die tägliche Pendelbeziehung zwischen Wohnort auf dem Land und Arbeitsort in der Stadt zwar weitgehend aufgelöst wird, die Abhängigkeit von den zentralen Funktionen der Kernstadt aber erhalten bleibt und ein Großteil der Erledigungen immer noch dort unternommen wird. Dabei darf nicht vergessen werden, dass der Weg zur Arbeit sehr häufig auch mit anderen Aktivitäten (Einkaufen, Erledigungen, Freizeit) verknüpft wird. Wenn der Weg zur Arbeit wegfällt, werden diese Wege dennoch unternommen und durch eine veränderte Wohnstandortwahl können diese langfristig länger und auto-affiner geprägt sein.

Somit kann nach aktuellem Forschungsstand keine abschließende Bewertung zur Telearbeit vorgenommen werden: Zwar sind die kurzfristig positiven Effekte auf die Verkehrsleistung unstrittig, in einer längerfristigen Perspektive bestehen aber erhebliche Zweifel, ob Telearbeit eine Ausnahme zum bislang über Jahrzehnte hinweg „konstanten Reisezeitbudget“ darstellt oder ob gar Gefahren von Rebound-Effekten überwiegen.

## 05 Die Rolle und Schaffung von gesellschaftlicher Akzeptanz und Begeisterung

### Gesellschaftliche Akzeptanz ist von zentraler Bedeutung für die Umsetzung der erforderlichen Veränderungen in der Breite.

Damit die Klimaschutzziele erreicht werden können, müssen verhaltens- und technologiebezogene Veränderungen in der Breite umgesetzt und große Infrastrukturen (z.B. Windparks, Stromtrassen) auf- und ausgebaut werden. Dies erfordert über die inhaltliche und fachliche Begründung hinaus ein gewisses Maß an gesellschaftlicher Akzeptanz, verstanden als aktive Auseinandersetzung und in der Folge entwickelte Zustimmung.<sup>259</sup> Bestenfalls geht die Akzeptanz über die bloße Bereitschaft, Veränderungen mitzutragen, hinaus und mündet in Begeisterung.

Der deutschen Gesellschaft wird traditionell eine skeptische Einstellung gegenüber vergleichbaren Veränderungen im Allgemeinen sowie technologischen Neuerungen im Speziellen zugeschrieben. Im Extremfall kann dies zu einer Blockadehaltung führen, die unter dem Schlagwort der German Angst auch international Bekanntheit erlangt hat.<sup>260</sup> Zwar lässt sich dieser Umstand als allgemeines Phänomen nur bedingt empirisch aufzeigen.<sup>261</sup> Dennoch geht auch nach jüngeren Befragungen eine Mehrheit der Bevölkerung in Deutschland davon aus, dass Technik für jede Einzelne und jeden Einzelnen mehr Probleme und Zwänge schafft als löst.<sup>262</sup>

#### Individueller Nutzen bleibt oft abstrakt

Der Versuch, die individuelle Akzeptanz aktiv und positiv zu beeinflussen, steht vor einer besonderen Herausforderung: Entgegen der negativen Wahrnehmungen, dass entstehende Probleme insbesondere die Einzelnen treffen, wird der erwartete Mehrwert primär auf Basis eines gesellschaftlichen Nutzens bewertet. Um Akzeptanz zu schaffen, ist es aber wichtig, auch mögliche individuelle Nutzen bzw. Mehrwerte aller Zielgruppen zu vermitteln. Dies betrifft insbesondere den Bereich der Verhaltens- und Konsummuster (Teil III Kapitel 02): Bleiben die Auswirkungen des eigenen Handelns (z.B. Energiesparen im eigenen Haushalt, Veränderungen in der eigenen Mobilität und Ernährung) abstrakt und auf die Allgemeinheit bezogen, so lässt sich die Diskrepanz zwischen einer positiven Bewertung von angestrebten Veränderungen einerseits und einem dennoch nicht veränderten individuellen Verhalten andererseits kaum auflösen.<sup>263</sup>

Die Darstellung und Vermittlung konkreter individueller Nutzen von Klimaschutz-Maßnahmen ist nicht einfach, da sie im Wesentlichen einen globalen und zukünftigen Nutzen stiften (Abschwächung der globalen Erwärmung und Klimafolgen). Der Zusammenhang zwischen dem individuellen Handeln und dem daraus entstehenden Nutzen oder Schaden für den Klimaschutz bleibt für den Einzelnen häufig komplex und abstrakt.

#### Vermittlung von Akzeptanz und individuellem Nutzen durch Bürgerbeteiligungen

Den individuellen Nutzen von klimafreundlichem Verhalten erkennbar zu machen und damit Akzeptanz zu befördern, ist zunächst eine kommunikative Aufgabe. Dabei kommt der Transparenz eine bedeutende Rolle zu: Es gilt, die notwendigen Informationen ansprechend und nachvollziehbar aufzubereiten, die Komplexität zu reduzieren, ohne zu verfälschen, sowie der jeweiligen Zielgruppe den individuellen Mehrwert des entsprechenden Produkts oder der Maßnahme zu vermitteln. All dies sind zugleich Faktoren, die die Akzeptanz unmittelbar beeinflussen.<sup>264</sup> Eine transparente Information kann damit bereits eine Grundlage für gesellschaftliche Veränderungsprozesse darstellen. Sie kann nicht nur das Vertrauen in die verantwortlichen Institutionen steigern, sondern auch komplexe Wirkungszusammenhänge erklären und Verständnis produzieren. Daneben kann Sensibilität für Betroffenheiten und die Auswirkungen des individuellen Handelns geschaffen werden.

Der Versuch, Akzeptanz durch ein transparentes Informieren herzustellen, entspricht indes lediglich der untersten Stufe möglicher Beteiligungsformen.<sup>265</sup> Dabei ist die Akzeptanz umso höher, je intensiver die Form der Mitwirkung ist. Für gewöhnlich werden drei Intensitätsgrade der Mitwirkung (Abbildung 57) unterschieden:<sup>266</sup>

- Information als Unterrichtung eines Gegenübers,
- Konsultation, bei der die Beteiligten ihre Perspektiven einbringen können, sowie die
- Kooperation, bei der darüber hinaus ein Dialog sowie eine Mitsprache bei der Entscheidungsfindung auf Augenhöhe ermöglicht wird.

<sup>266</sup> BMVI, 2014.

Diese Benennung der drei Stufen ist keineswegs die einzig mögliche, kann jedoch als typisch betrachtet werden. Insbesondere die Stufen der Information und der Konsultation sind weit verbreitet und bereits bei Arnstein (1969) enthalten. Ebenfalls in Anlehnung an ihre ursprüngliche Beteiligungsleiter lassen sich darüber hinaus auch weitere Stufen differenzieren, die an dieser Stelle jedoch zwecks Vereinfachung durch die Kooperation gebündelt werden.

<sup>259</sup> Kleidat, 2011.

<sup>260</sup> Bode, 2006.

<sup>261</sup> Obschonka et al., 2017.

<sup>262</sup> acatech und Körber Stiftung, 2018.

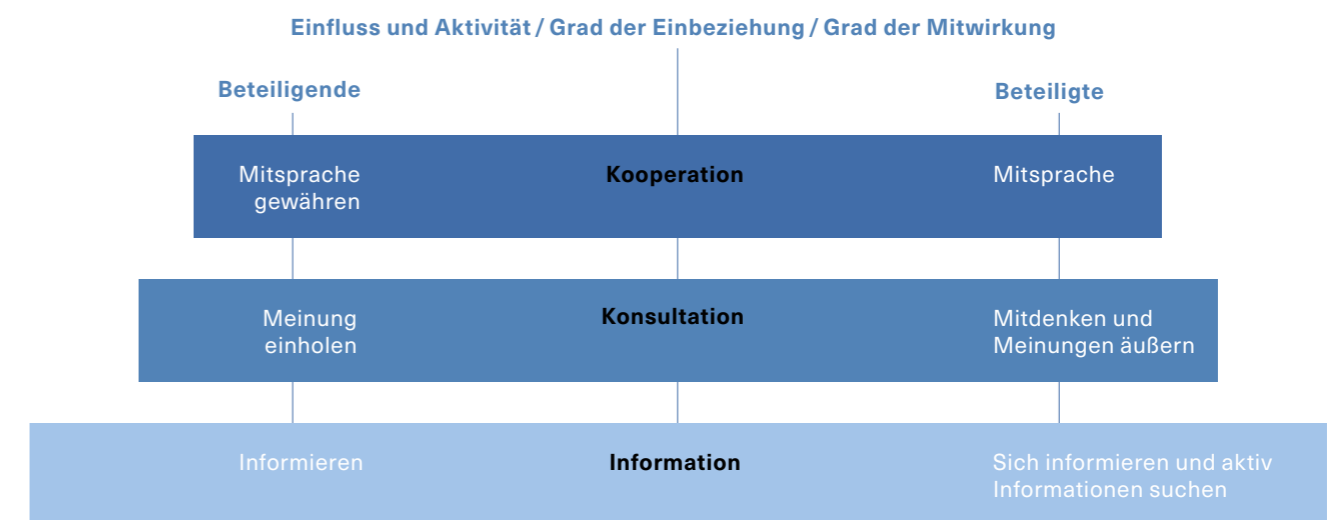
<sup>263</sup> Renn, 2008.

<sup>264</sup> vbw / Prognos, 2019.

<sup>265</sup> Arnstein, 1969.

Durch die individuelle Erfahrung des eigenen Einflusses auf die Ergebnisse wird, über den gesellschaftlichen Mehrwert hinaus, auch ein positiver Eindruck, einen eigenen wichtigen Beitrag geleistet zu haben, vermittelt und somit ein individueller (akzeptanzfördernder) Nutzen erkannt.<sup>267</sup> Damit bietet eine intensive Bürgerbeteiligung umfangreiche Potenziale für die Schaffung von Akzeptanz für klimafreundliche Technologien und Verhaltens- und Konsummuster.

Abbildung 57  
Mögliche Stufen der Beteiligung



Quelle: BMVI, 2014; eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Verstärkter Einsatz von Bürgerbeteiligungen bei klimarelevanten Maßnahmen

Der verstärkte Einsatz von Bürgerbeteiligung ist auch einer veränderten gesellschaftlichen Erwartungshaltung geschuldet. An die Stelle eines dauerhaften Engagements in Vereinen, Verbänden oder Parteien tritt vermehrt der Wunsch, punktuell mitsprechen zu können, sobald eine gefühlte Betroffenheit durch ein Vorhaben vorliegt. Bspw. sind dort, wo Anwohnende nicht nur über die kommunale Planung zum Aufbau von Ladestationen für Elektroautos informiert werden, sondern ein aktives Mitspracherecht bekommen und einen Einfluss auf die Entscheidung zu den genauen Standorten gewinnen, sowohl eine stärkere Akzeptanz für die neue Infrastruktur als auch eine verstärkte Nutzung derselben zu erwarten. Positive Erfahrungen mit Bürgerbeteiligungen gesammelt haben bereits Übertragungsnetzbetreiber, die beim Stromnetzausbau inzwischen verstärkt die lokale Öffentlichkeit intensiv und frühzeitig beteiligen, um so eine erhöhte Akzeptanz des Vorhabens zu schaffen und mögliche juristische Auseinandersetzungen und Verzögerungen im späteren Projektverlauf zu vermeiden. In Bayern bieten bspw. die etwa 260 Energiegenossenschaften (das sind rund ein Viertel aller deutschen Energiegenossenschaften) die Möglichkeit, sich vor Ort für den Umbau der Energieversorgung zu engagieren, und fördern damit die Akzeptanz für lokale Energieprojekte. Diese Möglichkeiten nehmen bereits über 35.000 Privatpersonen in Bayern wahr.<sup>268</sup>

<sup>267</sup> Straßburger und Rieger, 2014.

<sup>268</sup> Genossenschaftsverband Bayern, 2017.

# IV

## Klimapolitische Szenarien

Aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der künftigen Rahmenbedingungen werden in diesem Studienteil verschiedene Szenarien entwickelt, die aufzeigen, wie sich unterschiedlich starke globale Kooperation beim Klimaschutz auf Technologieeinsatz, erreichbare Emissionsreduktionen (und damit verbunden Temperaturregimes) sowie volkswirtschaftliche Veränderungen und die Emissionen entlang der Wertschöpfungskette in Deutschland und auf Bayern auswirken. Im Kapitel 4 werden die einzelnen Szenarien entlang dieser Kategorien ausführlich durchdekliniert. Um die Informationen umfassend und zusammenhängend darzustellen, werden Redundanzen dabei bewusst nicht vermieden. Der schnelle Leser findet in den folgenden Kapiteln 01.1 bis 01.5 die einzelnen Szenarien überblicksartig beschrieben und in Kapitel 2 einen Vergleich und eine Einordnung der Szenarienergebnisse. Kapitel 3 zieht ein prägnantes Fazit aus der Szenarienanalyse.

### Kapitel in der Übersicht

01	Überblick zu den Grundlagen und zur Ausgestaltung der Szenarien	148
01.1	Zusammenfassung Szenario 1: „Business as Usual“ („BaU“)	153
01.2	Zusammenfassung Szenario 2: „Einheitliches Vorgehen“	154
01.3	Zusammenfassung Szenario 3: „Europa geht voran“	156
01.4	Zusammenfassung Szenario 4: „Deutschland geht voran“	158
01.5	Leitfragen	160
02	Szenarienvergleich und Einordnung der Ergebnisse	162
02.1	Unterschiedliche Annahmen und Inputs für die Quantifizierung	162
02.2	Ergebnisvergleich	165
02.3	Einordnung der volkswirtschaftlichen Effekte	175
03	Fazit aus der Szenarienanalyse	180
04	Szenarien im Detail	184
04.1	Szenario 1: Business as Usual	184
04.2	Szenario 2: Einheitliches Vorgehen	212
04.3	Szenario 3: Europa geht voran	234
04.4	Szenario 4: Deutschland geht voran	253

# 01 Überblick zu den Grundlagen und zur Ausgestaltung der Szenarien

**Aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der künftigen Rahmenbedingungen werden die künftigen Entwicklungen anhand von vier verschiedenen klimapolitischen Szenarien betrachtet.**

## Inhalte

01.1	Zusammenfassung Szenario 1: „Business as Usual“ („BaU“)	153
01.2	Zusammenfassung Szenario 2: „Einheitliches Vorgehen“	154
01.3	Zusammenfassung Szenario 3: „Europa geht voran“	156
01.4	Zusammenfassung Szenario 4: „Deutschland geht voran“	158
01.4	Leitfragen	160

## Methodische Vorbemerkung

Derzeit existieren zwar grundsätzliche Ziele, die mittlere Erwärmung der Erdoberfläche und Atmosphäre bis 2100 auf möglichst unter 2 Grad C Temperaturdifferenz (gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter) zu begrenzen (Teil II Kapitel 04). Die Umsetzung dieser Ziele in verbindliche Politik – sowohl auf nationaler als auch auf supranationaler Ebene – ist jedoch ein langwieriger Aushandlungsprozess. Gegenwärtig sind weltweit und auch in Deutschland noch keine verbindlichen Rahmensetzungen vorhanden, die mit einiger Sicherheit langfristig die Treibhausgas-Emissionen so reduzieren würden, dass die für die Ziele erforderlichen Treibhausgas-Budgets eingehalten würden. Das Abkommen von Paris (Kasten 12 in Teil II Kapitel 04) hat zwar das entsprechende Klimaziel festgelegt, zu dem sich zahlreiche Staaten bekannt haben. Die Umsetzung in abgestimmte nationale und internationale verbindliche Politiken steht jedoch noch aus. Mit jedem weiteren verstreichenden Jahr wird die Umsetzung dringlicher, da die weltweiten Emissionen nach wie vor zunehmen, statt stark abzunehmen, wie es notwendig wäre. Es besteht derzeit eine große Unsicherheit darüber, wie sich die Rahmenbedingungen weiterentwickeln werden.

## Szenarienuntersuchungen

Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, werden Szenarienuntersuchungen angestellt. Mit diesen wird untersucht, wie sich unterschiedliche Zielsetzungen und/oder Rahmenbedingungen auf Technologieeinsatz, erreichbare Emissionen bzw. Emissionsreduktionen, damit verbundenen Temperaturregimes sowie volkswirtschaftliche Veränderungen auswirken. In dieser Studie wird also die Frage gestellt, wie sich unterschiedlich starke globale Kooperation beim Klimaschutz insbesondere auf Deutschland und auf Bayern auswirken. Diese Fragestellung wird konkretisiert in vier verschiedene Szenarien, in denen „Eckpunkte“ des möglichen Kontinuums von Kooperationsmöglichkeiten festgelegt und untersucht werden.

## Vorhandene Szenariensätze

Aufgrund des knappen zeitlichen Rahmens für die Studie wurden keine neuen Szenarien erstellt, sondern zum Zeitpunkt der Studiererstellung relativ aktuelle vorhandene Szenariensätze für die Welt und für Deutschland kombiniert, und zwar für die Welt aus dem World Energy Outlook 2019 der internationalen Energieagentur<sup>269</sup>, und für Deutschland aus der Arbeit „Klimapfade für Deutschland“, die im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI) von Boston Consulting Group (BCG) und Prognos erarbeitet und Anfang 2018 veröffentlicht wurden.<sup>270</sup> Auf diese Szenarienarbeiten muss zurückgegriffen werden, da zum Zeitpunkt der Erarbeitung dieser Studie noch kein vollständig durchgerechnetes Szenario für vollkommene Klimaneutralität in Deutschland veröffentlicht vorlag. Kurz vor Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit wurde allerdings das erste vollständig durchgerechnete Klimaneutralitäts-Szenario für Deutschland veröffentlicht.<sup>271</sup> Es konnte allerdings nicht weiter ökonomisch ausgewertet werden, da die Grundlagen für eine solche Auswertung in diesem Szenario nicht ermittelt wurden. Details zu den jeweiligen Szenarien sind den recht ausführlichen Veröffentlichungen zu entnehmen. Das Klimaneutralitäts-Szenario – insbesondere die Ergänzungen und Verschärfungen gegenüber dem „95 %-Pfads“ aus dem BDI-Szenariensatz – wird in Kasten 25 kurz beschrieben.

## Kasten 25

### Aktuelle Szenarienarbeit „Klimaneutrales Deutschland“

Das neu veröffentlichte Szenario „Klimaneutrales Deutschland“<sup>272</sup> baut stark auf Szenario 2 auf. Ein Szenario, von dem ausgegangen wurde, war das dem Szenario 2 zugrunde liegende Szenario „95 %-Pfad“ aus dem BDI-Szenariensatz. Gegenüber dem dort eingesetzten technologischen Pfad werden Ergänzungen und Verschärfungen eingesetzt:

- Insgesamt erfolgt eine durchgängige konsequente Ausschöpfung der vorhandenen und zumeist kostengünstigen Effizienzpotenziale.
- Die Effizienzmaßnahmen in Gebäuden werden extrem konsequent umgesetzt – jedes Mal, wenn eine Investition in die Gebäudehülle oder die Heizungsanlage getätigt wird, wird die energetisch bzw. emissionsbezogen günstigste Lösung umgesetzt. Ab 2025 werden keine neuen Heizungsanlagen, die mit fossilen Energieträgern (Heizöl oder Erdgas) betrieben werden, mehr eingebaut. Die Fernwärme wird ausgebaut und aus erneuerbaren und Abwärmquellen betrieben.
- Im Verkehrssektor steigt der Anteil der alternativen Antriebe schneller als im 95 %-Pfad. Ab 2035 werden bei Personenkraftwagen nur noch alternative Antriebe zugelassen. Es wird von effizienter Verkehrsorganisation und einer leichten Verschiebung im Modal Split ausgegangen. Im Güterverkehr werden neben Oberleitungen größere Mengen Wasserstoff eingesetzt. Im Luft- und Seeverkehr sowie teilweise im grenzüberschreitenden Schwerverkehr kommen importierte flüssige synthetische Energieträger (Power-to-Liquid, PtL) zum Einsatz.
- Im Industriesektor erfolgen die größten Veränderungen in der Stahl- und Chemieindustrie. Roheisen wird bis 2050 nur noch per Direktreduktion mit Wasserstoff produziert, in der Chemie wird der heute stofflich eingesetzte „graue“ Wasserstoff durch „grünen“ ersetzt. Gerade bezüglich der Kunststoffe erfolgt eine konsequente Kreislaufwirtschaft, die große Mengen des eingesetzten Kohlenstoffs im Kreislauf führt. Als Energieträger werden Biomassen, Strom und Wasserstoff eingesetzt. CCS wird nur noch bei der Zementindustrie sowie bei der verbleibenden Abfallverbrennung eingesetzt. Die mitverbrannten biogenen Fraktionen führen dazu, dass hier Kohlenstoff-Senken entstehen.
- Der Strom wird bis 2050 vollständig erneuerbar produziert. Bis 2030 wird sich die Erzeugung aus erneuerbaren Energien gegenüber dem Stand von 2018 verdoppeln. Der Kohleausstieg wird bis 2030 vollzogen. Notwendige Backup-Kapazitäten werden mit Wasserstoff betrieben, der als saisonaler Speicher dient.
- Der in dem neuen System benötigte Wasserstoff wird zu einem Drittel inländisch erzeugt, zu zwei Dritteln importiert, vor allem aus dem EU-Ausland.
- Das Energiesystem ist im Jahr 2050 vollständig dekarbonisiert, aber bei den Prozessemissionen, den F-Gasen und in der Landwirtschaft bleiben unvermeidbare Restemissionen, die mit Negativ-Emissionstechnologien

kompensiert werden müssen. Hierfür werden BECCS (zum Beispiel wird das CO<sub>2</sub> aus den Abgasen biomassebetriebener Heizkraftwerke abgeschieden und gespeichert) sowie DACCS eingesetzt.

- In der Landwirtschaft und Ernährung werden die sich heute abzeichnenden Trends moderat fortgeschrieben – leicht verringerter Milchkonsum sowie eine Verschiebung des Fleischverzehrs hin zum Geflügel. Darüber hinaus wird ein effizientes Düngermanagement mit verringertem Gülleeinsatz (mehr Güllevergärung verringert Methanemissionen und reduziert Stickstoffeinträge) umgesetzt. Die Rückgänge der Tierbestände ermöglichen ein verändertes Flächenmanagement und veränderte Flächennutzung (Wiedervernässung, mehr Grasland), was weitere Treibhausgaseinsparungen ermöglicht. Dennoch bleiben im Landwirtschaftssektor noch Restemissionen, die kompensiert werden müssen.

Somit werden in Deutschland im Jahr 2050 bilanziell keine Treibhausgas-Emissionen mehr ausgestoßen bzw. die Restemissionen an anderer Stelle kompensiert. Dieses Szenario wurde unter der Rahmenbedingung erarbeitet, dass möglichst keine gestrandeten Investitionen entstehen, d.h. es müssen bereits ab heute alle Investitionsentscheidungen maximal effizient getroffen werden. Dazu ist es erforderlich, den Aufbau der erneuerbaren Stromerzeugung stark zu beschleunigen. Darüber hinaus wird eine internationale Wasserstoffinfrastruktur (u.a. mit Wasserstoffnetzen) aufgebaut. Es ist wichtig zu erwähnen, dass in diesem Szenario ein mittleres BIP-Wachstum als Prämisse gesetzt wurde und keine Suffizienzmaßnahmen ergriffen wurden. Die Entwicklung z.B. der Verkehrsmengen sowie der spezifischen Wohnflächen pro Kopf entspricht etwa derjenigen der BDI-Szenarien. Lediglich die Flugverkehrsmengen gehen aufgrund der höheren Treibstoffkosten für PtL, die sich notgedrungen auf die Ticketpreise auswirken, moderat zurück.

Dieses Szenario wurde unter der Prämisse der technischen Machbarkeit erarbeitet. Es wurde keine Referenz berechnet, die als Basis für die Ermittlung von Differenzinvestitionen erforderlich ist. Daher kann dieses Szenario nicht analog zu den anderen Szenarien ökonomisch ausgewertet werden. Das Szenario 2 ist aber ein guter Anhaltspunkt. Die Unterschiede zwischen den Szenarien liegen vor allem im stärkeren Ausbau der erneuerbaren Energien, der verstärkten Wasserstoffnutzung sowie den Negativemissionen. Alle drei Faktoren führen zu zusätzlichen inländischen Investitionen in Technologien, die idealerweise in großen Teilen auch im Inland entwickelt und produziert werden. Somit sollten die ökonomischen Auswirkungen angesichts der unterstellten international abgestimmten Rahmenbedingungen und Technologieentwicklungen in eine ähnliche Richtung weisen wie im Szenario 2.

<sup>269</sup> International Energy Agency, World Energy Outlook 2019, www.iea.org/weo.

<sup>270</sup> BDI, 2018.

<sup>271</sup> Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut (2020).

<sup>272</sup> Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut (2020).

Methodisch geht es bei Szenarien immer um den Vergleich der Auswirkungen in energiebezogenen, klimabezogenen und ökonomischen Kategorien unter wohldefinierten Rahmenbedingungen zwischen allen Szenarien beziehungsweise um die Abweichungen gegenüber einer Referenzentwicklung. Das Vorgehen umfasst in diesem Fall der Auswertung der Energie- bzw. Emissionsszenarien schematisch die folgenden Schritte:

- Im ersten Schritt wird eine möglichst gut abgesicherte Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung definiert. Diese stammt zumeist aus den Projektionen der entsprechenden Ämter (Bevölkerung) oder makroökonomischen Modellen (Wirtschaftsentwicklung). Tendenziell stellt diese Entwicklung eine eher konservative Projektion ohne disruptive Ereignisse, also ein „weiter wie bisher“ dar. Aufgrund des Erstellungszeitraums der Szenarien sind die kurzfristigen Auswirkungen der Corona-Pandemie nicht einbezogen. Bis 2030 dürften die gesamtwirtschaftlichen Effekte der Pandemie weitgehend überwunden sein.
- Zu dieser resultierenden Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung (mit Branchenstruktur, Arbeitsplätzen, Investitionen etc.) wird mit Energiesystemmodellen ein detailliertes Energiesystem berechnet. Falls ambitionierte Klimaschutzziele vorgegeben werden, werden entsprechende Technologien eingeführt, um diese zu erreichen. Ggf. kann sich zeigen, dass mit den unter den entsprechenden Rahmenbedingungen verfügbaren Technologien die Ziele nicht oder nicht vollständig erreichbar sind. Aus dem Einsatz der Energieträger folgen die energiebedingten Treibhausgas-Emissionen. Für Deutschland wurde jeweils das gesamte Emissionssystem gemäß Treibhausgas-Bilanz (inklusive Prozessemissionen, Landwirtschaft und Abfall) betrachtet und bilanziert, wenn auch die vorgenannten übrigen Sektoren (außerhalb des Energiesystems) weniger detailliert berechnet wurden als das Energiesystem. In den Szenarien für die Welt, die im World Energy Outlook beschrieben sind, liegt nur das Energiesystem vor.
- Aus den Emissionen folgt eine ungefähre Einordnung in ein erwartetes Temperaturregime.
- Mit dem Umbau des Energiesystems (und ggf. der übrigen Sektoren) gegenüber der Referenzentwicklung ohne Ziele sind Mehrinvestitionen und z.T. auch Minderinvestitionen verbunden sowie Minderverbräuche und Minderimporte fossiler Energieträger. Ggf. werden gegen Ende der Betrachtungszeiträume synthetische Energieträger importiert. Die entsprechenden monetären Größen liegen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden vor.
- Bei den Differenzinvestitionen handelt es sich vor allem um Bau- und Anlageninvestitionen, die in den einzelnen Branchen anfallen. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen dieser Differenzinvestitionen auf die Branchen sowie die Konsumenten werden mit der volkswirtschaftlichen Modellierung berechnet. In Deutschland wird ein Großteil der entsprechenden Investitionsgüter (z.B. Effizienztechnologien, Anlagen der erneuerbaren Energien, Infrastruktur) von inländischen Branchen hergestellt. Hier werden die Kategorien Bruttowertschöpfung, Beschäftigung, Wettbewerbsfähigkeit sowie die Auswirkungen auf Preise und BIP ermittelt.
- Darauf aufbauend werden die Effekte in den Wertschöpfungsketten ausgewählter Branchen in Deutschland und Bayern analysiert.<sup>273</sup>
- Wie in Teil II Kapitel 02.4.1 dargestellt, liegen bislang keine hinreichenden Informationen zu detaillierten volkswirtschaftlichen Klimafolgekosten – Risiken, Schäden und Anpassungserfordernisse, also den Gesamtkosten des Klimawandels – vor. Hier können lediglich grobe Ergänzungen in Form von Wirkungskorridoren auf das Gesamt-BIP angegeben werden sowie auf die qualitativen Beschreibungen der Wirkungen und Wirkungsketten aus Teil II Kapitel 02.4.1 verwiesen werden.

Dieses Vorgehen ist insgesamt seit Jahrzehnten abgesichert und liefert für Klimaschutzszenarien bei leicht unterschiedlichen Modellierungsansätzen und -vorgehen der verschiedenen Studienautoren ähnliche Ergebniskorridore. Das liegt unter anderem daran, dass das Energiesystem in hochindustrialisierten Ländern (und damit in der weltweiten Wirtschaftsstruktur) nur einen kleinen Anteil an Wertschöpfung und Beschäftigung ausmacht. Verglichen mit den ohnehin von der Wirtschaft getätigten Investitionen sind die notwendigen Mehrinvestitionen für Klimaschutztechnologien klein; sie liegen im einstelligen Prozentbereich. Daher sind die Rückwirkungen auf das Wirtschaftssystem insgesamt klein, und weitere Rückkopplungsschleifen würden keine höhere Genauigkeit ermöglichen. Größere Unterschiede entstehen in den Erzeugerländern von Kohle, Erdöl und Erdgas, die eine sehr starke Exportabhängigkeit von diesen Ressourcen aufweisen. Dazu gehören insbesondere Saudi-Arabien und Russland.

<sup>273</sup> Die im Folgenden an einigen Stellen ausgewiesene „reale Wertschöpfung“ ergibt sich durch eine Bereinigung der nominalen Wertschöpfung um den Einfluss sektorspezifischer Preisniveaus.

Die Modellierung und Berechnung der Effekte der Szenarien in den Wertschöpfungsketten im Hinblick auf Wertschöpfung und CO<sub>2</sub>-Emissionen konzentrieren sich auf die Analyse ausgewählter Branchen in Deutschland. Die vorliegenden Szenarienergebnisse und die volkswirtschaftlichen Analyseergebnisse werden dabei in einem multiregionalen Input-Output-Modell weiterverarbeitet und dahingehend ausdifferenziert, welche Veränderungen sie bei Wertschöpfung und CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Branchen unmittelbar generieren und welche Veränderungen indirekt über den Erwerb von Vorleistungen aus dem In- und Ausland hervorgerufen werden.

Die Studie untersucht vier verschiedene klimapolitische Szenarien und ihre Wirkungsketten. Das erste Szenario dient als Referenz für die anderen Szenarien. Die vier Szenarien sind:

1. Szenario „Business as Usual“ („BaU“) → Referenzszenario
2. Szenario „Einheitliches Vorgehen“
3. Szenario „Europa geht voran“
4. Szenario „Deutschland geht voran“

#### Nutzung vorhandener Szenariensätze

Die Szenarien kombinieren jeweils aktuelle vollständig vorliegende Szenariensätze auf Grundlage bestehender Energie- und Klimaanalysen des BDI und des World Energy Outlooks (WEO) (Abbildung 58).<sup>274</sup> Eine solche Kombination von Szenarien ist im streng wissenschaftlichen Sinn der Simulationsszenarien nicht vollständig konsistent. Da vollständig konsistente Szenarien unterschiedlicher Geschwindigkeiten bzw. weltregionaler Beteiligung an den Zielsetzungen komplett durchgerechnet für die ganze Welt nicht auf detaillierter Energiesystem-Ebene vorliegen, erscheint ein solcher Ansatz zur Grobabschätzung angemessen. Aufgrund der unterschiedlichen Methodik und Tiefe der Szenarien vom WEO und BDI sind die Szenarien nicht in allen Technologien und Entwicklungen konsistent zueinander. Aus diesem Grund können im BDI-Szenario für Deutschland einzelne Technologien zum Einsatz kommen, die weltweit in den WEO-Szenarien nicht oder nur in deutlich geringerem Ausmaß eine Durchdringung erfahren. Unterschiede gibt es ebenfalls beim Zieljahr, da die Szenarien des WEO in den meisten Darstellungen nur bis 2040 verfügbar sind, die BDI-Szenarien jedoch auf das Zieljahr 2050 hin orientiert und durchgerechnet sind.

#### Ausgestaltung der Szenarien

Die Ausgestaltung der Szenarien unterscheidet sich hinsichtlich der gesetzten Reduktions- bzw. Temperaturziele und der Umsetzungsgeschwindigkeiten der einzelnen Länder. Zudem werden je nach Szenario unterschiedliche Technologien zu verschiedenen Zeiten in unterschiedlichem Ausmaß eingesetzt. Dabei wird grundsätzlich angenommen, dass erforderliche Technologien und Veränderungen in der Infrastruktur (z. B. Ausbau erneuerbarer Energien) von der Gesellschaft akzeptiert werden.<sup>275</sup> Die unterschiedlichen Temperaturziele werden nicht mit detaillierten politischen Instrumentenpaketen ausgestaltet, sondern als – vereinfachtes – Hauptinstrument werden jeweils unterschiedliche Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Preise in den verschiedenen Staaten hinterlegt. Mit diesen hängen die Weltmarktpreise der fossilen Energieträger zusammen. Im Detail werden zusätzliche Instrumente erforderlich sein, um die Ziele zu erreichen. (Diesen Anforderungen wird zum Beispiel in der Ausgestaltung der nationalen Energie- und Klimaschutzpläne Rechnung getragen, die jedoch zum Zeitpunkt der Studiererstellung noch nicht quantifiziert vorlagen.)

Bei der quantitativen Analyse der Szenarien unberücksichtigt bleiben die Kosten des Nichthandelns, da diese nicht hinreichend quantifiziert werden können. Diese werden jeweils als Korridor in den derzeit verfügbaren Abschätzungen erwähnt:

- Das „BaU-Szenario“ lässt eine Erwärmung bis über 4 Grad C zu, hier wird mit Verweis auf die PESETA Studie<sup>276</sup> die Abschätzung der Klimawandelkosten für Europa vorgestellt.
- Für die Erwärmung von mehr als 2 Grad C, aber weniger als 4 Grad C (Szenario „Deutschland geht voran“ und Szenario „Europa geht voran“) wird eine Reihe von Untersuchungen für die globalen, europäischen, deutschen und bayrischen wirtschaftlichen Auswirkungen kurz zusammengefasst.

<sup>274</sup> BDI, 2018; International Energy Agency, 2019.

<sup>275</sup> Zur Rolle gesellschaftlicher Akzeptanz siehe Kapitel 05.

<sup>276</sup> <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/climate-change-impacts-and-adaptation-europe>

– Die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von einer Erwärmung unter 1,5 Grad C (Szenario „Einheitliches Vorgehen“) sind gering und ähneln der heutigen Situation für Deutschland mit gelegentlichen Hitzewellen, Trockenheit und Stürmen.

Einen Überblick über die möglichen Folgen und Kosten des Klimawandels bietet Teil II Kapitel 02.4.1. Den Stand der Wissenschaft zu den jeweiligen Auswirkungen der gesetzten Reduktions- bzw. Temperaturziele auf Mensch und Umwelt ausführlich darzustellen, würde ohnehin den Umfang der vorliegenden Studie sprengen. Zur Orientierung erfolgt

in Abbildung 58 eine begründete Einordnung der mit den Szenarien einhergehenden Veränderungen von Klima, Klimafolgen und Anpassungsbedarf. Aufgrund von Unsicherheiten über die genaue Klimawirkung der Emissionsminderungen kann die globale Erwärmung bis 2100 dabei nur in Bandbreiten angegeben werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Szenarien überblicksartig beschrieben (Kapitel 01.1 bis 01.5); eine detaillierte Darstellung der einzelnen Ergebnisse erfolgt in Kapitel 04. Kapitel 03 zieht ein Fazit aus der Szenarienanalyse.

Abbildung 58  
Überblick über die Ausgestaltung der klimapolitischen Szenarien

	Szenario 1 „Business as Usual“	Szenario 2 „Einheitliches Vorgehen“	Szenario 3 „Europa geht voran“	Szenario 4 „Deutschland geht voran“
Szenariensatz Deutschland	BDI Referenzszenario	BDI „95 %-Klimapfad“	BDI „95 %-Klimapfad“	BDI „80 %-Klimapfad“
Szenariensatz Europa	WEO „Current Policies Scenario“	WEO „Sustainable Development Scenario“	WEO „Sustainable Development Scenario“	WEO „Stated Policies Scenario“
Szenariensatz Rest der Welt	WEO „Current Policies Scenario“	WEO „Sustainable Development Scenario“	WEO „Stated Policies Scenario“	WEO „Stated Policies Scenario“
Globale Erwärmung	ca. 4,1 Grad C bis 4,8 Grad C	ca. 1,5 Grad C bis 2,0 Grad C	ca. 2,8 Grad C bis 3,2 Grad C	ca. 2,8 Grad C bis 3,2 Grad C
Folgen des Klimawandels	sehr hoch	gering	stark	stark
Anpassungsbedarf	sehr hoch	gering	stark	stark

Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

Das o.g. neue Szenario „Klimaneutrales Deutschland“<sup>277</sup> verschärft das Szenario 2. Es geht von starker internationaler Kooperation, sowohl bei den Klimaschutzzielen und -anstrengungen als auch bei der Entwicklung der Lösungstechnologien, insbesondere Wasserstoff und PtX, aus. Inhaltlich setzt es auf den Entwicklungen des genannten 95 %-Pfades auf, um einerseits vollständige Treibhausgas-

Neutralität bis 2050 zu erreichen und andererseits auch einen steileren Absenkpfad zu gehen, mit dem eine Reduktion von 65 % bis 2030 erreicht wird. Die übrigen Kategorien (Szenariensatz Europa, Szenariensatz Welt, Klimaauswirkungen und Anpassungsbedarf) sind sehr ähnlich wie in Szenario 2.

**01.1 Zusammenfassung Szenario 1: „Business as Usual“ („BaU“)**

**Referenz**

Das erste Szenario dient als Referenz für die anderen Szenarien. In dem Szenario wird als Voraussetzung angenommen, dass es neben den bereits (Zeitpunkt 2016) in der Umsetzung befindlichen politischen Instrumenten keine zusätzlichen Einsparungen bzw. Klimaschutzmaßnahmen geben wird. Die Energiewende verläuft also ungefähr in derselben Geschwindigkeit wie bisher. Damit gibt es in diesem Szenario keine expliziten Zielvorgaben bzw. werden die bekannten Ziele nicht erreicht. Um dieses Szenario abzubilden, dient das BDI „Referenzszenario“ für Deutschland als Grundlage. Das Referenzszenario antizipiert neben den bereits bestehenden Maßnahmen nur Teile des aktuellen Klimapakets, ist also zwar robust, aber aus heutiger Sicht ein wenig veraltet. Für die restlichen Länder wird das WEO „Current Policies Scenario“ herangezogen, das die gegenwärtigen Politiken bzw. Pfade widerspiegelt, jedoch die heutigen politischen Absichten und Ziele nicht berücksichtigt.

**Wachstumstrends**

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Wachstumstrends der letzten Jahre und Jahrzehnte insgesamt fortsetzen. Die Branchenstrukturen in den Industrieländern entwickeln sich relativ stabil – die energieintensiven Branchen stagnieren etwa, während die weniger energieintensiven und wissensintensiveren Branchen weiterhin deutlich wachsen und dabei auch das Wachstum in den vorgelagerten Wertschöpfungsketten antreiben. Dienstleistungen wachsen damit insgesamt etwas stärker als Industrie. Die Schwellenländer entwickeln ihre Industrien, Wohlstand und insbesondere Mittelschichten mit entsprechenden Bedürfnissen an Mobilität, Wohnfläche und Konsum wachsen, wenn auch das Niveau insgesamt deutlich niedriger bleibt als in den entwickelten Industrieländern. Die Entwicklungsländer in Afrika, Südamerika sowie zurückgefallene zentralasiatische Staaten entwickeln sich langsam und erreichen bei Weitem nicht die Wohlstandsniveaus der heutigen Schwellenländer.

**Emissionshandelssystem**

Energiepolitisch bleibt in Europa das Emissionshandelssystem etwa auf heutigem Niveau mit relativ niedrigen CO<sub>2</sub>-Preisen bestehen, nationale CO<sub>2</sub>-Preise für die Non-ETS-Sektoren werden nicht eingeführt. Es werden keine darüber hinausgehenden internationalen oder multilateralen Instrumente eingeführt, sodass Industrien im internationalen Wettbewerb verstärkte klimaschonende Maßnahmen nicht umsetzen.

**Klimaschutzanstrengungen fortsetzen**

In Deutschland und in Europa sowie in einigen wichtigen Industrieländern werden somit die bereits vorhandenen Klimaschutzanstrengungen fortgesetzt, Effizienztechnologien werden in etwa dem gleichen Masse wie in den vergangenen 10 Jahren weiter umgesetzt und allmählich weiterentwickelt. Die Elektromobilität wird allmählich in

den Markt eingeführt, es kommt jedoch nicht zu einem kompletten Umbau des Verkehrssystems. In der Industrie werden weiterhin effiziente Querschnittstechnologien eingeführt, jedoch kommt es nicht zu radikalen Prozessumstellungen. Auch erneuerbare Energien werden in nahezu allen Industrieländern (einschließlich China) weiter ausgebaut, jedoch wird nicht das gesamte Stromsystem erneuerbar.

Insgesamt spielen die fossilen Energieträger in diesem Szenario bis 2040 weiterhin die dominante Rolle, vor allem in der Stromerzeugung der Schwellenländer (Kohle), im Verkehr (Mineralölprodukte) sowie bei der industriellen Prozessenergie (Kohle und Gas). Der Anteil der erneuerbaren Energien wächst, der Anteil der Kernenergie bleibt weiterhin weltweit klein.

**Emissionsanstieg**

Die Emissionen steigen weltweit an, was vor allem auf die Industrialisierungs- und Aufbaueffekte in den Schwellenländern zurückzuführen ist. In Europa und in Deutschland sinken sowohl die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch die indirekt in der Wertschöpfungskette generierten CO<sub>2</sub>-Emissionen zum Teil deutlich. Dies liegt daran, dass sich hier einerseits in den letzten Jahrzehnten, verbunden mit der Globalisierung und der internationalen Arbeitsteilung, die Branchenstruktur verändert hat: Die energieintensiven Industriezweige wachsen weitaus weniger stark als die nicht energieintensiven, dafür wissensintensiven Hochtechnologiebranchen und die Dienstleistungen. Andererseits wird in den meisten europäischen Ländern seit Jahrzehnten eine (aus Sicht der notwendigen Zielsetzungen moderate) Energie- und Klimaschutzpolitik betrieben, die sowohl zu robusten Effizienzentwicklungen als auch zu einem Ausbau der erneuerbaren Energien geführt hat. In Deutschland verzeichnen die energieintensiven Industrien die größten Rückgänge bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen, während bei den weniger energieintensiven Industrien und den Dienstleistungsbranchen die Emissionsreduktionen vor allem in den vorgelagerten Wertschöpfungsbranchen generiert werden.

**Klimaerwärmung um 4,1 bis 4,8 Grad C**

Damit verbunden ist eine starke globale Klimaerwärmung um 4,1 bis 4,8 Grad C bis 2100 gegenüber vorindustriellen Werten. Diese Klimaerwärmung bringt voraussichtlich erhebliche Risiken, Schäden und Anpassungserfordernisse mit sich. Diese werden sich auch deutlich negativ im globalen und nationalen BIP auswirken (im Korridor von ca. zwei bis vier Prozent gemäß der in Teil II Kapitel 02.4.1 zitierten Metastudie). Für Deutschland beziffert die PESETA-III-Studie die erwartete Minderung des BIP infolge extremwetterbezogener Ereignisse auf unter ein Prozent.<sup>278</sup>

## 01.2 Zusammenfassung Szenario 2: „Einheitliches Vorgehen“

Das zweite Szenario ist global das ambitionierteste Szenario. Es geht davon aus, dass die führenden Industrienationen ihre Treibhausgas-Emissionen in Einklang mit den Zielen des Abkommens von Paris reduzieren.<sup>279</sup> Dies bedeutet praktisch Nullemissionen in vielen Bereichen der deutschen Volkswirtschaft bis 2050. Um die Ziele zu erreichen, erfordert das Szenario eine Transformation der Energiesysteme und technologische Veränderungen in erheblichem Umfang.

### Grundlage

Als Grundlage für Deutschland dient der ambitionierte BDI „95%-Klimapfad“, der im Kontext globaler Zusammenarbeit (keine nationalen Alleingänge beim Klimaschutz) eine Reduktion der gesamten Treibhausgas-Emissionen bis 2050 um 95 Prozent gegenüber 1990 vorsieht. Leider liegt zum Zeitpunkt der Studiererstellung noch kein detailliert durchgerechnetes „Netto-Null“- oder „Klimaneutralitäts“-Szenario für Deutschland vor. Auch das „95%-Szenario“ bedeutet praktisch Nullemissionen in vielen Bereichen der deutschen Volkswirtschaft, insbesondere im Energiesystem. Für den Rest der Welt wird das „Sustainable Development Scenario“ des WEO 2019 herangezogen, in dem eine grundlegende Umgestaltung des globalen Energiesystems erfolgt und die drei wichtigsten energiebezogenen SDGs (Social Development Goals bzw. UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung) gleichzeitig erreicht werden (SDG 7: Bezahlbare und saubere Energie, SDG 3: u. a. Reduktion schwerer gesundheitlicher Auswirkungen der Luftverschmutzung, SDG 13: Maßnahmen zum Klimaschutz).

### Ökonomische Entwicklung

Bezüglich der ökonomischen Entwicklung wird von der Voraussetzung ausgegangen, dass sich insgesamt weiterhin die Wachstumstrends im Großen und Ganzen fortsetzen werden und die Entwicklungs- und Schwellenländer ihren ökonomischen Aufholprozess weiterverfolgen. Energie- und klimapolitisch verpflichten sich praktisch alle Länder zum gemeinsamen Erreichen des Klimaschutzziels einer Begrenzung der Treibhausgas-Emissionen so weit, dass die globale Erwärmung bis 2100 zwischen 1,5 und 2 Grad C liegen wird.

### CO<sub>2</sub>-Handel

Stellvertretend für diese internationalen und multilateralen Abkommen steht als Kerninstrument ein über viele Länder ausgeweiteter CO<sub>2</sub>-Handel, der mit ambitionierten Mengenbeschränkungen insgesamt zu hohen CO<sub>2</sub>-Preisen für die Industrieländer (und niedrigeren für die meisten Schwellenländer) führt. Infolgedessen und infolge der sinkenden Nachfrage sinken die Weltmarkt-Preise für fossile Energieträger. Die meisten Industrieländer werden nahezu oder vollständig klimaneutral, in den Schwellenländern werden noch fossile Energieträger eingesetzt. Die CO<sub>2</sub>-Preise sind allerdings nicht hinreichend, um sämtliche benötigten

Investitionen anzustoßen, es werden darüber hinaus auch noch weitere staatliche Instrumente sowie ein Technologietransfer für die Entwicklungs- und Schwellenländer benötigt. Das liegt daran, dass auch bei CO<sub>2</sub>-Handelssystemen die Preise – gerade für die letzten Prozentpunkte an Reduktion – politischer Akzeptanz genügen müssen.

### Klimaneutralität

In Deutschland und in Europa wird Klimaneutralität nahezu erreicht; bei der Verwendung des „BDI-95 %-Szenarios“ bleiben noch Rest-Emissionen in der Landwirtschaft, der Abfallwirtschaft sowie nach Anwendung von CCS residuale industrielle Prozessemissionen bestehen; ähnlich sieht es in Europa aus. In einem strikten „Netto-Null“-Szenario müssten diese noch mit Negativ-Emissionstechnologien oder über internationale Ausgleichs- und Anrechnungsmechanismen international mit entsprechenden Maßnahmen kompensiert werden, solange dies möglich ist.

National erfolgen gegenüber der Entwicklung im „BaU-Szenario“ in allen Branchen erhebliche CO<sub>2</sub>-Minderungen, die zum einen auf die beträchtliche Durchdringung der nationalen Energiesysteme mit erneuerbaren Energien und zum anderen auf eine erhebliche Steigerung von Energieeffizienz und Elektrifizierung bei einem gleichzeitigen Rückgang des Primärenergieverbrauchs der Wirtschaft insgesamt zurückzuführen sind. In den weniger energieintensiven Branchen und im Dienstleistungssektor vollziehen sich die Emissionsreduktionen vor allem über Vorleistungsprodukte, also in den vorgelagerten Branchen der Wertschöpfungskette. Dies liegt daran, dass in diesem Szenario wichtige Handelspartner erhebliche CO<sub>2</sub>-Minderungen erbringen und ihre Güter überall auf der Welt emissionsärmer produzieren.

Technologisch bedeutet das einen extrem konsequenten Einsatz von Effizienztechnologien in Gebäuden und in der Industrie, komplett erneuerbare Wärmeerzeugung (vor allem mit Wärmepumpen und Fernwärme, Biomassen in der Industrie), den Umbau des Verkehrssystems mit starker Elektrifizierung, Oberleitungen sowie Wasserstoff und importierte synthetische Treibstoffe im Schwerkraftverkehr (und im nationalen wie internationalen) Luft- und Seeverkehr. Das Stromsystem wird vollkommen erneuerbar, vor allem mit den Energieträgern Photovoltaik, Wind onshore und offshore. Es ist durch eine hohe nachfrageseitige Flexibilität im Verkehr, bei den Wärmepumpen (ca. zwei Stunden Lastverschiebungsmöglichkeit durch Warmwasserspeicher) sowie durch eine begrenzte Flexibilität in der Industrie (demand side management) gekennzeichnet. Das Stromnetz ist mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Leitungen für den regionalen Stromaustausch ausgebaut und es werden inländisch Wasserstoff und Synthesegas für die Backup-Kapazitäten hergestellt. Diese Produktion und Verwendung wirken somit als kleiner Saisonspeicher.

### Prozessemissionen

In der Industrie werden Prozessemissionen aus der Stahl-, Zement- und Chemieindustrie zu großen Teilen mit CCS abgeschieden und gespeichert. Ein gewisser Anteil des abgeschiedenen CCS wird als Rohstoff wiedereingesetzt (vor allem in der Chemie für die stoffliche Nutzung), insbesondere bei abgeschiedenem CO<sub>2</sub> aus Biomasse-Feuerungen. In einigen Branchen und Werken werden innovative neue Prozesse (z. B. Direktreduktion mit Wasserstoff bei der Stahlproduktion und bei einigen Prozessen der Grundstoffindustrie) umgesetzt, jedoch nicht vollständig, da CCS aus heutiger Sicht auch längerfristig für dieses Szenario die deutlich kostengünstigere Lösung ist. Für den Transport und die Speicherung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> werden europaweite Abstimmungen getroffen und eine entsprechende Pipeline-Infrastruktur ausgebaut und die Speicherkapazitäten gemeinsam bewirtschaftet.

In den Schwellenländern erfolgen diese technologischen Entwicklungen ebenfalls, wenn auch nicht in diesem Tempo. Dies führt dazu, dass weltweit die fossilen Energieträger zurückgehen und der Anteil der Erneuerbaren deutlich steigt.

Damit bleibt die weltweite Emissionsentwicklung in etwa in dem Bereich, der dazu führt, dass die Klimaerwärmung bis 2100 global im Durchschnitt unter 2 Grad C bleibt. Dies bedeutet, dass die klimabedingten Risiken, Schäden und Anpassungserfordernisse der heutigen Situation mit gelegentlichen Hitzewellen, Trockenheit und Stürmen ähneln und sie keine nennenswerten negativen Auswirkungen auf die Bruttowertschöpfung und das BIP haben.

### Investitionen

Der dargestellte technologische Umbau in Deutschland erfordert Investitionen in Effizienztechnologien, erneuerbare Energien und Infrastruktur (ca. 50 – 60 Mrd. Euro pro Jahr). Diesen stehen erhebliche Einsparungen an Importen fossiler gegenüber, sodass die resultierenden direkten Mehrkosten gegenüber dem Referenzszenario insgesamt ca. 150 Mrd. Euro betragen – also jährlich ca. drei bis sieben Mrd. Euro, was z. B. bezogen auf die Gesamtkosten des Energiesystems ein sehr kleiner Wert ist. Die Investitionen sind vor allem Bau-, Anlagen- und Infrastrukturinvestitionen. Die entsprechenden Technologien werden in großen Teilen in Deutschland hergestellt und auch umgesetzt.

Dies ist einer der großen Vorteile von Deutschland als Industrie- und Hochtechnologiestandort. Damit führen diese Investitionen insgesamt mit ihren ebenfalls inländischen Vorketten zu volkswirtschaftlich leicht positiven Effekten in Bezug auf Wertschöpfung und Beschäftigung. In Deutschland profitieren die meisten Branchen von den angenommenen Klimaschutzmaßnahmen infolge zunehmender Exporte und vor den zusätzlichen Investitionen in den Klimaschutz; sie erzielen absolute Zuwächse bei der Bruttowertschöpfung im Vergleich zur Entwicklung im „BaU-Szenario“. Die Energiewirtschaft und die Metallherzeugung verzeichnen dagegen starke Rückgänge bei der Bruttowertschöpfung, da sie erhebliche Investitionskosten für weitere Emissionsminderungen, den Ausbau erneuerbarer Energien (Energiewirtschaft) sowie höhere CO<sub>2</sub>-Preise zu schultern haben.

### CO<sub>2</sub>-intensive Industrien

CO<sub>2</sub>-intensive Industrien stehen vor der Herausforderung, dass die CO<sub>2</sub>-Preise ihre Produkte verteuern und der notwendige Umbau zur Treibhausgas-Neutralität finanziert werden muss. In den Branchen, die die benötigten Technologien herstellen, sowie bei deren Vorlieferanten wird es starke Veränderungen innerhalb der Branchen geben, die in der Branchenbetrachtung nur begrenzt sichtbar werden. Gewinner sind einzelne Bereiche des Maschinen- und Anlagenbaus, die Elektrotechnik, Teile der Baubranche und des Handwerks, Werkstoffe sowie industriennahe und andere Dienstleistungen. Die Automobilindustrie kann zu den Gewinnern gehören, wenn sie die Transformationen durch die veränderten Antriebe konsequent und effizient umsetzt und die Stärken nutzt, die durch die „Ökosysteme“ im schnellen, innovationsfähigen Mittelstand bei den Zulieferindustrien gegeben sind.

Als Anbieter dieser klimaschonenden Technologien wird Deutschland hier auch vom Export profitieren. Insgesamt sind – bezogen auf das BIP, die Branchenstruktur und die Exporte – sowohl die inländischen Investitionen als auch die gesteigerten Exporte anteilig eher klein, im einstelligen Prozentbereich, zumal ein Teil der Klimaschutzziele nur andere Güter ersetzt (Windräder statt Kohlekraftwerk, Elektroauto statt Verbrenner). Das Energiesystem sowie sein Umbau machen in einer leistungsfähigen Volkswirtschaft nur einen kleinen Anteil aus – weitaus weniger als z. B. das Gesundheitssystem.

<sup>279</sup> Da mit den G-20-Ländern bereits rund 80 Prozent der weltweiten Treibhausgas-Emissionen erfasst werden, würde ein gesondertes Szenario, das unterstellt, dass alle Länder weltweit ähnliche Ziele anstreben, keinen wesentlichen Mehrwert für die Studie bringen.

### 01.3 Zusammenfassung Szenario 3: „Europa geht voran“

Im dritten Szenario orientiert sich Europa weiter an der Zielvereinbarung von Paris und begibt sich auf den dafür notwendigen Zielpfad. Es kommt jedoch nicht kurzfristig zu internationalen oder multilateralen verbindlichen Abstimmungen für die Umsetzung, jedenfalls nicht bis ca. 2030. Weltweit (außerhalb Europas) werden nur die bereits angekündigten und absehbaren klima- und energiepolitischen Maßnahmen eingeführt. Neue Maßnahmen, die darüber hinausgehen und zur klimapolitischen Zielerreichung beitragen, werden jedoch nicht umgesetzt. Europa geht also mit höheren Ambitionen und größerer Umsetzungsgeschwindigkeit voran als die restlichen Länder (mindestens in den Jahren bis 2030, danach bis zum Erreichen etwaiger Kippunkte).

#### Ambitioniertes Ziel der Europäer

Als ambitioniertes Ziel der Europäer dient prinzipiell das anvisierte Ziel der Klimaneutralität bis 2050. Allerdings existieren hierzu derzeit (noch) keine entsprechenden detaillierten und abgesicherten Szenariensätze für das gesamte Treibhausgas-System (Energie, Prozessemissionen, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und sonstige). Daher wird für Deutschland auf den BDI „95%-Klimapfad“ und für Europa auf das WEO „Sustainable Development Scenario“ zurückgegriffen. Die starke europäische Kooperation und die Größe des Marktes führen dazu, dass die entsprechend benötigten Technologien entwickelt und eingesetzt werden können. Es wird davon ausgegangen, dass Abfederungsmechanismen für energieintensive Industriebranchen entwickelt werden, die im starken internationalen Wettbewerb stehen. Für die restlichen Weltregionen wird das WEO „Stated Policies Scenario“ unterstellt, das die bestehenden politischen Rahmenbedingungen und heutigen politischen Absichten und Ziele widerspiegelt – die bereits angekündigten Politiken werden im Laufe der nächsten Jahre umgesetzt.

#### Emissionshandelssystem

In der europäischen Energiepolitik wird das Emissionshandelssystem als Hauptinstrument eingesetzt – der CO<sub>2</sub>-Preis steigt aufgrund der Knappheit der verbleibenden CO<sub>2</sub>-Budgets auf ca. 100 Euro/t CO<sub>2</sub>. Da es jedoch keine international bindenden Vereinbarungen gibt, wird der Handel nicht über Europa hinaus ausgeweitet; es wird daher davon ausgegangen, dass es – wie heute auch – für Branchen im internationalen Wettbewerb entsprechende Entlastungsmechanismen gibt und ggf. die erforderlichen Investitionen in Klimaschutztechnologie noch über andere Mechanismen – z. B. Investitionskostenzuschüsse – angereizt und unterstützt werden.

Damit wird in Europa und in Deutschland der gleiche technologische Pfad umgesetzt wie im Szenario 2 – „Einheitliches Vorgehen“. In Deutschland und in Europa wird Klimaneutralität nahezu erreicht; bei der Verwendung des „BDI-95%-Szenarios“ bleiben noch Rest-Emissionen in der Landwirtschaft, der Abfallwirtschaft sowie nach Anwendung von CCS residuale industrielle Prozessemissionen bestehen; ähnlich sieht es in Europa aus. Diese Restemissionen könnten in einem „Netto-Null“-Szenario durch Negativ-Emissionstechnologien oder internationale Ausgleichs- und Anrechnungsmechanismen kompensiert werden.

#### Technologien

Technologisch bedeutet das einen extrem konsequenten Einsatz von Effizienztechnologien in Gebäuden und in der Industrie, komplett erneuerbare Wärmeerzeugung (vor allem mit Wärmepumpen und Fernwärme, Biomassen in der Industrie), den Umbau des Verkehrssystems mit starker Elektrifizierung, Oberleitungen, Wasserstoff im Schwerkverkehr sowie importierte synthetische Treibstoffe im Schwerkverkehr und im (nationalen wie internationalen) Luft- und Seeverkehr. Das Stromsystem wird vollkommen erneuerbar, vor allem mit den Energieträgern Photovoltaik, Wind onshore und offshore. Es ist durch eine hohe nachfrageseitige Flexibilität im Verkehr, bei den Wärmepumpen (geringfügig größere Warmwasserspeicher für ca. zwei Stunden Lastverschiebung) sowie durch begrenzte Flexibilität in der Industrie (demand side management) gekennzeichnet. Das Stromnetz ist mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Leitungen für den regionalen Stromaustausch ausgebaut und es werden inländisch Wasserstoff und Synthesegas für die Backup-Kapazitäten hergestellt.

#### Prozessemissionen

In der Industrie werden Prozessemissionen aus der Stahl-, Zement- und Chemieindustrie zu großen Teilen mit CCS abgeschieden und gespeichert. Ein gewisser Anteil des abgeschiedenen CCS wird als Rohstoff wiedereingesetzt (vor allem in der Chemie für die stoffliche Nutzung), insbesondere bei abgeschiedenem CO<sub>2</sub> aus Biomasse-Feuerungen. In einigen Branchen und Werken werden innovative neue Prozesse (z. B. Direktreduktion mit Wasserstoff bei der Stahlproduktion sowie einige Prozesse der Grundstoffchemie) umgesetzt, jedoch nicht vollständig, da CCS aus heutiger Sicht auch langfristig in diesem Szenario die deutlich kostengünstigere Lösung ist. Für den Transport und die Speicherung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> werden europaweite Abstimmungen getroffen und eine entsprechende Pipeline-Infrastruktur ausgebaut und die Speicherkapazitäten gemeinsam bewirtschaftet. In den großen Industrieländern, auch außerhalb Europas, z. B. Kanada, Japan, Südkorea, werden diese technologischen Entwicklungen ebenfalls angestoßen, allerdings langsamer umgesetzt.

#### Schwellenländer

In den Schwellenländern werden diese technologischen Entwicklungen angestoßen, jedoch nicht konsequent umgesetzt. Der Aufbau der Schwellen- und Entwicklungsländer erfolgt mit einem höheren Anteil fossiler Energieträger. Dies führt dazu, dass weltweit die Nutzung der Kohle immerhin konstant bleibt und die Nutzung von Mineralölprodukten bis ca. 2025 noch leicht wächst und danach ebenfalls stagniert. Ein deutliches Wachstum erfährt allerdings die Nutzung von Erdgas für die Stromerzeugung und als Energieträger in der Industrie. Die erneuerbaren Energien werden deutlich ausgebaut, und ihr Anteil am weltweiten Energiemix steigt deutlich.

#### Klimaerwärmung global etwa 2,8 bis 3,2 Grad C

Damit bleibt die weltweite Emissionsentwicklung in etwa in dem Bereich, der dazu führt, dass die Klimaerwärmung global etwa 2,8 bis 3,2 Grad C bis 2100 erreicht. Die Risiken, Schäden und Anpassungserfordernisse sind somit vermutlich geringer als im Szenario „Weiter wie bisher“ (BaU), beinhalten jedoch immer noch hohe Unwägbarkeiten und eine deutliche Belastung der Volkswirtschaften durch Schäden und Anpassungsinvestitionen. Diese werden sich auch deutlich negativ im globalen und nationalen BIP auswirken (grob abgeschätzt im Korridor von ca. zwei bis drei Prozent gemäß der in Teil II Kapitel 02.4.1 zitierten Meta-studie). Für Deutschland beziffert die PESETA-III-Studie die erwartete Minderung des BIP infolge extremwetterbezogener Ereignisse auf etwa 0,15 Prozent.<sup>280</sup>

#### Positiver BIP-Effekt

Im Szenario „Europa geht voran“ ist unterstellt, dass die EU Klimaschutz ebenso ambitioniert verfolgt wie im Szenario „Einheitliches Vorgehen“. Der Rest der Welt bleibt dagegen weitgehend bei seinen derzeitigen geringen Klimaschutzambitionen. In Deutschland sinken im Vergleich zum „BaU-Szenario“ die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Branchen deutlich, allerdings werden im Vergleich zum Szenario „einheitliches Vorgehen“ deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Ausland importiert. Trotzdem führt das Voranschreiten der EU im Klimaschutz sogar zu einem leicht positiven BIP-Effekt. Für Deutschland bedeutet dies, dass das BIP im Jahr 2040 knapp 1,4 Prozent höher liegt als im „BaU“ (ohne Berücksichtigung der Klimakosten). Klimaschutz führt einerseits zwangsläufig für die CO<sub>2</sub>-intensiven Branchen zu höheren Kosten, die durch Schutzmechanismen mit Blick auf den internationalen Wettbewerb begrenzt werden müssen. Als Teil des Szenarios ist dies explizit angenommen. Zugleich sind mit den Investitionen Effizienzsteigerungen verbunden, die die Unternehmen und die Volkswirtschaft insgesamt wettbewerbsfähiger machen. Außerdem werden Energieimporte zunehmend eingespart. Dabei kommt es zu einer gewissen Verschiebung in der Branchenstruktur hin zu den Unternehmen, die die Klimaschutzgüter herstellen und die bereits wenig CO<sub>2</sub>-intensiv produzieren wie die meisten Dienstleistungen.

#### Investitionen

Der technologische Umbau in Deutschland erfordert Investitionen in Effizienztechnologien, erneuerbare Energien und Infrastruktur. Diesen stehen erhebliche Einsparungen importierter fossiler Energieträger gegenüber, sodass die resultierenden direkten Mehrkosten gegenüber dem Referenzszenario insgesamt ca. 150 Mrd. Euro, jährlich also ca. drei bis sieben Mrd. Euro, betragen. Dieser Betrag ist schon allein mit der Energierechnung verglichen sehr gering. Die Investitionen sind vor allem Bau-, Anlagen- und Infrastrukturinvestitionen. Die entsprechenden Technologien werden in großen Teilen in Deutschland hergestellt und auch umgesetzt. Dies ist einer der großen Vorteile von Deutschland als Industrie- und Hochtechnologiestandort. Diese inländische Umsetzung der benötigten technischen Maßnahmen mit ihren zum großen Teil ebenfalls inländischen Vorleistungsketten führt insgesamt zu volkswirtschaftlich leicht positiven Effekten in Bezug auf Wertschöpfung und Beschäftigung.

#### Gewinnerbranchen

Gewinnerbranchen sind einzelnen Branchen des Maschinen- und Anlagenbaus, die Baubranche, Teile des Handwerks, Werkstoffe sowie industrienah und andere Dienstleistungen. Die Automobilindustrie kann zu den Gewinnern gehören, wenn sie die Transformationen durch die veränderten Antriebe konsequent und effizient umsetzt und die Stärken nutzt, die durch die „Ökosysteme“ im schnellen, innovationsfähigen Mittelstand bei den Zulieferindustrien gegeben sind.

Als Anbieter dieser klimaschonenden Technologien wird Deutschland hier auch vom Export profitieren. Insgesamt sind – bezogen auf das BIP, die Branchenstruktur und die Exporte – sowohl die Investitionen als auch die gesteigerten Exporte anteilig eher klein, im einstelligen Prozentbereich. Beide Effekte – inländische Investitionen und Exporte – führen also insgesamt zu einem robusten, aber nicht überschießenden Wachstum.

Anders als im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ sind die positiven Effekte in Deutschland über die einzelnen Branchen jedoch insgesamt noch kleiner, was vor allem an zwei Effekten liegt: Im internationalen Wettbewerb sind die Bedingungen nicht einheitlich bezüglich des Klimaschutzes, die Bedingungen für die am stärksten betroffenen Branchen werden also ungünstiger. Dadurch, dass außerhalb Europas der Klimaschutz in geringerem Tempo vorangetrieben wird, entwickeln sich auch die Absatzmärkte für Klimaschutztechnologien weniger günstig. Dennoch bleiben – mit gewissen Unterstützungsmaßnahmen für die am stärksten betroffenen Branchen – die volkswirtschaftlichen Auswirkungen insgesamt leicht positiv.



## 01.4 Zusammenfassung Szenario 4: „Deutschland geht voran“

### Deutschlands ambitionierte Ziele

Im vierten Szenario wird davon ausgegangen, dass Deutschland sich ambitionierte Ziele setzt und diese auch konsequent mit politischen Instrumenten und technischen Maßnahmen umsetzt, die anderen Länder – auch in Europa – jedoch langsamer nachziehen. Gleichwohl wird nicht davon ausgegangen, dass die anderen Länder sich ganz – wie im Szenario 1 – von den Klimazielen verabschieden, sondern sie insgesamt aufrechterhalten. Allerdings kommt es – anders als in Szenario 2 und auch in Szenario 3 – nicht zu international bindenden Vereinbarungen. Damit wird angenommen, dass weltweit – und auch in Europa – nur die bereits angekündigten und absehbaren klima- und energiepolitischen Maßnahmen eingeführt und umgesetzt werden. Neue Maßnahmen, die darüber hinausgehen und zur klimapolitischen Zielerreichung beitragen, werden jedoch nicht eingeführt.

In der Folge wird der Klimaschutz in Deutschland schwächer ausgeprägt sein als in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Europa geht voran“. Dies liegt darin begründet, dass im Szenario „Deutschland geht voran“ eine frühzeitige internationale Abstimmung sowie hinreichend schnelle Technologieentwicklung und -durchdringung nicht stattfinden. Damit verlangsamt sich die Entwicklung der notwendigen Klimaschutztechnologien, sodass davon auszugehen ist, dass Deutschland nur eine 80-prozentige Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bis 2050 gegenüber 1990 erreichen kann. Dies betrifft insbesondere die Technologien für die „letzten 20 Prozent“ – also höchst effiziente Materialien und Technologien im Effizienzbereich, flächendeckende Ladeinfrastruktur und ausgereifte, weitreichende Elektromobilität sowie Negativ-Emissionstechnologien, insbesondere CCS. Es wird keine große Produktionskapazität für synthetische Brenn- und Treibstoffe z. B. in der MENA-Region (Naher Osten und Nordafrika) aufgebaut. Außerdem erfolgen keine europäischen Abstimmungen über die Nutzung von CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten, und der gemeinsame Ausbau einer Transportinfrastruktur unterbleibt. Auch hier wird davon ausgegangen, dass diejenigen energieintensiven Industrien, die in starkem internationalem Wettbewerb stehen, mit bestimmten Schutzmechanismen entlastet werden.

### Grundlage des Szenarios

Dementsprechend dient der BDI „80%-Klimapfad“ ohne globale Zusammenarbeit (nationale Alleingänge) als Grundlage des Szenarios für Deutschland. Das Ziel wird ohne globale Zusammenarbeit eine deutliche Verstärkung bestehender Anstrengungen erfordern. Hier muss angemerkt werden, dass die Einschätzung, Deutschland sei ein Einzelgänger oder Vorreiter, bei genauer Betrachtung der Ziele, der Emissionsentwicklungen und der politischen Maßnahmen sowohl in Europa als auch im Vergleich zu anderen Industrie- und Schwellenländern sich bereits seit rund fünf bis zehn Jahren nicht mehr halten lässt. Das Szenariosetting erscheint insofern derzeit etwas „kontrafaktisch“.

Für die anderen Länder wird das WEO „Stated Policies Scenario“ herangezogen. Das ist deshalb sinnvoll, da davon ausgegangen wird, dass Deutschland nicht einen „ewigen Alleingang“ vollzieht, sondern alle anderen Länder ebenfalls Klimaschutzanstrengungen vollziehen, nur in geringerem Tempo. Bereits beschlossene Politiken werden langfristig umgesetzt, doch werden zunächst keinen zusätzlichen beschlossenen. Energiepolitisch bedeutet das Ausbleiben verstärkter internationaler Abstimmungen, dass sich der europäische Emissionshandel nicht über das bisherige Maß hinaus weiterentwickelt, die CO<sub>2</sub>-Preise also auch nicht stark steigen. Weltweit werden keine gemeinsamen CO<sub>2</sub>-Handelssysteme eingeführt, es gibt also auch keinen weltweiten CO<sub>2</sub>-Preis. Die Nachfrage nach den fossilen Energieträgern bleibt in etwa konstant – die Nachfrage nach Gas steigt sogar noch deutlich –, weshalb auch die weltweiten Preise für fossile Energieträger nicht sinken.

Auf der technischen Seite wird in Deutschland Effizienztechnologie in allen Bereichen konsequent ein- und umgesetzt, jedoch werden die „anstrengenden letzten Prozente“ nicht gehoben, z. B. bei der energetischen Sanierung denkmalgeschützter Gebäude – unter anderem weil die entsprechenden Höchstleistungsmaterialien nicht zur Verfügung stehen. Die Elektrifizierung der Systeme und des Personenverkehrs wird stark vorangetrieben. Auch die großen Transitstrecken werden mit Oberleitungen für den Güterverkehr versehen, jedoch nur etwa halb so viel wie in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Europa geht voran“. Wasserstoff wird im Schwerverkehr nur in Einzelfällen eingesetzt. Es werden keine großen Produktionskapazitäten für Wasserstoff (in Deutschland und im Ausland) und für synthetische Treibstoffe in Nordafrika aufgebaut. Im Schwerverkehr werden abseits der elektrifizierten Strecken weiterhin vor allem Mineralölprodukte eingesetzt.

In der Industrie werden konsequent Effizienztechnologien verwendet, und wo möglich, Biomassen als Energieträger für die Produktion von Prozesswärme, zum Teil auch Elektrifizierung. Grundsätzliche Prozessumstellungen – z. B. Wasserstoff in der Stahlproduktion – erfolgen nur punktuell, als Pilotprojekte. CCS wird nicht eingesetzt. Die Stromproduktion wird fast vollständig erneuerbar, allerdings erfolgt der Betrieb der benötigten hochflexiblen Backup-Kraftwerke mit Erdgas.

In den anderen Industrieländern – auch in Europa – erfolgt eine ähnliche Entwicklung, allerdings verlangsamt. CCS wird insgesamt nur punktuell eingesetzt. In den Schwellenländern zeigen sich diese technologischen Entwicklungen ebenfalls, wenn auch nicht in diesem Tempo. Dies führt dazu, dass weltweit die fossilen Energieträger nur noch geringfügig wachsen und der Anteil der Erneuerbaren am Energieträgermix deutlich steigt.

Weltweit bleibt somit die Entwicklung des Verbrauchs an Kohle etwa konstant und sinkt bis 2040 um ca. sechs Prozent ab, der Verbrauch an Mineralölprodukten steigt bis ca. 2025 und stagniert dann. Der Gasverbrauch steigt, insbesondere zur hocheffizienten Stromerzeugung sowie im Industriesektor. In Deutschland wird bis 2050 Kohle nur noch in der Stahlproduktion, Mineralölprodukte nur noch in reduzierter Menge im Schwerverkehr und Erdgas vor allem für Backup-Kraftwerke in wenigen Stunden im Jahr eingesetzt.

In Deutschland fällt der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem „BaU-Szenario“ bei allen Branchen deutlich geringer aus als in den beiden anderen Anpassungsszenarien. Die Emissionsreduktionen werden bei einem deutschen Alleingang vor allem durch die inländischen Lieferketten getragen, während die Emissionsminderungen im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ fast im gleichen Verhältnis durch Rückgänge bei den inländischen und ausländischen Vorleistungen erbracht werden. Von allen drei Abweichungsszenarien sind die CO<sub>2</sub>-Effekte im Szenario „Deutschland geht voran“ mit Abstand am geringsten.

### Globale Erwärmung von 2,8 bis 3,2 Grad C

Damit bleibt die weltweite Emissionsentwicklung in einem Bereich, der zu einer globalen Erwärmung von 2,8 bis 3,2 Grad C führt, also vergleichbar mit dem Szenario „Europa geht voran“. Die Belastung der Volkswirtschaften durch Risiken, Schäden und Anpassungsinvestitionen ist ebenfalls mit dem Szenario „Europa geht voran“ vergleichbar. Dies liegt daran, dass die Emissionsdifferenz von Europa, bezogen auf die weltweiten Emissionen, zu gering ist, um zwischen den Szenarien „Europa geht voran“ und „Deutschland geht voran“ einen hinreichend großen Unterschied zu erzeugen. Für die weltweite Emissionsentwicklung bestimmend bleibt jeweils das für den „Rest der Welt“ zugrunde liegende „Stated Policies“-Szenario. Damit werden sich die klimawandel- und -anpassungsbedingten Aufwendungen auch deutlich negativ auf die globalen und nationalen BIP auswirken (grob abgeschätzt im Korridor von ca. zwei bis drei Prozent gemäß der in Teil II Kapitel 02.4.1 zitierten Metastudie). Für Deutschland beziffert die PESETA-III-Studie die erwartete Minderung des BIP infolge extremwetterbezogener Ereignisse auf etwa 0,15 Prozent.<sup>281</sup>

Auch dieser technologische Umbau in Deutschland erfordert Investitionen in Effizienztechnologien, erneuerbare Energien und Infrastruktur in Höhe von ca. 32 Mrd. Euro jährlich. Diesen stehen erhebliche Einsparungen importierter fossiler Energieträger gegenüber, jedoch nicht in dem Maße wie im Szenario „Europa geht voran“ oder „Einheitliches Vorgehen“. Die daraus resultierenden direkten Mehr-

kosten gegenüber dem Referenzszenario betragen insgesamt bis 2050 ca. 240 Mrd. Euro, also im Durchschnitt ca. fünf bis zehn Mrd. Euro jährlich. Sie liegen damit höher als in den Szenarien mit mehr internationaler Kooperation, jedoch insgesamt immer noch niedrig, verglichen z. B. mit der Energierechnung. Auch unter Einbeziehung der indirekten Effekte entwickelt sich die Bruttowertschöpfung in den einzelnen Branchen – mit Ausnahme der Energiewirtschaft – etwas positiver als im „BaU-Szenario“. Die Veränderungen fallen jedoch insgesamt deutlich schwächer aus als in den beiden anderen Abweichungsszenarien, was wiederum den erheblichen zusätzlichen Investitionskosten für Klimaschutzmaßnahmen bei einem deutschen Alleingang geschuldet ist.

### Investitionen

Die Investitionen sind vor allem Bau-, Anlagen- und Infrastrukturinvestitionen. Die entsprechenden Technologien werden in großen Teilen in Deutschland hergestellt und auch umgesetzt. Dies ist einer der großen Vorteile von Deutschland als Industrie- und Hochtechnologiestandort. Die Umsetzung der Technologien, die zu großen Teilen auch mit ihren Vorleistungsketten im Inland produziert werden, führt insgesamt zu volkswirtschaftlich leicht positiven Effekten in Bezug auf Wertschöpfung und Beschäftigung. Gewinnerbranchen sind einzelne Branchen des Maschinen- und Anlagenbaus, die Baubranche, Werkstoffe sowie industriennahe und andere Dienstleistungen. Die Automobilindustrie kann zu den Gewinnern gehören, wenn sie die Transformationen durch die veränderten Antriebe konsequent und effizient umsetzt und die Stärken nutzt, die durch die „Ökosysteme“ im schnellen, innovationsfähigen Mittelstand bei den Zulieferindustrien gegeben sind. In diesem Szenario geht die Transformation zu den Antriebswechseln weniger schnell als in den Szenarien mit internationaler Kooperation (Szenarien 2 und 3), sodass auch die Anpassungsgeschwindigkeit nicht so hoch sein muss.

Bezüglich der weltweiten Wettbewerbsbeziehungen auf den Märkten stellen sich die Bedingungen für einige (energieintensive) Industriebranchen allerdings schwieriger dar, sodass hier Anpassungen erwartet oder Unterstützungsmaßnahmen erforderlich werden. Hierzu gehören die Metallherzeugung und einige Unterbranchen der Grundstoffchemie sowie in Teilen Glas und Keramik.

Da weltweit ebenfalls Klimaschutz – wenn auch nicht so konsequent und nicht so schnell – betrieben wird, werden auch Klimaschutztechnologien exportiert, jedoch nicht in so großem Maße wie in den beiden vorherigen Szenarien, da die Märkte entsprechend kleiner sind.

## 01.5 Leitfragen

In den folgenden Kapiteln werden die Auswirkungen der Szenarien ausführlich dargestellt. Dabei werden jeweils die angegebenen Quellen referiert, jedoch nicht jeder Satz gesondert mit Quellenangabe versehen. Die Aussagen bezüglich Deutschlands entstammen der Studie „Klimapfade für Deutschland“ im Auftrag des BDI („BDI-Szenarien“)<sup>282</sup>, die Aussagen bezüglich der Welt bzw. anderer Länder entstammen jeweils dem World Energy Outlook 2019<sup>283</sup>. Dabei stehen vier Leitfragen im Fokus:

- Welche Veränderungen im Energiesystem erfordern die Szenarien?
- Welche technologischen Veränderungen erfordern die Szenarien?
- Welche Auswirkungen auf Handel, Branchenstruktur, Beschäftigung und BIP (weltweit, in Deutschland und Bayern) haben die Szenarien?
- Welche Auswirkungen auf Emissionen entlang der Wertschöpfungsketten in Deutschland und Bayern ergeben sich aus den Szenarien?

Die zentralen Technologien für eine klimaschonende Zukunft wurden in Teil III Kapitel 04 vertieft dargestellt. Eine Analyse der technologischen Positionierung Bayerns erfolgt in Teil V Kapitel 01.

<sup>282</sup> BFI, 2018.

<sup>283</sup> International Energy Agency, World Energy Outlook 2019, [www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo)

## 02 Szenarienvergleich und Einordnung der Ergebnisse

**Signifikante Klimawirkungen und positive volkswirtschaftliche Effekte lassen sich vor allem bei einem einheitlichen Vorgehen erreichen. Voranzugehen wirkt sich für Deutschland noch leicht positiv aus.**

### Inhalte

<b>02.1</b>	<b>Unterschiedliche Annahmen und Inputs für die Quantifizierung</b>	<b>162</b>
<b>02.2</b>	<b>Ergebnisvergleich</b>	<b>165</b>
02.2.1	Erforderlicher Technologieinsatz und weitere Veränderungen	166
02.2.2	Volkswirtschaftliche Effekte	169
<b>02.3</b>	<b>Einordnung der volkswirtschaftlichen Effekte</b>	<b>175</b>

### 02.1 Unterschiedliche Annahmen und Inputs für die Quantifizierung

#### Modellspezifikationen

Die heterogenen Entwicklungen in den Szenarien hängen von den Modellspezifikationen und von den wesentlichen Annahmen ab, in denen sie sich unterscheiden. Mit Blick auf Deutschland sind dies die geforderten Treibhausgas-Minderungen, die CO<sub>2</sub>-Preise sowie die zusätzlich notwendigen Investitionen zur Erreichung der Minderungsziele, weil die Preise, die immer auch eine begrenzte politische Durchsetzbarkeit widerspiegeln, dafür allein nicht ausreichen. Gerade die letzten 20 Prozent Einsparung erfordern technische Maßnahmen, die höhere spezifische Reduktionskosten haben. Das gilt z. T. auch für Maßnahmen mit mittleren Reduktionskosten, die um den jeweiligen CO<sub>2</sub>-Preis liegen – wenn die günstigen Potenziale ausgeschöpft sind, können weiterhin notwendige Umsetzungen teurer werden. Zudem wird grundsätzlich angenommen, dass die erforderlichen Technologien und Veränderungen (z. B. in der Infrastruktur) von der Gesellschaft akzeptiert werden. Bei den Szenarien in der quantitativen Analyse unberücksichtigt bleiben die Kosten des Nichthandelns, da diese nicht hinreichend quantifiziert werden können. Diese werden jeweils als Korridor in den derzeit verfügbaren Abschätzungen erwähnt.

#### Treibhausgas-Emissionen

Die Treibhausgas-Emissionen entwickeln sich in den betrachteten Szenarien (annahmegemäß) unterschiedlich (Abbildung 59):

- Im „BaU-Szenario“ liegen die Emissionen in Deutschland im Jahr 2030 gut 20 Prozent unter dem Niveau des Jahres 2018 bzw. 55 Prozent unter dem Niveau des Jahres 1990. Weltweit steigen die Emissionen zwischen 2018 und 2030 um ca. 24 Prozent.
- In den Szenarien mit hohen Klimaschutzzielen in Europa sowie weltweit liegt die Minderung in Deutschland sogar bei über 40 Prozent (gegenüber 2018) bis 2030.
- Geht Deutschland allein voran, würde die Minderung bei etwa 30 Prozent liegen. Für die übrigen Länder macht es annahmegemäß keinen (großen) Unterschied, wenn allein Deutschland verstärkt das Klima schützt. In diesem Szenario wird in Deutschland in der Treibhausgas-Bilanz das Ziel der ungefähren Klimaneutralität verfehlt, es werden bis 2050 nur etwa 80 Prozent Reduktion im Vergleich zum Niveau von 1990 erreicht. Dies liegt daran, dass sich die für die letzten 20 Prozent benötigten Technologien nur in größeren internationalen Märkten entwickeln können und z. B. sowohl für die Speicherung von CO<sub>2</sub> als auch für den Aufbau von Anlagen für große Mengen synthetischer Treibstoffe

verlässliche und langfristige internationale Kooperationen erforderlich sind. Für die konsequente Umsetzung auch der weniger innovativen Technologien (z. B. Elektromobilität, energetische Gebäudesanierung) werden aufgrund der kleineren und langsameren Weltmarktentwicklungen die Lernkurven nicht schnell genug durchlaufen, sodass die Erschließung der letzten Prozente entweder sehr teuer bleibt oder aufgrund technischer Hürden nicht möglich ist.

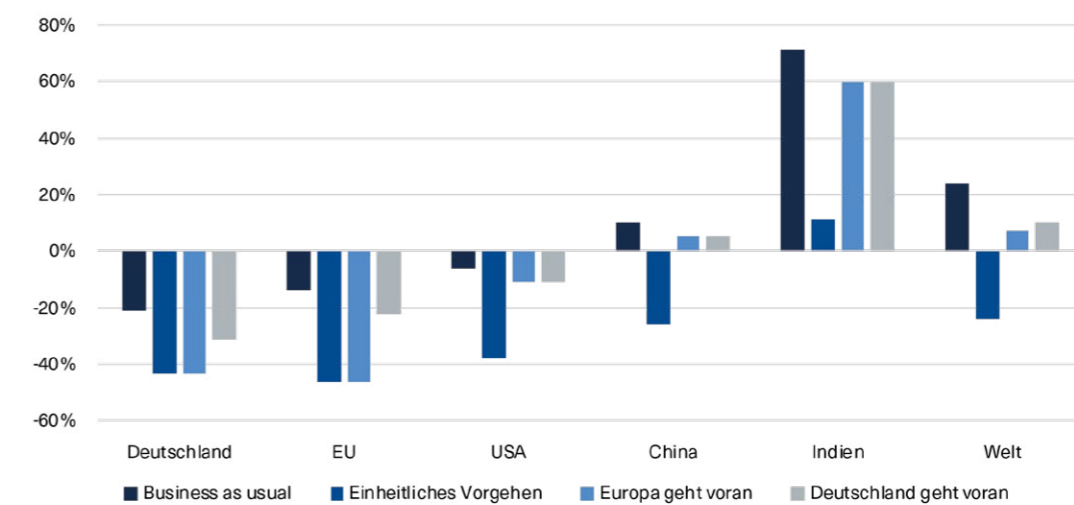
- Die EU würde von geringeren deutschen Emissionen profitieren. Außerhalb Europas fallen die Emissionen in den Szenarien, in denen Deutschland oder Europa vorangeht, etwas niedriger aus, weil unterstellt ist, dass die Länder nicht nur schon beschlossene, sondern auch bereits angekündigte Klimaschutzmaßnahmen umsetzen und somit in den Politiken geringfügig nachziehen, wenn auch keine ambitionierten Ziele anstreben oder erreichen. Deutliche Minderungen ergeben sich für alle Länder im Szenario „Einheitliches Vorgehen“. Es wird davon ausgegangen, dass damit das 2-Grad-Ziel eingehalten werden kann, da auch die Welt auf einem langfristig emissionsmindernden Weg ist.

In Abbildung 59 werden die erreichten Emissionsminderungen in den Szenarien in der Welt und wichtigen Ländern für das Jahr 2030 vergleichend dargestellt. Grundlage für alle Länder und Regionen außer Deutschland bilden die Treibhausgas-Minderungen gemäß des World Energy Outlooks (WEO) aus dem Jahr 2019. So gehen im entsprechenden „Sustainable Development Scenario“ die weltweiten Emissionen bis 2030 um gut 24 Prozent gegenüber dem Jahr 2018 zurück, in den übrigen Szenarien steigen die globalen Emissionen bis 2030 weiter leicht an. Zwar gelingt es den wichtigen Industrieländern, die Emissionen in Zukunft zu senken. In den USA gelingt dies sogar bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von null u. a. durch die Verfügbarkeit von günstigem Gas, das Kohle ersetzt, und erneuerbare Energien. In den Schwellen- und Entwicklungsländern werden dagegen die Emissionen ohne stringente Klimapolitik weiter steigen. In China könnte eine ambitionierte Klimapolitik die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 etwas senken, in Indien wird der Emissions-Peak selbst in diesem Szenario erst nach 2030 erreicht.

Insgesamt muss darauf hingewiesen werden, dass in den Szenarien „BaU“ und „Deutschland geht voran“ die mit den weltweiten Emissionen verbundenen Klimafolgen so hoch sind, dass – auch wenn die Risikokosten und Anpassungskosten nicht genau beziffert werden können – die Risiken höherer und schwer vorhersagbarer Auswirkungen und Kosten sehr hoch sind.

Abbildung 59

**Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in den Szenarien bis zum Jahr 2030 gegenüber 2018**

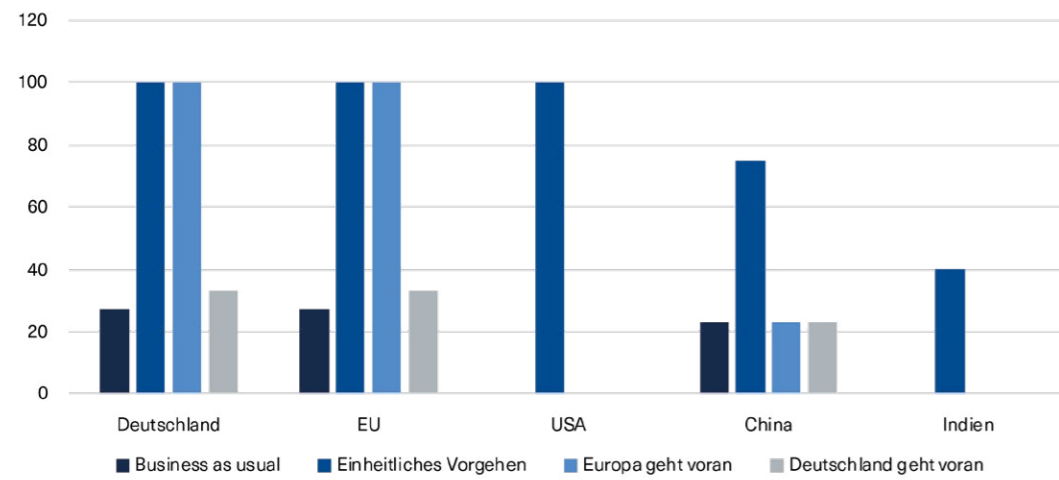


Quelle: BMVI, 2014; eigene Darstellung Prognos, 2020

Entsprechend der Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen unterscheiden sich die CO<sub>2</sub>-Preise zwischen den Szenarien (Abbildung 60). In Europa ändert sich im „BaU-Szenario“ der CO<sub>2</sub>-Preis im Vergleich zu heute kaum. Die USA bleiben bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von null. Für den Fall von ambitioniertem Klimaschutz erreichen die CO<sub>2</sub>-Preise im Jahr 2030 in Europa, den USA sowie weiteren Industrieländern 100 USD. Für China, das im „BaU-Szenario“ bereits einen ähnlich hohen Preis erreicht wie Europa, wird für 2030 ein CO<sub>2</sub>-Preis von umgerechnet 75 USD im Fall des „Einheitlichen Vorgehens“ erwartet. In Indien beginnt in diesem Szenario die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Preises bei einem Wert von 40 USD. Bei internationalen Klimaverhandlungen wird immer auf die gemeinsame, aber historisch und von der Wirtschaftskraft unterschiedliche Verantwortung Bezug genommen, was sich in den unterschiedlichen Preisen niederschlägt.

In der EU, und damit auch in Deutschland, variieren außerdem die Annahmen zur Vergabe der Emissionsrechte zwischen dem Szenario „Einheitliches Vorgehen“ und den übrigen Szenarien. Bei einheitlichem Vorgehen machen Schutzmechanismen für CO<sub>2</sub>-intensive Industrien, die im internationalen Wettbewerb stehen, keinen Sinn. Sie müssen die CO<sub>2</sub>-Kosten tragen, was die Produkte überall gegenüber weniger CO<sub>2</sub>-intensiven Gütern relativ verteuert. Bei einem Alleingang wird dagegen angenommen, dass die Industrien nur 50 Prozent der Kosten tragen müssen.

Abbildung 60  
CO<sub>2</sub>-Preise in konstanten USD je Tonne im Jahr 2030



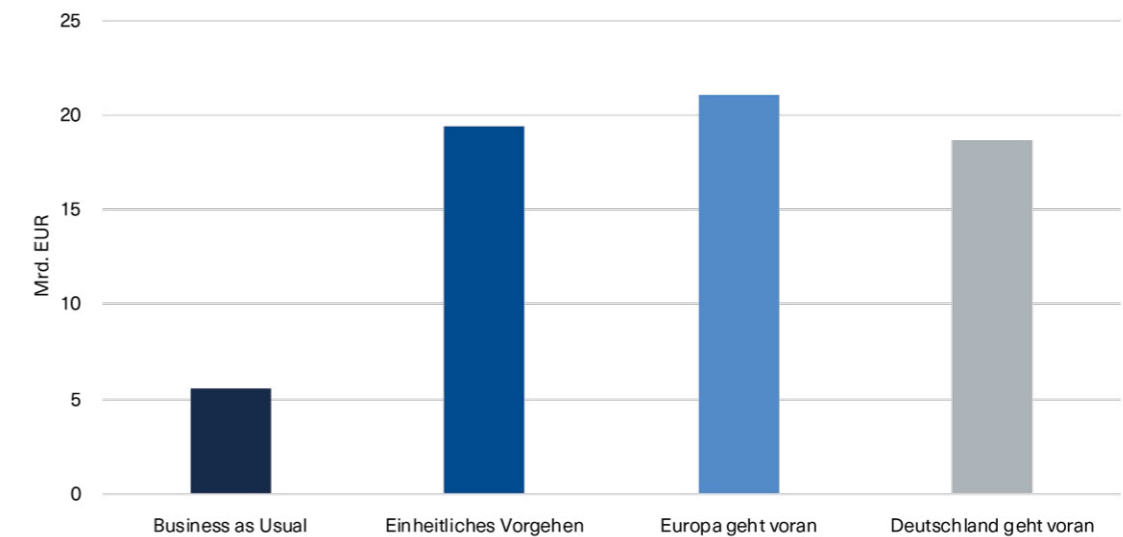
Quelle: GWS, 2020

Die CO<sub>2</sub>-Preise als Anreiz reichen in allen Szenarien nicht aus, um die angestrebten Emissionsminderungen vollständig zu erreichen – zahlreiche Technologien haben spezifisch höhere CO<sub>2</sub>-Einsparungskosten, insbesondere wenn die ersten kostengünstigen Potenziale erschlossen sind. Dies gilt insbesondere für die Szenarien, in denen Europa und Deutschland vorangehen. Es sind zusätzliche Investitionen in den Klimaschutz notwendig. Dabei wird angenommen, dass sie letztlich umgesetzt und die Kosten von den jeweiligen Branchen getragen werden. Würde die öffentliche Hand einen Teil der Kosten übernehmen, könnten die Kostenaufschläge in den betroffenen Branchen geringer ausfallen. Sie müssten dann an anderer Stelle in der Volkswirtschaft getragen und verteilt werden, z. B. durch höhere

Steuern, geringere Subventionen oder niedrigere Sozialleistungen.

Unterschiedliche Annahmen zur Entwicklung der Kosten einer Treibhausgas-Minderung führen dazu, dass im Fall eines deutschen Alleingangs die zusätzlichen Investitionen in einer Größenordnung von 20 Mrd. Euro ähnlich hoch wären wie in den beiden anderen Szenarien („Einheitliches Vorgehen“ und „Europa geht voran“) mit höherer Minderung, obgleich weniger Einsparung erreicht werden kann. Es zeigt sich der Vorteil internationaler Kooperation, weil global höhere Stückzahlen und verstärkte Forschung und Entwicklung die Technologiekosten senken.

Abbildung 61  
Deutsche Mehrinvestitionen im Jahr 2030 zur Erreichung des jeweiligen Treibhausgas-Ziels



Quelle: GWS, 2020

### 02.2 Ergebnisvergleich

Der Ergebnisvergleich erfolgt primär hinsichtlich der je nach Szenario erforderlichen Technologien und volkswirtschaftlichen Veränderungen. Die Auswirkungen der Szenarien auf Mensch und Umwelt können im Rahmen der Studie nicht ausführlich dargestellt werden. Klar ist jedoch, dass die Folgen bzw. Kosten des Klimawandels sowie die nötigen Anpassungsmaßnahmen mit steigender Erwärmung zunehmen. Die globale Erwärmung bis 2100 wird in den Szenarien aufgrund von Unsicherheiten über die genaue Klimawirkung der Emissionsminderungen in den bislang verfügbaren Untersuchungen in Bandbreiten angegeben:

<b>Szenario 1</b>	„Business as Usual“ („BaU“)	<b>4,1 bis 4,8 Grad C</b>
<b>Szenario 2</b>	„Einheitliches Vorgehen“	<b>1,5 bis 2,0 Grad C</b>
<b>Szenario 3</b>	„Europa geht voran“	<b>2,8 bis 3,2 Grad C</b>
<b>Szenario 4</b>	„Deutschland geht voran“	<b>2,8 bis 3,2 Grad C</b>

Damit sind die Folgen, die mit den Klimaveränderungen verbundenen Risiken bzw. Kosten und nötigen Anpassungsmaßnahmen im Szenario „BaU“ am umfangreichsten und im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ am geringsten. Das Szenario „Europa geht voran“ kann sich in Bezug auf die Klimafolgen insgesamt etwas günstiger darstellen als das Szenario „Deutschland geht voran“, da mit gemeinsamen Anstrengungen für den Klimaschutz auch gemeinsame Anstrengungen für Anpassungsstrategien und Risikominderungen verbunden sein können. Die in Europa im Szenario „Europa geht voran“ bis 2040 insgesamt gegenüber dem Szenario „Deutschland geht voran“ erreichten Emissionsreduktionen sind mit 2,2 Gigatonnen CO<sub>2</sub>, bezogen auf die europäischen Emissionen mit ca. 65 Prozent, erheblich, bezogen auf die weltweiten Emissionen ist der Beitrag jedoch gering (ca. fünf Prozent), sodass nicht mit signifikanten Auswirkungen auf die Klimawirkungen gerechnet werden kann. Dies betrifft insbesondere auch Deutschland und Bayern, die aufgrund ihrer ausgeprägten Verknüpfungen mit anderen Ländern eine erhebliche indirekte Vulnerabilität gegenüber Klimafolgen aufweisen (Teil II Kapitel 02.4.2).

02.2.1 Erforderlicher Technologieeinsatz und weitere Veränderungen

Technologieeinsatz

Zur Erreichung der Minderungsziele werden je nach Szenario unterschiedliche Technologien in unterschiedlichem Ausmaß und zu verschiedenen Zeiten eingesetzt. Zentrale Technologiefelder, die in den zugrunde liegenden Szenariensätzen abgedeckt werden, umfassen insbesondere die acht wichtigen Bereiche:

1. Effizienz von Gebäuden und Geräten (Teil III Kapitel 04.2.1)
2. Verkehr, Verkehrsorganisation, Elektromobilität und sonstige alternative Antriebe (Teil III Kapitel 04.2.3)
3. Effizienz und Brennstoffwechsel in der Industrie (Teil III Kapitel 04.2.2)
4. Industrielle Prozessänderungen zur Reduktion von Prozessemissionen (Teil III Kapitel 04.2.2)
5. Erneuerbare Energien zur Strom- und Wärmeerzeugung (Teil III Kapitel 04.1)
6. Synthetische Energieträger und Wasserstoff (Teil III Kapitel 04.4)
7. CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS) und Negativ-Emissionstechnologien (NET) (Teil III Kapitel 04.3)
8. Landwirtschaft (Teil III Kapitel 04.2.4)

Diese acht werden neben weiteren Bereichen im Rahmen der Handlungsoptionen in Teil III der Studie (Kapitel in Klammern) vertieft behandelt. Sie grenzen wichtige Handlungsfelder in Anlehnung an die Treibhausgas- und Energiebilanz ab. Sie haben hohe Überschneidungen mit den in Teil V (Kapitel 01.2) entwickelten Technologieclustern, sind aber nicht vollkommen deckungsgleich.

Zur Erreichung der ambitionierten Minderungsziele im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ ist ein umfangreicher Einsatz von Technologien aus allen acht Bereichen erforderlich, während im Szenario „BaU“ Technologien aus vielen der Bereiche nicht oder nur in sehr begrenztem Umfang zum Einsatz kommen. Dies betrifft v. a. die Bereiche industrielle Prozessänderungen sowie CCS und NET. Diese Technologiebereiche werden auch im Szenario „Deutschland geht voran“ nicht eingesetzt, da hierfür verstärkte konkrete internationale Kooperation erforderlich wäre, z. B. bezüglich der Kohlenstoffsensoren oder des Aufbaus einer Kohlenstoffabscheidungsinfrastruktur aus der Luft für die Produktion synthetischer Energieträger, die große Investitionen erfordern. Daher werden im Szenario „Deutschland geht voran“ auch nur 80 Prozent Treibhausgas-Einsparungen bis 2050 gegenüber 1990 erreicht. Die drei Bereiche „Effizienz von Gebäuden und Geräten“, „Verkehr und Elektromobilität“ und „Synthetische Energieträger“ sind grundsätzlich in allen vier Szenarien relevant, wenngleich in unterschiedlichem Ausmaß und zu verschiedenen Zeiten (Abbildung 62 und Abbildung 63). Energieeffizienz und erneuerbare Energien sind seit Jahrzehnten in die entsprechenden Märkte eingedrungen, ambitionierter Klimaschutz erfordert hier aber weitere Entwicklungen und höhere Durchdringung.

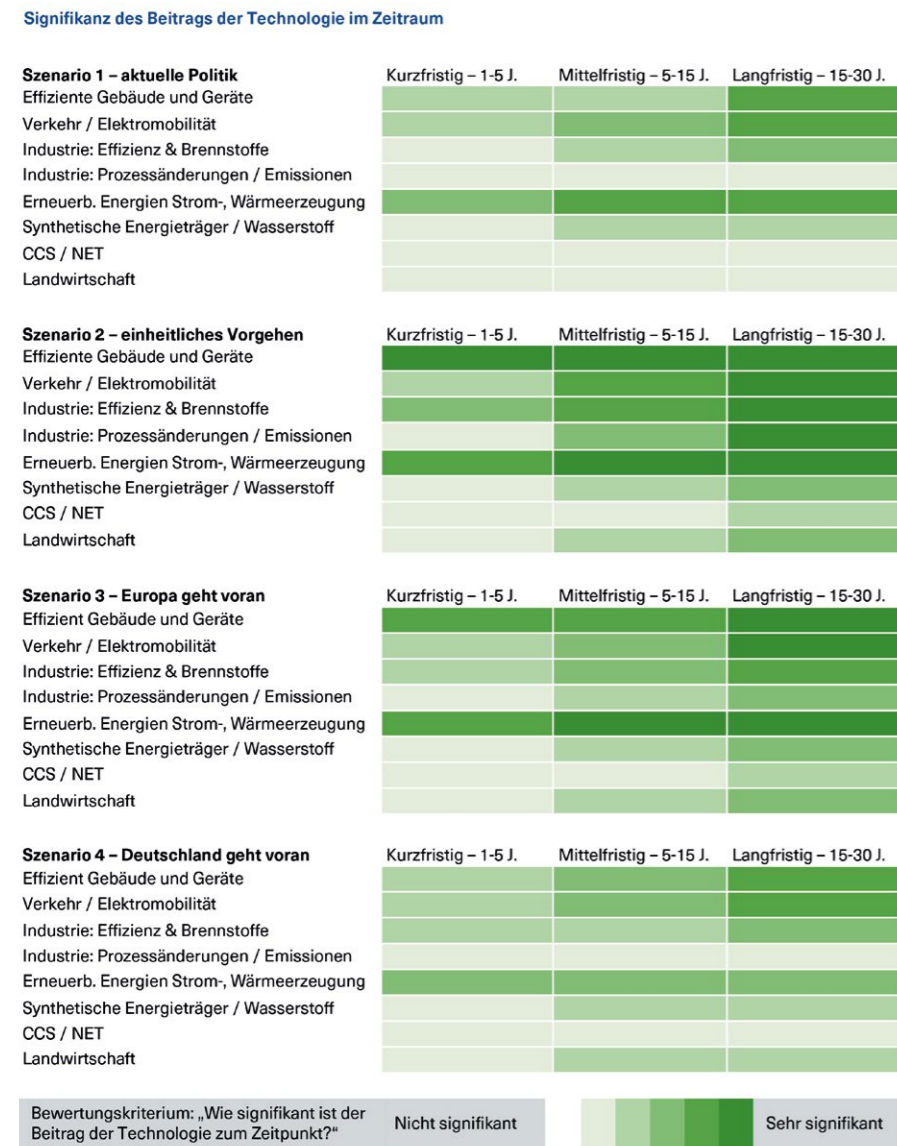
Abbildung 62  
Ausmaß des Einsatzes von Technologien aus acht zentralen Bereichen in den Szenarien

Bereiche	Szenario 1 „Business as Usual“	Szenario 2 „Einheitliches Vorgehen“	Szenario 3 „Europa geht voran“	Szenario 4 „Deutschland geht voran“
Effizienz Gebäude und Geräte	– Fortschreibung des aktuellen Fortschritts – Verbreiteter Einsatz von LED	– Sehr hoher Einsatz	– Hoher Einsatz	– Hoher Einsatz
Verkehr / Elektromobilität	– Sehr langsame Steigerung	– Verbreiteter Einsatz von Oberleitungen im Straßenverkehr	– Hoher Einsatz	– Hoher Einsatz
Industrie: Effizienz und Brennstoffe	– Wenig Effizienz – Kaum Brennstoffwechsel	– Vollständige Umstellung auf Biomasse / Biogas / Synthetische Energieträger	– Vermehrter Einsatz von Biomasse / Biogas	– Vermehrter Einsatz von Biomasse / Biogas
Industrie: Prozessänderungen (Prozessemissionen)	– Kein Einsatz	– Änderung v. a. bei Stahl, Zement, Chemie – ggf. auch Produktänderungen – Fleischersatz	– Hoher Einsatz	– Kein Einsatz
Erneuerbare Energien zur Strom- und Wasser-erzeugung	– Verlangsamter Ausbau – Keine WP- oder SolTh-Strategie	– Maximaler Einsatz von EE-Strom und konsequenter WP- und FW-Einsatz	– Anteil EE-Strom maximal – Konsequenter WP- und FW-Einsatz	– Anteil EE-Strom hoch – WP-Strategie
Synthetische Energieträger / Wasserstoff	– Punktueller Einsatz von Wasserstoff	– Einsatz von Wasserstoff v. a. bei Stahl, Chemie, Raffinerien, Schwerkverkehr – Synthetische Energieträger v. a. bei Luft- und Seeverkehr – Backup-KW	– Einsatz von Wasserstoff teilweise bei Stahl, Raffinerien, Chemie, Schwerkverkehr	– Einsatz von Wasserstoff teilweise bei Raffinerien, Schwerkverkehr
CCS / NET	– Kein Einsatz	– Einsatz von CCS v. a. bei Stahl, Raffinerien, Abfallentsorgung und Prozessen – Einsatz von NET aus BECCS bei Chemie	– Einsatz von CCS v. a. bei Raffinerien, Abfallentsorgung und einigen Chemieprozessen	– Kein Einsatz
Landwirtschaft	– Keine Änderung	– Verbreiteter Einsatz von Düngermanagement – Reduzierter Viehbestand – Verbreiteter Einsatz der „Methanpille“	– Verbreiteter Einsatz von Düngermanagement	– Verbreiteter Einsatz von Düngermanagement

Kein Einsatz bzw. keine Änderung
  Einsatz bzw. Änderung gering
  Einsatz bzw. Änderung mittel
  Einsatz bzw. Änderung hoch
  Einsatz bzw. Änderung sehr hoch

WP: Wärmepumpen, SolTh: Solarthermie, FW: Fernwärme, KW: Kraftwerke

Abbildung 63  
Signifikanz des Beitrags der Technologiebereiche im Zeitverlauf in den Szenarien



Quelle: Prognos, 2020

**Weitere Maßnahmen und Veränderungen**

Neben dem Einsatz klimafreundlicher Technologien sind weitere Maßnahmen und Veränderungen zum Erreichen der Minderungsziele, insbesondere bei hohen Ambitionen, relevant. Dies betrifft in erster Linie Verhaltens- und Konsumveränderungen (Teil III Kapitel 02), Änderungen des Modal Splits und Organisationsveränderungen im Verkehr sowie Veränderungen in der Landwirtschaft und den Ausbau der Kreislaufwirtschaft bzw. Circular Economy (Teil III Kapitel 03). Zur Erreichung der ambitionierten Minderungsziele im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ sind gewisse Veränderungen bei Verhalten und Konsum sowie der Kreislaufwirtschaft erforderlich, während im Szenario „BaU“ in diesen Bereichen allenfalls geringe Anstrengungen unternommen werden.

**Exkurs: Technologieeinsatz im Szenario „Klimaneutrales Deutschland“**

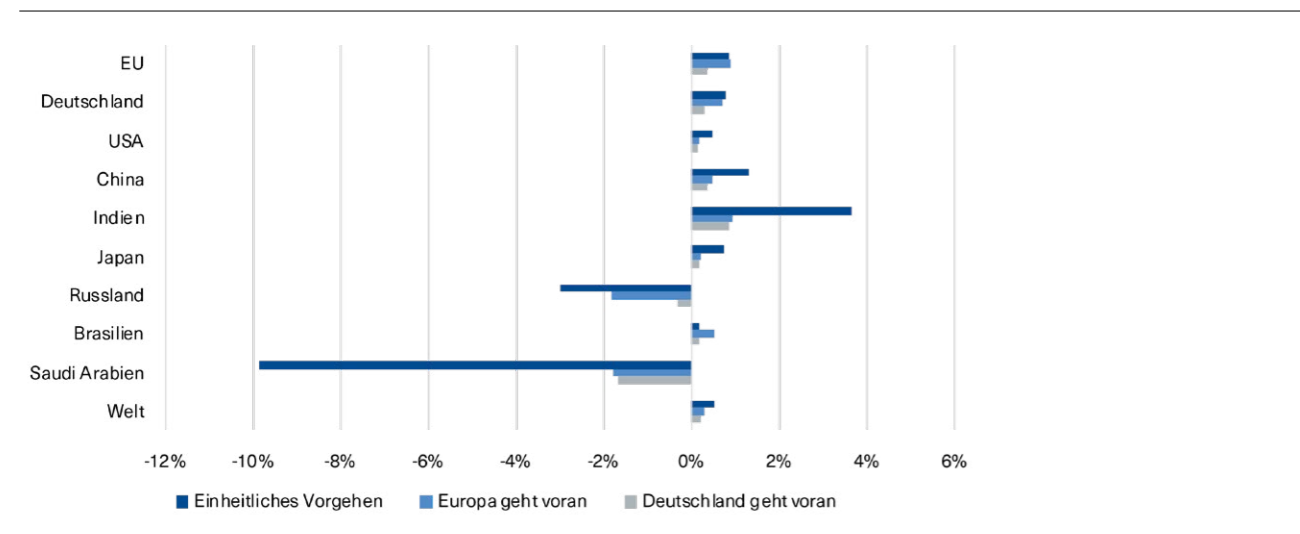
Im Szenario „Klimaneutrales Deutschland“<sup>284</sup> entspricht der Technologieeinsatz im Wesentlichen demjenigen des Szenarios 2, mit dem Unterschied, dass alle Effizienztechnologien noch konsequenter und stärker umgesetzt werden. Die industriellen Prozesstechnologien werden stärker und konsequent umgebaut, insbesondere bei Stahl (Direktreduktion mit Wasserstoff), Chemie, Glas und Zement. Der Wasserstoffeinsatz wird früher begonnen und stärker errichtet. Es wird eine europäische Wasserstoffinfrastruktur mit Transportnetzen aufgebaut. Weltweit werden relativ schnell PtL-Produktionskapazitäten für den Flug- und Schiffsverkehr aufgebaut. Negativ-Emissionstechnologiekapazitäten werden aufgebaut, sowohl mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung an Biomasse-Verbrennungspunkten als auch mit Anlagen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft.

**02.2.2 Volkswirtschaftliche Effekte**

Es stellt sich die Frage, wie sich die in den jeweiligen Szenarien enthaltenen Investitionspfade auf die Herstellung und den Einkauf von Technologien, auf die möglichen Gewinne aus dem Verkauf von Rohöl, Ölprodukten und Gas oder auf die relativen Preise auswirken. Außerdem geht es darum, was aus dem Zusammenspiel dieser Wirkungen für die zentralen ökonomischen Indikatoren folgt, also für das Wachstum des BIP oder die Gesamtbeschäftigung sowie die Beschäftigung in einzelnen Branchen.

Die volkswirtschaftlichen Effekte der Szenarien werden maßgeblich mit dem Modell GIN-FORS-E (Kasten 28) quantifiziert. Dabei dient das „BaU-Szenario“ als Referenzszenario (Teil IV Kapitel 03). Die Ergebnisse der drei anderen Szenarien werden als Abweichung zum „BaU-Szenario“ vergleichend dargestellt (Teil IV Kapitel 04 bis 06). Für das Wachstum zeigt sich, dass es sowohl weltweit als auch in den meisten Regionen die unterschiedlichen Szenarien gut verkraftet. Wie eingangs erläutert, sind die Investitionen in die Energiewirtschaft, gemessen an den gesamten Investitionen, nicht so hoch, dass sich daraus globale Verzerrungen von Wachstum und Preisen ergeben. Abbildung 64 illustriert dies mit einem Vergleich des BIP im „BaU-Szenario“ mit den BIP, die sich für das Jahr 2030 unter den verschiedenen Szenarien für ausgewählte Länder, Regionen und die Welt ergeben.

Abbildung 64  
Abweichungen des BIP im Jahr 2030 vom Szenario „Business as Usual“



Quelle: GWS, 2020

Insgesamt sind die Abweichungen des BIP sehr gering, was bedeutet, dass die verschiedenen Szenarien wenig und wenn ja überwiegend positive Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Erfolg haben. Im Jahr 2030 liegt das weltweite BIP in allen Szenarien im Promillebereich höher als im „BaU-Szenario“. Exporteure fossiler Energien wie Russland und Saudi-Arabien sind allerdings umso mehr Verlierer, je größer die weltweiten Treibhausgas-Minderungen sind. In Saudi-Arabien würde das BIP im Jahr 2030 im Fall des einheitlichen Vorgehens um fast zehn Prozent niedriger als im „BaU-Szenario“ ausfallen. Auf zehn Jahre gerechnet ist das ein Verlust von rund einem Prozent Wirtschaftswachstum pro Jahr. Vor allem für die Industrieländer sind die Effekte in allen drei Klimaschutzszenarien leicht positiv, weil die zusätzlichen Investitionen die Wirtschaftstätigkeit anregen und ein Großteil der Technologien inländisch produziert wird. Für Indien kommt unterstützend dazu, dass es als Schwellenland, in dem viele Menschen noch ein sehr geringes Einkommen haben, zur Sicherstellung des wirtschaftlichen Aufholprozesses gemäß dem IEA-Szenario bis 2030 keinen CO<sub>2</sub>-Preis erheben muss, d. h., die leicht dämpfende Wirkung von höheren Preisen ausbleibt.

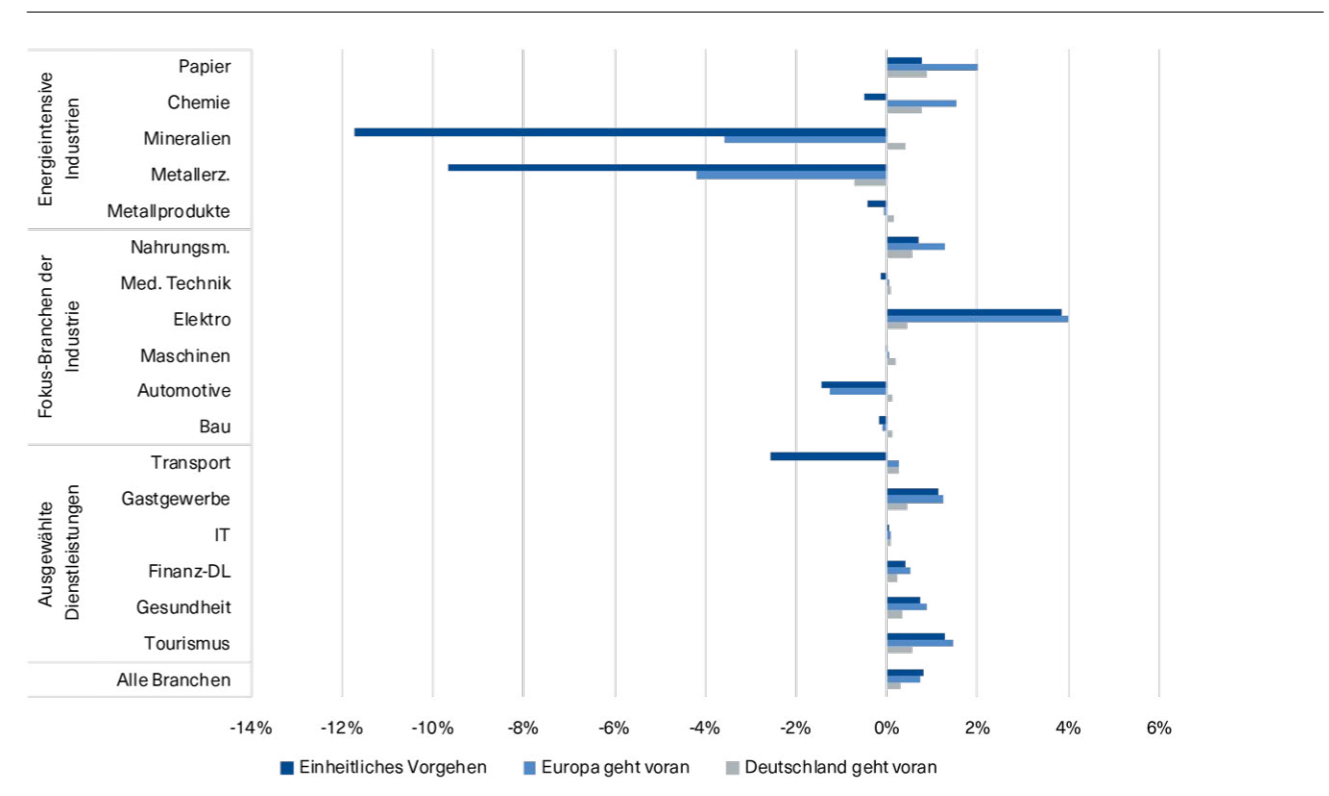
Doch auch in den anderen in Abbildung 64 dargestellten Ländern werden letztlich überwiegend kostengünstige Maßnahmen umgesetzt; somit bleiben Kostenaufschläge durch Investitionen auch für die CO<sub>2</sub>-intensive Branchen begrenzt. Daher sind die CO<sub>2</sub>-Preise im Szenario „Deutschland geht voran“ kaum höher als im „BaU“. Zugleich profitiert Deutschland von niedrigeren Emissionen und damit teils geringerem Energieeinsatz. Im Vergleich dazu steigen im Szenario „Europa geht voran“ die CO<sub>2</sub>-Preise gegenüber dem „BaU“ deutlich. Durch die 50-prozentige Übernahme der CO<sub>2</sub>-Kosten seitens des Staates und den geringen Handel von CO<sub>2</sub>-intensive Produkten zwischen Deutschland und Ländern außerhalb der EU ergeben sich wenig negative Effekte. Im Inland wird teilweise CO<sub>2</sub>-intensive Produktion durch neue Verfahren ersetzt. Maschinen oder Autos, die intensiv international gehandelt werden, sind deutlich weniger CO<sub>2</sub>-intensiv und daher weniger vom entsprechenden Preisanstieg betroffen.

Im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ tragen die Unternehmen die CO<sub>2</sub>-Kosten vollständig. Dies wirkt sich auf CO<sub>2</sub>-intensive Produkte aus, sie werden teurer. Das führt zu Substitution dieser Produkte weltweit, allerdings ohne große Auswirkungen auf den Handel mit den entsprechenden Gütern aus deutscher Produktion. Bei den Klimaschutzgütern nimmt das globale Marktvolumen deutlich zu, wobei sich in der abgebildeten Modellstruktur verschiedene Effekte überlagern. Zum einen betreten weitere Hersteller den nun attraktiven Markt,

zum anderen werden Investitionsgüter made in Germany durch andere ersetzt, etwa Gasturbinen durch Windkraftanlagen oder konventionelle Fahrzeuge durch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben. Teilweise verändert sich dadurch auch die im Inland erzielte Wertschöpfung, etwa wenn Batterien oder zumindest die Komponenten im Ausland produziert werden. Insgesamt machen Klimaschutzgüter, bezogen auf die gesamte Produktion und Bruttowertschöpfung, nur einen relativ geringen Anteil (im einstelligen Prozentbereich) aus. Daher sind auch die grundsätzlichen Vorteile, die die entsprechenden Branchen im Export erzielen können, innerhalb der Branchen deutlich und positiv, bezogen auf die gesamte Volkswirtschaft jedoch gering.

Entsprechend unterscheiden sich für einige deutsche Branchen die Effekte auf Bruttowertschöpfung und Beschäftigung in den verschiedenen Szenarien deutlicher, als es der Gesamteffekt (in Abbildung 65 als „alle Branchen“ aufgeführt) vermuten lässt. Am auffälligsten sind die positiven Wirkungen auf die Elektrotechnik. Höhere CO<sub>2</sub>-Preise – oder vergleichbar wirksame Maßnahmen – führen zu einem Umstieg auf Elektromobilität und einer höheren Nachfrage nach elektrischen Ausrüstungen auch in anderen Anwendungen. Stark negative Effekte im Vergleich zum „BaU“ zeigen sich bei Mineralien (wie Zement) und in der Metallherzeugung (wie im Stahl), im Fall des einheitlichen Vorgehens gibt es auch sichtbare Effekte im Transportsektor. Hohe CO<sub>2</sub>-Preise werden diese Branchen im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ stark belasten, weil aktuell keine kostengünstigen alternativen Produktionswege zur Verfügung stehen. Auch die Automobilindustrie verliert durch den Umstieg auf alternative Antriebe und die höheren CO<sub>2</sub>-Preise an Wertschöpfung. In vielen Branchen ergeben sich leicht positive Wertschöpfungseffekte. Dies sind neben vielen Dienstleistungsbranchen auch Industriebranchen, die Klimaschutzgüter herstellen. Im Baugewerbe wird es Verschiebungen hin zum Ausbaugewerbe geben. Viele kleine Gewinner stehen letztlich wenigen deutlichen Verlierern gegenüber.

Abbildung 65  
Abweichungen der Bruttowertschöpfung gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – reale Bruttowertschöpfung, 2030

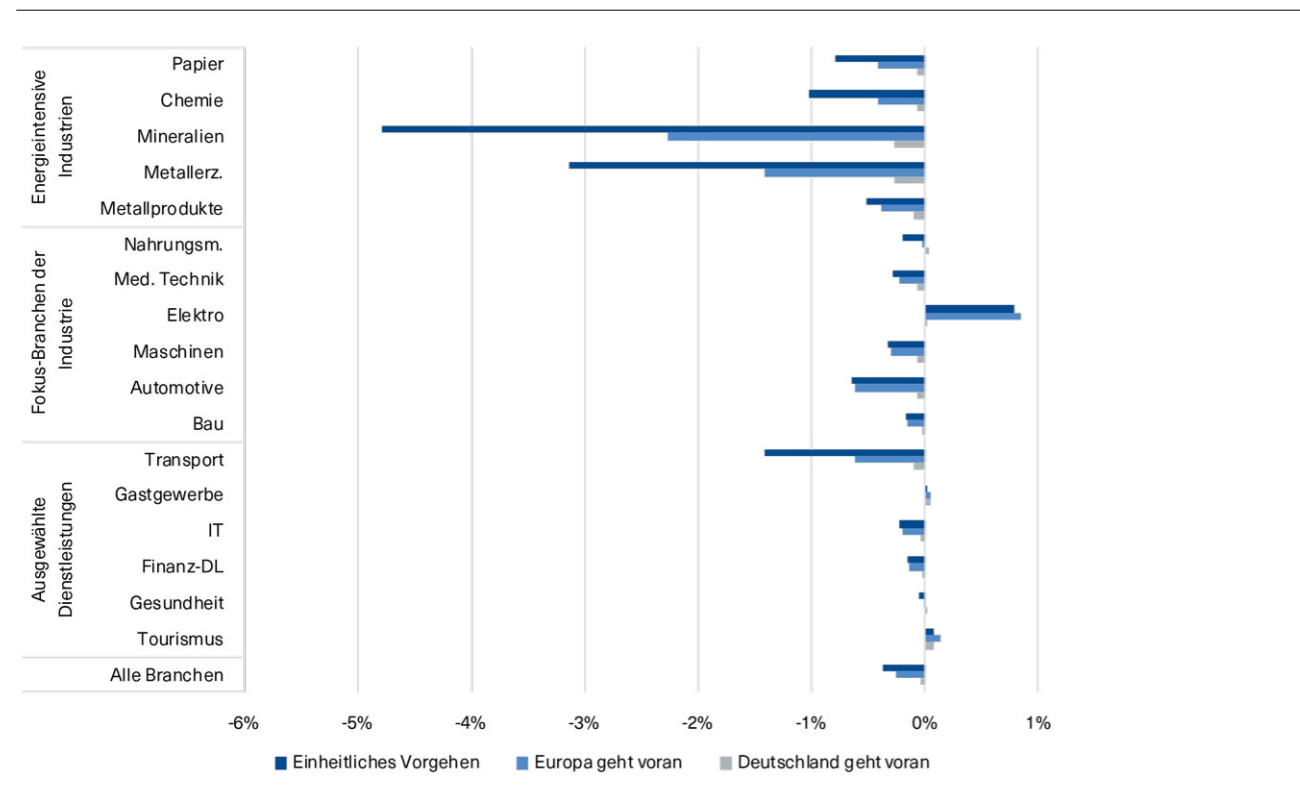


Quelle: GWS, 2020

Ein ähnliches Bild mit allerdings deutlich geringeren Ausschlägen in beide Richtungen zeigt sich bei der Beschäftigung, wobei die Wirkungen etwas negativer ausfallen als bei der Wertschöpfung. Bei leicht höherem BIP und leicht höheren Preisen steigen auch die Löhne, was im Modell zu einem geringen Rückgang der Arbeitsnachfrage führt. Mineralien und Metallerzeugung sind sehr kapitalintensive Produktionsprozesse, in denen Beschäftigungsrückgänge um grob zehn Prozent im Vergleich zum „BaU-Szenario“ bis

2030 schmerzlich, aber verkraftbar sind. In der Automobilindustrie mit rund 800.000 Beschäftigten macht die absolute Differenz bei den Beschäftigten etwa 12.000 Personen aus. Insgesamt weicht die Beschäftigung in allen Szenarien um weniger als ein Prozent im Jahr 2030 vom „BaU“ ab, was bei um die 40 Mio. Beschäftigten eine Differenz in der Größenordnung von ungefähr 350.000 bringt und sich gut in andere bestehende Untersuchungen einfügt.<sup>285</sup>

Abbildung 66  
Abweichungen der Beschäftigung in den Szenarien gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2030



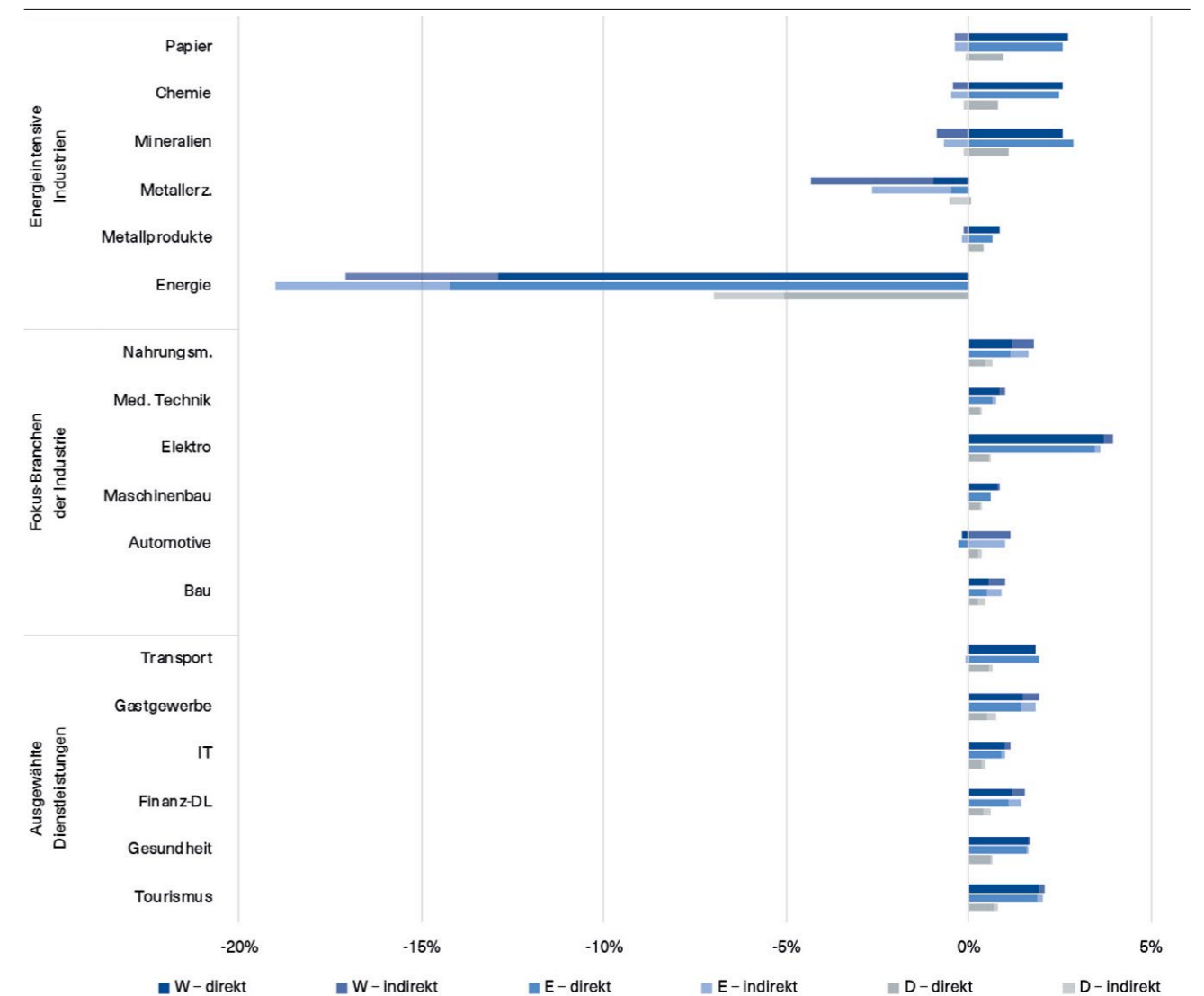
Quelle: GWS, 2020

Bei den ökonomischen Effekten in der Wertschöpfungskette in Deutschland zeigt sich gegenüber dem „BaU-Szenario“ (2030) über alle Klimaschutzenszenarien hinweg in fast allen Branchen ein Anstieg der Bruttowertschöpfung (Abbildung 66); nur im Energiesektor und der Metallerzeugung nimmt sie jeweils ab. Die Anstiege sind im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ (mit „W“ in der nachfolgenden Abbildung bezeichnet) am größten, gefolgt vom Szenario „Europa geht voran“ („E“), während sie im Szenario „Deutschland geht voran“ („D“) nur relativ schwach ausfallen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in einem „Global Level Playing Field“ oder einem „European Level Playing Field“ die Unternehmen in Deutschland von diesen gleichen Rahmenbedingungen besser profitieren, als dies bei einem isolierten klimapolitischen Vorgehen Deutschlands der Fall wäre. In der Regel sind in allen Klimaschutzenszenarien die direkten Wertschöpfungseffekte in den einzelnen Branchen (kräftigere Farben in Abbildung 67) deutlich stärker ausgeprägt als die indirekten Effekte (blassere Farben in Abbildung 67).<sup>286</sup>

<sup>285</sup> z. B. Lutz et al., 2018.

<sup>286</sup> Unter dem direkten Wertschöpfungseffekt versteht man die direkt von der Branche selbst generierte Wertschöpfung, während der indirekte Wertschöpfungseffekt die durch die jeweilige Branche infolge ihrer Vorleistungskäufe in anderen Branchen generierte Wertschöpfung umfasst.

Abbildung 67  
Veränderung der direkten und indirekten Bruttowertschöpfung in den Szenarien gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2030



„W“= Szenario „Einheitliches Vorgehen“, „E“= Szenario „Europa geht voran“, „D“= Szenario „Deutschland geht voran“

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Im Hinblick auf die Emissionsentwicklung in den Wertschöpfungsketten führt der Szenarienvergleich für das Jahr 2030 zu folgenden zentralen Ergebnissen:

- Es gibt einen Basistrend hin zur Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Effizienz für alle drei betrachteten Branchencluster („Energieintensive Industrien“, „Fokus-Branchen der Industrie“ und „Ausgewählte Dienstleistungen“) in der Reihenfolge „Business as Usual“, „Deutschland geht voran“, „Europa geht voran“ und „Einheitliches Vorgehen“. Dies ist insofern nicht verwunderlich, als die CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotenziale umso effizienter und kostengünstiger realisiert werden können, je größer der regionale Wirkungskreis der intendierten CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen ist (Tabelle 6 und Tabelle 7).

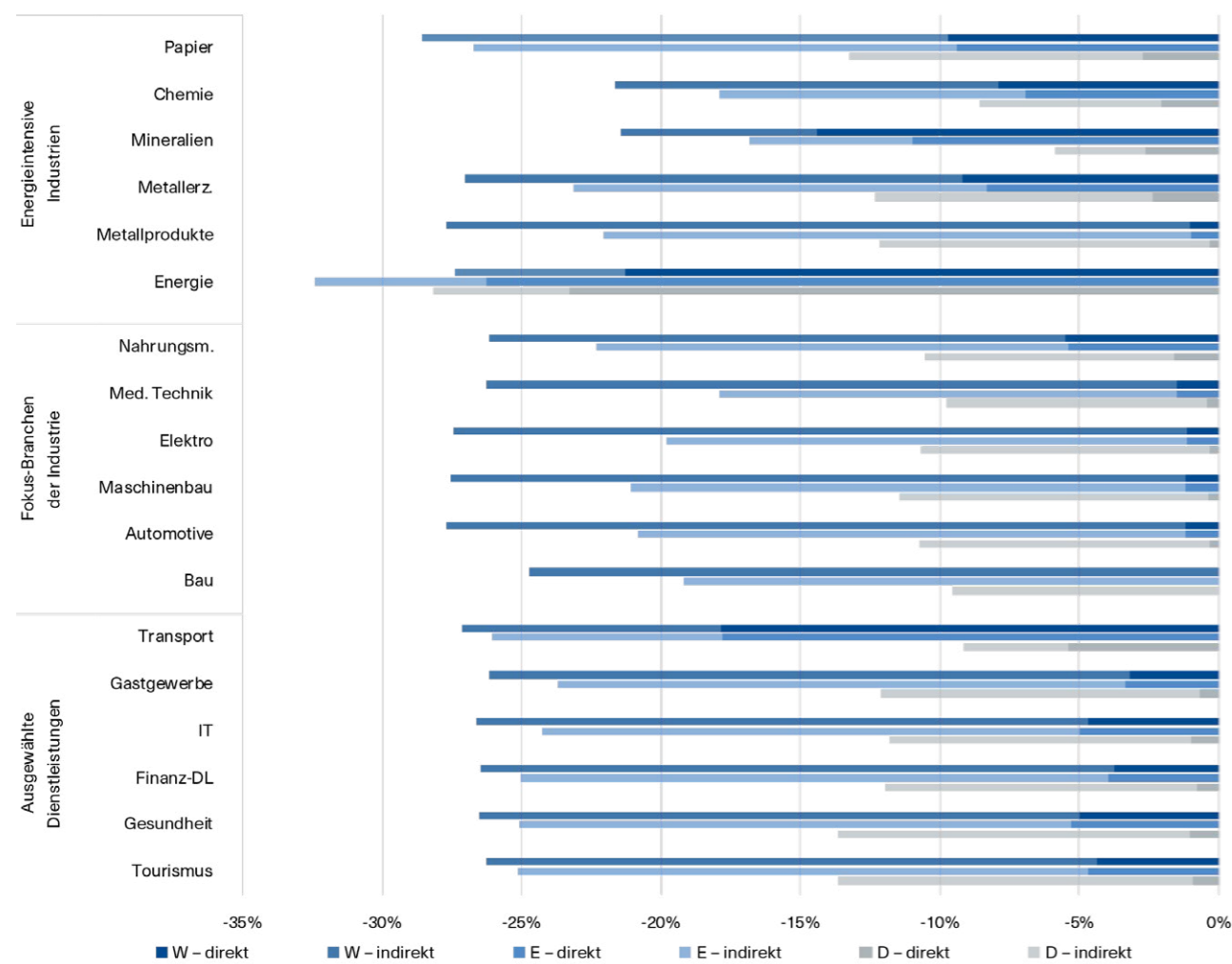


- Der Trend zur Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Effizienz für alle drei betrachteten Branchencluster in der Reihenfolge „BaU“, „Deutschland geht voran“, „Europa geht voran“ und „Einheitliches Vorgehen“ zeigt sich auch in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen in Form sinkender indirekter absoluter CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie sinkender indirekter CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den betrachteten Branchen und Branchenclustern (Tabelle 6 und Tabelle 7).
- Die Stärke der Effekte hinsichtlich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten hängt zum einen von der Entwicklung der absoluten direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen und zum anderen vom Wachstum der Produktion in den betrachteten Branchen und Branchenclustern ab. Jedoch sinken in den Klimaschutzszenarien „Deutschland geht voran“, „Europa geht voran“ und „Einheitliches

Vorgehen“ auch die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen drei Branchenclustern. Je ambitionierter und regional begrenzter die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele in den Szenarien ausgestaltet sind, desto negativer wirken sie sich in der Regel auf die Wertschöpfung in den einzelnen Branchen am Standort Deutschland aus.

In Abbildung 68 ist die Veränderung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ („W“), „Europa geht voran“ („E“) und „Deutschland geht voran“ („D“) gegenüber dem Szenario „BaU“ für das Jahr 2030 nach Branchen dargestellt. Die blasseren Farben zeigen dabei den Anteil der Gesamtveränderung, der auf die indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten zurückzuführen ist, die kräftigen Farben den Anteil, der sich auf die direkten CO<sub>2</sub>-Intensitäten zurückführen lässt.

Abbildung 68  
Veränderung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2030



„W“= Szenario „Einheitliches Vorgehen“, „E“= Szenario „Europa geht voran“, „D“= Szenario „Deutschland geht voran“

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Tabelle 6  
Vergleich der CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Business as Usual“ und in den Abweichungsszenarien, 2030, in Tonnen CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD

2030		Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Dienstleistungen
„BaU“	<b>gesamt</b>	<b>403</b>	<b>109</b>	<b>142</b>
	direkt	235	6	68
	indirekt	169	103	74
D	<b>gesamt</b>	<b>321</b>	<b>97</b>	<b>127</b>
	direkt	179	5	62
	indirekt	143	92	65
E	<b>gesamt</b>	<b>283</b>	<b>86</b>	<b>105</b>
	direkt	153	4	48
	indirekt	130	83	57
W	<b>gesamt</b>	<b>285</b>	<b>80</b>	<b>103</b>
	direkt	160	4	48
	indirekt	124	76	56

„W“= Szenario „Einheitliches Vorgehen“, „E“= Szenario „Europa geht voran“, „D“= Szenario „Deutschland geht voran“.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

### 02.3 Einordnung der volkswirtschaftlichen Effekte

Im Rahmen der Studie wurden Struktureffekte in vier konsistenten Szenarien mit unterschiedlichen Klimaschutzregimen und deutschen bzw. EU-Ambitionen beim Klimaschutz quantifiziert. Das Ergebnis eines leicht positiven BIP-Effekts steht in Einklang mit verschiedenen Studien von und für internationale Organisationen wie OECD (2017), IMF (2016), Europäische Kommission (2018) und IRENA (2020).

Zentrale Annahmen für die leicht positiven gesamtwirtschaftlichen Effekte sind:

1. Viele Klimaschutzinvestitionen lohnen sich bei den unterstellten CO<sub>2</sub>-Preisen, und diejenigen, die sich lohnen, werden umgesetzt. Für die zusätzlich erforderlichen Investitionen werden günstige Rahmenbedingungen geschaffen, sodass die zusätzlichen Investitionen ebenfalls umgesetzt werden.
2. Klimaschutztechnologien stehen bereit bzw. werden durch staatliche Förderung und globalen Markthochlauf schnell günstiger.
3. Klimaschutzinvestitionen werden gerade auch in CO<sub>2</sub>-intensiven Branchen umgesetzt.

Auf dem Weg zu einer weitgehend treibhausgasneutralen Wirtschaft sind einige CO<sub>2</sub>-intensive Branchen „natürliche“ Verlierer – sie machen in den meisten Ländern aber nur einen kleinen Teil der Wertschöpfung aus. Auch ein „Einheitliches Vorgehen“ kann dies nicht verhindern, allenfalls die Kosten für emissionsarme bzw. -freie Technologien entlang globaler Lernkurven senken. Verlierer auf Länderebene sind die großen Förderländer fossiler Energien, die überdurchschnittlich negativ von internationalen Klimaschutzanstrengungen betroffen sind.

### Auch in Deutschland sind die CO<sub>2</sub>-intensiven Branchen die Verlierer von Klimaschutzmaßnahmen.

Wenn sie im internationalen Wettbewerb stehen, sollten sie von Kosten des Klimaschutzes entlastet werden, wie dies aktuell durch die EU erfolgt: Sektoren, deren Produktion von Verlagerung durch hohe CO<sub>2</sub>-Kosten bedroht ist, erhalten alle Emissionsrechte kostenfrei zugeteilt, wobei ein produktspezifischer Richtwert unterstellt wird. Die einzelnen Sektoren werden in der sogenannten Carbon-Leakage-Liste geführt. Zum Schutz CO<sub>2</sub>-intensiver Branchen wird auf EU-Ebene für den Fall international unterschiedlicher Klimaschutzambitionen auch ein Carbon Border Adjustment (CBA) diskutiert (Kasten 26). Außerdem bietet sich eine verstärkte Förderung von Forschung und Entwicklung etwa von Pilotanlagen an, wie dies etwa für die Stahlindustrie von der Bundesregierung bereits umgesetzt wird.

#### Kasten 26

##### Carbon Border Adjustment (CBA)

Die bisher geltende freie Zuteilung von Emissionsrechten für betroffene, auf der Carbon-Leakage-Liste geführte Branchen kann eine Produktionsverlagerung nicht in jedem Fall verhindern. Vor allem auf der Importseite ist eine verstärkte Einfuhr CO<sub>2</sub>-intensiv produzierter Güter bei höheren CO<sub>2</sub>-Preisen in der EU möglich. Daher werden unter dem Stichwort Carbon Border Adjustment (CBA) verschiedene Ausgestaltungsoptionen zur Erweiterung des EU-Emissionshandelssystems (ETS) diskutiert, wie bspw. eine Einbeziehung von Importen bestimmter CO<sub>2</sub>-intensiver Güter in das EU-ETS, eine symmetrische Preisanpassung bei Ex- und Importen sowie eine Klimaabgabe auf alle Güter, die in der EU verkauft werden (damit würde bspw. der Stahl in einem Auto unabhängig vom Produktionsort des Stahls belastet werden). Die Zuteilung von Emissionszertifikaten und die Einbeziehung von Exporten ist teilweise unterschiedlich vorgesehen. Schließlich werden weitergehende Ansätze diskutiert, in die das EU-ETS überführt werden könnte.

Der Europäische Rat hat am 21.07.2020 die Europäische Kommission aufgefordert, einen entsprechenden Mechanismus im Jahr 2021 vorzuschlagen, der zum 01.01.2023 in Kraft treten könnte. Die Europäische Kommission erwartet jährliche Einnahmen von fünf bis 14 Mrd. Euro, die zur Mitfinanzierung des Wiederaufbaufonds (Kasten 14) in Höhe von 750 Mrd. Euro genutzt werden könnten.

Die folgende Tabelle zeigt am Beispiel des Szenarios „Europa geht voran“ für das Jahr 2030, um welche Größenordnungen es bei einem CBA-Mechanismus gehen könnte. Den Berechnungen ist ein CO<sub>2</sub>-Preis in der EU von 100 USD im Jahr 2030 zugrunde gelegt. Die Importe aus den USA, China und Indien sind in der folgenden Tabelle mit diesem Preis bewertet. Deutschland importiert im Jahr 2030 in diesem Szenario Chemieprodukte aus den USA im Wert von 8,39 Mrd. USD. Die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Intensität der US-Produktion liegt in diesem Jahr bei 215,74 Tonnen CO<sub>2</sub>/Mio. USD. Ziel eines CBA wäre es demnach, die US-Chemieprodukte mit 181 Mio. USD zu belasten, damit sie faktisch dem gleichen CO<sub>2</sub>-Preis unterliegen wie die europäischen (im Beispiel aus Vereinfachungsgründen die deutschen) Hersteller (Berechnung: 8,39 Mrd. USD x 215,74 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD x 100 USD = 181 Mio. USD). Importe von Mineralien aus den USA wären mit knapp 89 Mio. USD zu belasten, Metallerzeugnisse mit knapp 84 Mio. USD, insgesamt beläuft sich die Mehrbelastung für US-Hersteller der drei Produktgruppen auf fast 354 Mio. USD. Für China macht die Differenz sogar 411 Mio. USD aus. Bei diesen Werten handelt es sich allerdings um abgeschätzte Obergrenzen, denn gerade ein Teil der chemischen Produkte (Pharmazie) unterliegt nicht dem EU-ETS. Und im Szenario werden 50 Prozent der Zertifikate kostenlos zugeteilt, was sich im CBA-Mechanismus entsprechend niederschlagen müsste.

Tabelle 7

##### Wert des CO<sub>2</sub> auf den deutschen Importen im Jahr 2030 in Mio. USD

	USA	China	Indien
Chemie	181,01	189,97	78,54
Mineralien	88,66	150,64	39,66
Metallerzeugung	83,90	70,49	40,40
<b>Summe</b>	<b>353,57</b>	<b>411,10</b>	<b>158,60</b>

Quelle: Eigene Berechnungen GWS und TwinEconomics

Die Struktur des internationalen Handels mit den drei Gütergruppen zeigt im Übrigen, dass der überwiegende Teil des deutschen Außenhandels dieser Produkte innerhalb der EU bzw. des EU-ETS Handelsraums (EU-27 plus Vereinigtes Königreich, Schweiz, Lichtenstein und Norwegen) erfolgt (82 Prozent bei Chemie, 72 Prozent bei Mineralien und 87 Prozent bei Metallerzeugung).

In Wirklichkeit wären die Verfahren zur Festlegung der CBA-Sätze für Importgüter noch sehr viel schwieriger. Einzelne Produkte lassen sich nicht mit nationalen Durchschnittswerten belegen. Am Beispiel Stahl lässt sich eines der Umsetzungsprobleme von CBA verdeutlichen, nämlich die Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Intensität bzw. korrekterweise des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks eines Produkts. Stahl wird derzeit mit Kokskohle im Hochofen oder im Elektrostahlverfahren erzeugt. Die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind über die Hochofenroute sehr hoch, bei Elektrostahl sind sie null. Perspektivisch kann im Hochofen Wasserstoff die Kokskohle ersetzen oder das CO<sub>2</sub> kann abgeschieden und wiedergenutzt werden. In beiden Fällen wären die direkten Emissionen ebenfalls null. Erste Testverfahren dazu laufen. Die indirekten Emissionen hängen beim Elektrostahlverfahren vom Strommix ab, der in Ländern mit hohem Anteil an CO<sub>2</sub>-freier Stromerzeugung sehr viel niedriger ausfällt als in Ländern mit hohem Kohlestromanteil. Es stellt sich die Frage, wie mit Stahlimporten folglich in einem CBA-Mechanismus umzugehen ist.

Es gibt nach Ismer et al. (2020) drei grundsätzliche Verfahren für CO<sub>2</sub>-intensive Produkte:

- (1) Importeure müssen CO<sub>2</sub>-Zertifikate in Höhe des jeweiligen Produktbenchmarks erwerben oder nachweisen, dass ihr Produkt mit niedrigeren Emissionen verbunden ist, und dann entsprechende Zertifikate vorlegen. Die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten entfällt.

- (2) Symmetrische Verfahren für Importeure (wie unter 1) und Exporteure werden eingeführt. Europäische Exporteure der Produkte würden dann entsprechend entlastet.
- (3) Das EU-ETS wird um eine Klimaabgabe für in der EU verkauften Produkte erweitert. Die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten für die ausgewählten Produkte würde sich dann an Produktbenchmarks (z. B. für Stahl) orientieren.

Was für Stahl schon schwierig ist, wäre für weiterverarbeitete Produkte wie Autos noch schwieriger. Das ist nur ein Beispiel für verschiedene offene Fragen, die sich bezüglich der konkreten Umsetzung von CBA stellen. Ein Positionspapier der vbw (2020) stellt weitere Herausforderungen und Unwägbarkeiten zusammen; als wichtigen Punkt, ob CBA einen gleichwertigen Schutz für CO<sub>2</sub>-intensive Industrien bieten könnte wie die derzeitigen Regelungen. Es kommt zu dem Schluss, dass eine Weiterentwicklung des EU-ETS im internationalen Kontext mit dem Ziel eines globalen CO<sub>2</sub>-Preises dem CBA vorzuziehen wäre. Sollte die EU doch ein CBA einführen, müssten wichtige Kriterien sichergestellt sein:

- Mindestens gleichwertiger Schutz der betroffenen Industrie im Vergleich zu heute,
- anerkannte und leicht umsetzbare Verfahren zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks und
- Beschränkung auf Grundstoffe und keine Diskriminierung nach Herkunftsland.

Denn abgesehen von Problemen der konkreten Umsetzung ist zu beachten, dass CBA den internationalen Handel einschränken könnte oder zumindest von anderen Ländern und Handelsregionen als solche Einschränkung interpretiert werden könnte. Handelspolitische Gegenmaßnahmen könnten die Folge sein.

Wertschöpfung und Beschäftigung in den Szenarien können vor allem Dienstleistungen und Hersteller von Klimaschutzgütern leicht steigern. Ähnliche Ergebnisse zeigen auch Impact Assessments für die Europäische Kommission (2018) und eigene Arbeiten (Lutz et al. 2018, siehe Kasten 27), auch wenn die Ergebnisse nach Branchen von den genutzten Modellen und den konkreten Szenarien abhängen und entsprechend etwas unterschiedlich ausfallen. So werden in anderen Quantifizierungen häufig die Bauwirtschaft und auch der Maschinenbau als Gewinner von verstärktem Klimaschutz ausgewiesen. So profitiert die Bauwirtschaft u. a. stark von Gebäudesanierungsprogrammen, die zumindest bei einem Teil der Gebäude allerdings mit Minderungskosten verbunden sind, die über den CO<sub>2</sub>-Preisen in den quantifizierten Szenarien liegen. D. h., dass je nach Ausgestaltung der Szenarien (CO<sub>2</sub>-Preis optimiertes Szenario vs. von der Politik konkret umgesetzte Maßnahmen) auch die Brancheneffekte teils unterschiedlich ausfallen. Ein Umstieg auf erneuerbare Energien ist in verschiedenen Fällen eine deutlich kostengünstigere Alternative, von der stärker die Anlagenbauer aus Elektrotechnik und Maschinenbau profitieren würden. Ein Ausbau der Windenergie ist z. B. wiederum vorteilhaft für den Maschinenbau. Je nach – sehr einfacher – „Übersetzung“ der implizit unterstellten Technologien in liefernde Industrien fallen die Ergebnisse in den ökonomischen Modellen unterschiedlich aus.

Bei der Interpretation und dem Vergleich der Ergebnisse sind die unterschiedlichen Annahmen in den drei Szenarien zu berücksichtigen. Es ist kein direkter Vergleich von zwei Szenarien möglich (im Sinne von „A ist besser als B“), weil sich die Szenarien in verschiedenen

Punkten unterscheiden. Im Falle eines EU-Alleingangs wird die emissionsintensive Industrie durch Mechanismen geschützt, die im Fall des einheitlichen Vorgehens nicht haltbar sind. Insofern könnte ein Szenario, das die Schutzmechanismen trotz EU-Alleingangs beseitigt, den gesamtwirtschaftlichen Vorteil der Regelungen zeigen und würde im Szenarienvergleich die Vorteilhaftigkeit eines einheitlichen Vorgehens erhöhen; politisch wäre es jedoch hochgradig unwahrscheinlich. Es lassen sich auch keine Aussagen zu den Effekten des nationalen Klimapakets treffen, da dieses nicht explizit abgebildet und abgegrenzt wurde.

Abschließend bleibt zu betonen, dass die negativen Kosten des Klimawandels in der Quantifizierung nicht berücksichtigt wurden. Nach Literaturangaben ist davon auszugehen, dass die Kosten des Klimawandels ohne ambitionierten internationalen Klimaschutz deutlich größer ausfallen könnten als die beschriebenen Wirkungen des Klimaschutzes.

#### Kasten 27

##### Ökonomische Effekte der Energiewende (Gebäude, Mobilität, erneuerbare Energien)

Die Energiewende ist eine Querschnittsaufgabe und ihre Auswirkungen finden sich in vielen Wirtschaftssektoren. In Lutz et al. (2018) wurde ein Energiewende-Szenario (EWS) einem kontrafaktischen Szenario (KFS), d. h. einer alternativen Entwicklung, bei der ab dem Jahr 2000 der Pfad der Energiewende nicht verfolgt wird, gegenübergestellt und die jeweiligen Ergebnisse von ökonomischen Größen wie BIP, sektorale Wertschöpfung oder Beschäftigung miteinander verglichen. Die Unterschiede in diesen ökonomischen Indikatoren lassen sich dann als gesamtwirtschaftliche Wirkung der mit der Energiewende verbundenen Maßnahmen und Instrumente interpretieren (Abbildung 69).

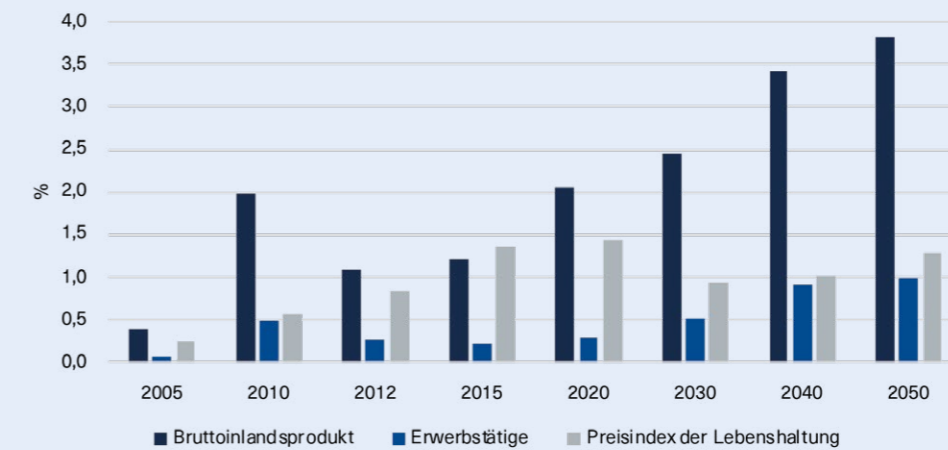
BIP und Erwerbstätigkeit liegen im EWS-Szenario immer höher als im KFS. Bereits in der Vergangenheit haben höhere Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energien die gesamtwirtschaftliche Investitionsrate leicht erhöht. Importe fossiler Energieträger konnten gerade in Jahren sehr hoher Energiepreise wie 2008 bis 2014 dadurch deutlich reduziert werden. Der deutliche Anstieg des Preisindex für die Lebenshaltung reflektiert die Refinanzierung der hohen Investitionen unter anderem in Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien in den Jahren ab 2010.

Die sektorale Betrachtung unterstützt die Identifikation von „Gewinnern“ und „Verlierern“ der Energiewende. Lutz et al. (2018) unterscheiden als fünf aggregierte Wirtschaftsbereiche das verarbeitende Gewerbe, den Bergbau mit der Energieversorgung, die Bauwirtschaft, den Handel mit Kfz-, Groß- und Einzelhandel, Verkehre sowie Postdienste. Alle übrigen Dienstleistungsbranchen sind unter Dienstleistungen zusammengefasst.

Natürlich hängen die Auswirkungen auf Beschäftigung und Produktion in einzelnen Branchen stark von der konkreten Umsetzung der Energiewende ab. Pfade mit Technologien, die überwiegend im Ausland produziert werden, führen im Inland weniger zu Beschäftigung in der Produktion, sondern bei den mit der Planung, der Installation und dem Betrieb befassten Wirtschaftszweige. Die Untersuchung weist die Effekte der vergangenen Energiewende (seit 2000) und die zukünftigen Effekte aus. Bis 2015 treten die größten positiven Beschäftigungswirkungen in absoluten Zahlen im verarbeitenden Gewerbe, im Bau und bei den Dienstleistungen auf (Abbildung 70). Bei Bergbau und Energieversorgung sind die Beschäftigungswirkungen durchgehend leicht negativ.

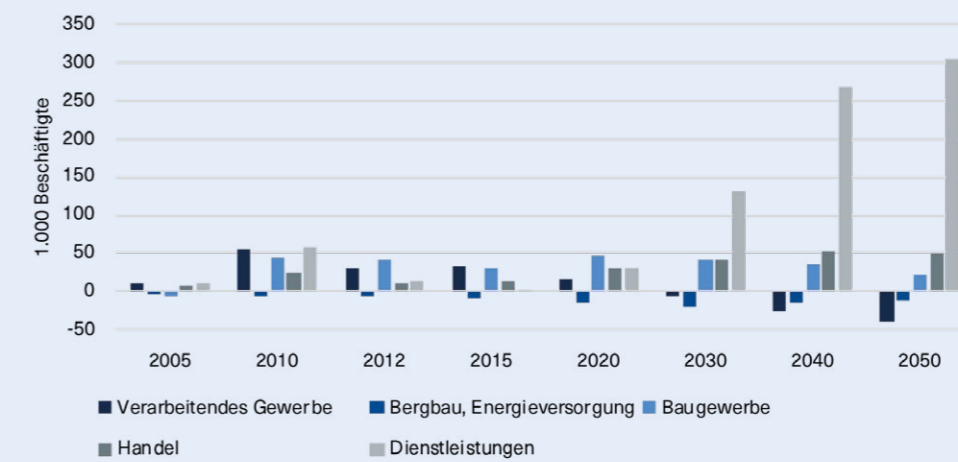
Der leichte Beschäftigungsrückgang im verarbeitenden Gewerbe ab 2030 ist für sich genommen zunächst kontraintuitiv, weil die Produktion von Energiewendegütern hoch bleibt. Da die Volkswirtschaft in allen Szenarien einen hohen Beschäftigungsstand aufweist, übersetzt sich hohe Nachfrage nach diesen Gütern jedoch eher in hohe Löhne als in hohe zusätzliche Beschäftigung. Eine deutliche Zunahme der Beschäftigung zeigen die Dienstleistungen und auch der Handel sowie die Bauwirtschaft, Letztere vor allem wegen zusätzlicher Energieeffizienzmaßnahmen und des Netzausbaus.

Abbildung 69  
BIP, Beschäftigung und Preisindex der Lebenshaltung –  
Abweichungen im EWS vom KFS



Quelle: GWS, 2020

Abbildung 70  
Beschäftigung nach Sektoren – Abweichungen im EWS vom KFS



Quelle: GWS, 2020

## 03

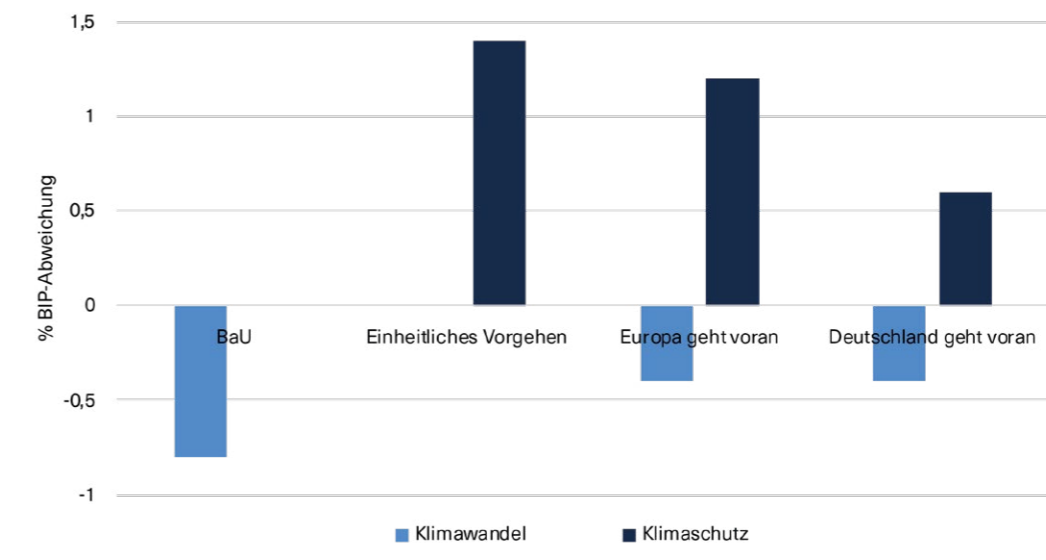
## Fazit aus der Szenarienanalyse

**Nur mit international abgestimmten Anstrengungen kann der globale Temperaturanstieg im handhabbaren Zielkorridor gehalten werden. Für Deutschland lohnt sich Klimaschutz jedoch auch, wenn nicht alle Länder gleichermaßen mitmachen.**

Die derzeitigen weltweiten politischen Anstrengungen und aktuell in Kraft befindlichen Maßnahmen reichen nicht, um das Klimaschutzziel des Pariser Abkommens zu erreichen. Wenn die aktuellen Politiken ohne Verschärfung und internationale Abstimmung (ohne den European Green Deal und ohne Klimapakete) weiter fortgeführt werden, ist zu erwarten, dass sich die globale Erwärmung auf einen Wert über 4,8 bis 5,6 Grad C bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter bewegt. Dies führt dazu, dass sich volatile Bedingungen einstellen werden, unter denen die Kosten des Klimawandels, also Risiken, Schadens- und Anpassungskosten, weltweit die Volkswirtschaften spürbar belasten werden. Diese könnten die positiven BIP-Effekte deutlich schmälern, besonders in den Szenarien mit Erwärmung über 2 Grad C. Erwartete (direkte) Minderung des BIP in Deutschland in den Szenarien liegen im „BaU“ (Erwärmung bis über 4 Grad C) bei unter 1 Prozent, in den Szenarien „Deutschland geht voran“/ „Europa geht voran“ (Erwärmung 3 Grad C) bei unter 0,2 bis 0,5 Prozent, während bei „Einheitlichem Vorgehen“ (Erwärmung unter 2 Grad C) keine weiteren Schäden zu erwarten sind. Allerdings sind gerade disruptive Effekte wie Unbewohnbarkeit, Hungersnöte und Migrationsströme in anderen Teilen der Welt möglich, die auch auf Deutschland negativ rückwirken würden, aber kaum zu beziffern sind. Wegen der Trägheit des Klimasystems dürften die Effekte bis 2100 immer weiter zunehmen.

Die Kosten resultieren insbesondere daraus, dass die fortschreitende Erderwärmung voraussichtlich erhebliche Risiken, Schäden und Anpassungserfordernisse mit sich bringt. Die Auswirkungen und Kosten des Klimawandels sind hochgradig regionsspezifisch und von großer Unsicherheit geprägt. Anpassungsmaßnahmen vor allem in Infrastruktur können die Effekte vor Ort begrenzen. Abbildung 71 zeigt die Veränderung des BIP in Deutschland durch die Kosten des Klimawandels (ungenau abgeschätzt) im Vergleich zu den BIP-Effekten in den einzelnen Szenarien gegenüber dem „Business as Usual“-Szenario. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel bleiben in allen Szenarien bezahlbar.

Abbildung 71  
BIP-Effekte des Klimawandels und Klimaschutzes (grobe Abschätzung)



Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Handhabbarer Temperaturkorridor

Der noch handhabbare Temperaturkorridor des 2-Grad-Ziels (1,5 bis 2 Grad C bis 2100) kann nur erreicht werden, wenn mit weltweiten Abstimmungen die Treibhausgas-Emissionen schnell und konsequent reduziert werden. Hierbei müssen die Industrieländer die Emissionen bis 2050 – besser noch früher – auf null reduzieren, damit den Entwicklungs- und Schwellenländern noch gewisse Budgets für ihren wirtschaftlichen Aufholprozess zur Verfügung stellen. Auch sie müssen jedoch die Emissionen und die Nutzung fossiler Energieträger deutlich reduzieren und den Anteil erneuerbarer Energieträger an ihrem Energiemix signifikant erhöhen.

#### Vorgehen Europas oder Deutschlands

Ein reines Vorgehen Europas oder Deutschlands wird die Emissionen nicht so weit reduzieren können, dass der erforderliche Temperaturkorridor erreicht wird – die absehbaren volkswirtschaftlichen Schäden durch den Klimawandel werden deutlich sein.

Die Emissionsreduktionen sind zu großen Teilen mit technischen Maßnahmen erreichbar – vor allem mit dem konsequenten Einsatz von Energieeffizienztechnologien, dem vollständigen Einsatz von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung, der Elektrifizierung von Verkehr und (Niedertemperatur-)Wärme, veränderten Industrieprozessen, CCS/CCU sowie Negativ-Emissionstechnologien. Die energie-/CO<sub>2</sub>-intensiven Branchen (v.a. Metall, Glas, Keramik, Zement) machen nur einen kleinen Teil der Wertschöpfung

aus. Sie werden bei der Transformation Unterstützung benötigen. Für die globale Umsetzung wird ein Technologietransfer in Entwicklungs- und Schwellenländer erforderlich sein, der den Industrieländern auch Chancen bietet. Zur Erreichung der notwendigen starken Emissionsreduktionen um 95 Prozent bis 2050 oder „Netto-Null“ ist internationale Zusammenarbeit sowohl bei den politischen Rahmenbedingungen als auch bei der Technologieentwicklung notwendig – sonst kann das notwendige Tempo sowohl bei den Lerneffekten als auch bei der Umsetzung nicht erreicht werden.

In Deutschland und gerade auch in Bayern werden bereits jetzt zahlreiche der benötigten Technologien entwickelt und hergestellt. Wenn in Deutschland konsequenter Klimaschutz betrieben wird, sind entsprechende Investitionen erforderlich. Diesen stehen eingesparte Kosten für fossile Energieträger gegenüber. Da ein Großteil der erforderlichen Investitionen bei inländischen Unternehmen produziert wird, also dort sowie in den – ebenfalls großteils inländischen – Vorleistungsketten zu Aufträgen führt, sind die volkswirtschaftlichen Auswirkungen insgesamt leicht positiv (im kleinen einstelligen Prozentbereich). Dies gilt selbst dann, wenn Deutschland mit dem Klimaschutz vorangeht (Szenario 4) und der Rest der Welt geringere Umsetzungsgeschwindigkeiten verfolgt! Der Beginn einer ambitionierten Klimaschutzstrategie von Deutschland und Europa ist also volkswirtschaftlich nicht nachteilig und bietet den Vorteil, erforderliche Technologien zeitnah und konsequent zu

entwickeln und so neue Export- und Wachstumsmöglichkeiten zu erschließen. Europäische Kooperation bietet auf jeden Fall Vorteile, globale Kooperation erhöht diese noch deutlich.

Auch andere Teile der Welt werden in den kommenden Jahrzehnten zu ambitioniertem Klimaschutz gezwungen sein, ob durch kluge Vorausschau, getrieben durch Klimaschäden, oder einfach deshalb, um den Anschluss bei den Klimaschutztechnologien nicht zu verpassen. Deutschland muss in jedem Fall seine Klimaschutzziele erreichen. Es gibt keinen anderen Weg. Für Deutschland lohnt sich Klimaschutz selbst in dem Fall, dass nicht alle Länder gleichermaßen mitmachen, weil die gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimaschutzes recht klein sind. Die ausgewiesenen Effekte liegen im Prozentbereich, sind aber im Vorzeichen signifikant und werden auch in anderen Studien in vergleichbaren Größenordnungen berichtet.

#### **Schutzmechanismen**

Für den Fall, dass Deutschland allein vorangeht, sind Schutzmechanismen für die besonders betroffenen Branchen wichtig. Es wird dabei in jedem Fall zu gewissen Verschiebungen in der Wertschöpfung von energieintensiven Branchen zu Branchen wie Dienstleistungen kommen, die schon bisher wenig CO<sub>2</sub>-intensiv waren. Und auch innerhalb der Branchen, die Investitions- und spezifische Klimaschutzgüter herstellen, wird es deutliche Veränderungen geben, die in der aggregierten Branchenbetrachtung gar nicht sichtbar sind. So können Hersteller von Windenergieanlagen profitieren, während Hersteller einer Gasturbine mit sinkenden Umsätzen rechnen müssen. CO<sub>2</sub>-intensive Branchen werden in jedem Fall durch CO<sub>2</sub>-Preise und Klimaschutz insgesamt belastet. Die notwendige Umstellung auf treibhausgasneutrale Verfahren ist auch eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die wie der Kohleausstieg entsprechend unterstützt werden muss. Dabei ist besonders zu beachten, dass die sehr kapitalintensiven Prozesse im Rahmen ohnehin notwendiger Erneuerungsmaßnahmen umgestellt werden, die im Zeitraum bis 2050 bei einigen Technologien nur einmalig erfolgen werden. Diese Zeitfenster dürfen nicht verpasst werden.

#### **Gewinnerbranchen**

Die dadurch in den „Gewinnerbranchen“ Maschinenbau, Anlagenbau, Elektrotechnik, Werkstoffe, Baugewerbe und damit das Handwerk, industriennahe Dienstleistungen und sonstige Dienstleistungen erzielten höheren Wertschöpfungen und Beschäftigungen übersteigen die Verluste in den herausgeforderten Branchen, nämlich konventionelle Energiewirtschaft (Kohle, Mineralöl, Gas) sowie Metall- und Grundstoffherstellung. Letztere kommen unter Druck, bleiben jedoch insgesamt weiterhin mit produktiven Unternehmen im Land (aufgrund von Carbon Border Adjustment). Teile des Handwerks können ebenfalls als Gewinner eingeordnet werden. Die Automobilindustrie muss sich aufgrund der erforderlichen Antriebswechsel zusammen mit den zu erwartenden Transformationen der (Digitalisierung der) Verkehrssysteme stark wandeln. Sie hat hierfür aufgrund der leistungsfähigen „Ökosysteme“ aus großen finanzstarken Konzernen und mittelständischen, innovativen und schnellen Zuliefernetzwerken sehr gute Voraussetzungen, diesen Wandel zu meistern.

Die Wertschöpfungsketten bleiben insgesamt robust und in allen Szenarien werden die Emissionen über die gesamten Ketten verringert, erwartungsgemäß am stärksten im Szenario „Einheitliches Vorgehen“.

#### **Fazit**

Als Fazit zeigt sich, dass sich die Entwicklung und ambitionierte Anwendung von Klimaschutztechnologien für Deutschland und deutsche Unternehmen in jedem Fall lohnen. Die anbietenden Unternehmen erschließen weitere Märkte bzw. können sich an ihren angestammten Märkten behaupten. Die meisten anwendenden und umsetzenden Unternehmen werden durch Effizienzmaßnahmen und Nutzung erneuerbarer Energien wettbewerbsfähiger, wenn sich die weltweiten Rahmenbedingungen infolge der Klimaschutzziele ändern. Je mehr internationale Kooperation erreicht werden kann, umso mehr Klimaschutz für die Welt wird erreicht und umso erfolgreicher können die notwendige Technologieentwicklung und Transformation der Systeme erfolgen.

## Szenario 1

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Szenario 1

## Business as Usual

**Die fossilen Energieträger bleiben weltweit dominant, die weltweiten Emissionen steigen, in den Industrieländern sinken die Emissionen leicht.**

Eine Zusammenfassung finden Sie auf S. 153

## Veränderungen im Energiesystem und bei den Emissionen

## Veränderungen im Energiesystem: Primärenergieverbrauch

In den Energiesystemen dominieren 2040 weltweit weiterhin fossile Energieträger, die durch einen im Vergleich zu 2018, nur leicht steigenden Anteil erneuerbarer Energien ergänzt werden (+3 Prozent). D.h. der Verkehr wird weiterhin zu einem großen Teil mit Mineralölprodukten angetrieben, die Industrie nutzt fossile Energieträger zur Prozesswärmeproduktion und Kohle sowie Kernkraft behalten ihre Rolle bei der weltweit steigenden Stromerzeugung. Dennoch sollte darauf hingewiesen werden, dass die erneuerbaren Energien in der zunehmend energiehungrigen Welt ebenfalls stark wachsen: Die energetische Nutzung von Bioenergie nimmt um fast 450 Prozent zwischen 2018 und 2040 zu, die sonstigen erneuerbaren Energien (vor allem Wasserkraft, Photovoltaik und Windenergie) werden fast vervierfacht (Abbildung 72).

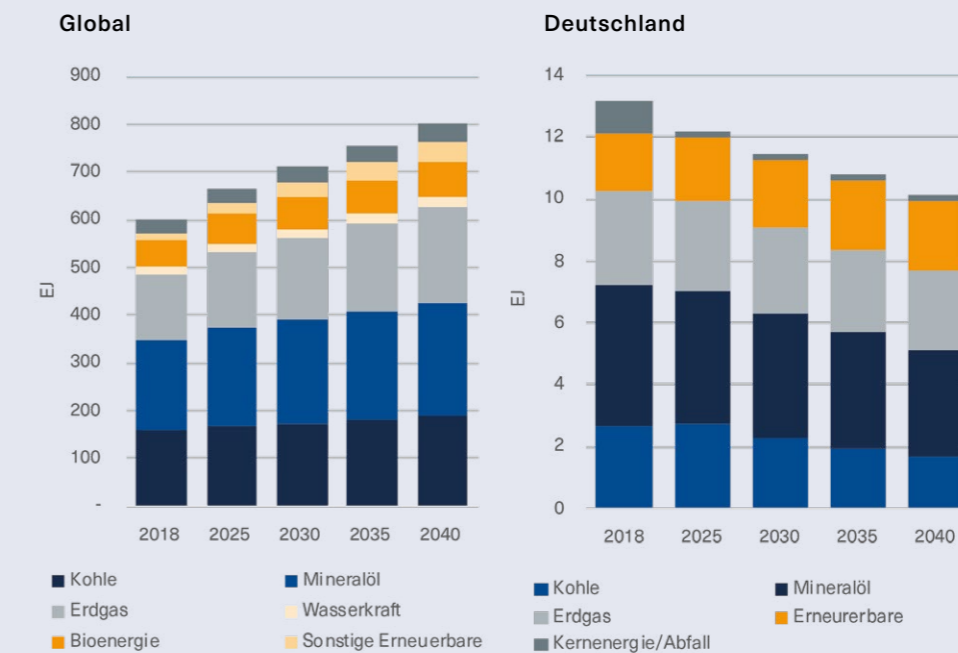
## Veränderungen im Energiesystem: Stromerzeugung

Entsprechend verändert sich die Struktur der weltweiten Stromerzeugung nur geringfügig. Erneuerbare Energien werden zwar überproportional zugebaut, jedoch von – bezogen auf den Anteil im gesamten Energiesystem – niedrigem Niveau aus. Insbesondere in China und Indien erfolgt ein starker Ausbau von Kohle- und Kernkraftwerken (Abbildung 29).

## Veränderung der Kosten für fossile Energieträger

Aufgrund der weltweiten steigenden Nachfrage nach fossilen Energieträgern kommt es im Vergleich zu heute zu einem deutlichen Anstieg der Großhandelspreise. Der Weltmarktpreis für Rohöl verdoppelt sich bis 2040 mit 134 Dollar pro Barrel gegenüber dem Wert von 2018. Auch die Preise für Erdgas in Europa steigen um rund ein Viertel an. Die Preise für Steinkohle verbleiben jedoch auf vergleichbarem Niveau wie 2018, eine Ausnahme bilden die USA, in denen die Steinkohlepreise gegenüber 2018 leicht absinken. Der Grund hierfür sind historisch gesehen sehr hohe Preise im Jahr 2018.

Abbildung 72  
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Business as Usual“ in EJ



Quelle: WEO 2019, Eigene Darstellung Prognos, 2020

## Veränderungen bei Investitionen

Bereits im „Business as Usual“-Szenario steigen die jährlichen weltweiten Realinvestitionen ins Energiesystem an. Der Grund hierfür liegt in der weltweit steigenden Energienachfrage. In der Periode 2031 bis 2040 liegen die Werte rund 40 Prozent höher als im Vergleichszeitraum 2014 bis 2018. Der Anstieg ist vor allem auf höhere Investitionen in Energieeffizienz (+224 Prozent) und erneuerbare Energien (+158 Prozent), aber auch fossile Energieträger und das Stromsystem (+131 Prozent) zurückzuführen. In Deutschland bleibt der Anteil der Investitionen ins Energiesystem sowie der Anteil des Energiesystems an Bruttowertschöpfung und Beschäftigung mit knapp fünf Prozent in etwa konstant.

## Veränderungen bei den Treibhausgas-Emissionen

Die weltweit steigende Energienachfrage führt bis 2040 zu einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund ein Viertel gegenüber dem Niveau von 2018. In den führenden Industrienationen kommt es zu einem Rückgang der Emissionen um rund elf Prozent, während sich die Emissionen in den Entwicklungs- und Schwellenländern mehr als verdoppeln. Die Emissionen in Deutschland verringern sich bis 2040 um 52 Prozent, bis 2050 um 61 Prozent (Abbildung 73, hier sind die Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren dargestellt). Dies führt insgesamt zu einer globalen Erwärmung um 4,1 Grad bis 4,8 Grad C bis 2100 gegenüber vorindustriellen Werten.

## Szenario 1

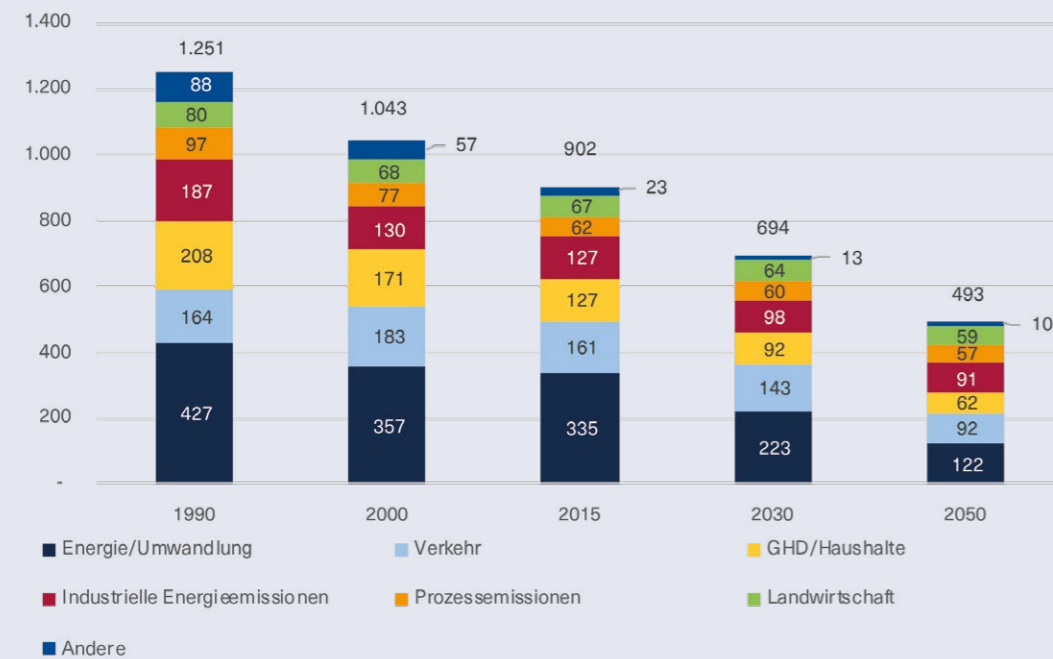
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Abbildung 73  
**Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Szenario „Business as Usual“**



Quelle: BDI, 2018, Eigene Darstellung Prognos, 2020

### Technologische Veränderungen

Auch wenn in diesem Referenzszenario für Deutschland das Klimaschutzpaket von Ende 2019 noch nicht mit abgebildet wurde, so wurde doch ein Teil der Entwicklung im Sinne einer absehbaren Ergänzung der Maßnahmen integriert. Daher wurde auch davon ausgegangen, dass sich die bereits angestoßenen technologischen Entwicklungen zu emissionsärmeren Technologien in gewissem Masse durchsetzen (insofern ist dieses Szenario mittlerweile ein wenig überholt). Die technologischen Entwicklungen erfolgen stetig, alle Effizienz- und erneuerbaren Technologien werden an den Märkten weiterentwickelt, insbesondere unter Aspekten der Kosteneffizienz, und setzen sich weiter im Energiesystem durch.

Ein Kohleausstieg wurde für die Referenzentwicklung noch nicht unterstellt, daher sind in 2040 und 2050 noch einige Braunkohlekraftwerke und wenige Mittellast-Steinkohlekraftwerke im Umwandlungssektor vorhanden und

tragen dort noch deutlich zur Emissionsbilanz bei. Der Zubau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung wächst weiterhin, wenn auch langsam, sodass im Jahr 2090 ca. 76 Prozent der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen stammt. Installiert sind dann 90 Gigawatt Wind onshore, 35 Gigawatt Wind offshore und 95 Gigawatt Photovoltaik.

Im Industriesektor werden weiterhin „low-hanging fruits“ der Effizienzentwicklungen umgesetzt, insbesondere energieeffiziente Querschnittstechnologien wie Motoren, Pumpen, Druckluft, Abwärmenutzung, energieeffiziente Beleuchtung und effiziente Prozesssteuerungen. Die stark energie- und emissionsintensiven Prozesse der Stahlproduktion und der Grundstoffchemie werden jedoch nicht strukturell umgestellt, auch die Brennstoffstruktur ändert sich nicht stark. Gas bleibt der dominante Brennstoff zur Produktion von Prozesswärme.

Im Verkehrssektor wächst die Elektromobilität langsam ins System hinein, vor allem bei Pkw (insbesondere für Pendelstrecken und Stadtverkehr) und leichten Nutzfahrzeugen. Insgesamt sind im Jahr 2050 14 Mio. Elektrofahrzeuge zugelassen. Ladeinfrastruktur wird parallel ausgebaut, vor allem in den Städten und städtischen „Speckgürteln“ sowie entlang der Autobahnen. Verbrenner werden weiterhin effizienter, Kleinwagen nehmen vor allem im städtischen Verkehr zu. Insgesamt werden jedoch wie bisher die entstehenden Effizienzvorteile von im Durchschnitt größeren und schwereren Fahrzeugen sowie wachsenden spezifischen Verkehrsleistungen fast vollständig kompensiert. Im schweren Güterverkehr gibt es keine strukturellen Änderungen, jedoch wird gegen Ende des Betrachtungszeitraums ein geringer Teil der Fahrzeugflotte mit Brennstoffzellenantrieben ausgestattet sein. Die Verbrennungsmotoren werden zwar allmählich effizienter, jedoch werden die Effekte durch die weiterhin wachsenden Güterverkehrsleistungen überkompensiert.

In den Sektoren Private Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen tragen die Gebäudebeheizung und die Produktion von Brauchwarmwasser am stärksten zur Energienutzung und zur Produktion von Emissionen bei. Hier werden bei den Neubauten hohe energetische Standards erreicht, und die Wärmepumpe wird bei Neubauten bis 2050 das dominierende Heizungssystem. Im Gebäudebestand werden die energetischen Sanierungen in Menge und Tiefe etwa wie in den vergangenen Jahren fortgeführt. Hier wird davon ausgegangen, dass hocheffiziente Dämmstoffe sowie hocheffiziente Fenster, teilweise mit sensitiven und steuerbaren Beschichtungen, allmählich in den Bestand eingeführt werden. Im Zuge von Heizungsaustausch werden sowohl effizientere als auch emissionsärmere Heizungen (z. T. mit Unterstützung durch Solarthermie) eingebaut. Der Trend „weg vom Öl“ wird fortgesetzt, auch im Bestand werden, bei guter energetischer Qualität der Gebäudehülle als Voraussetzung, Biomasseheizungen und Wärmepumpen eingesetzt. Insgesamt sind im Jahr 2050 ca. vier Mio. Wärmepumpen installiert.

In den Industrieländern erfolgt mehr oder weniger eine etwa parallele Entwicklung, mit jeweils länderspezifischen Ausprägungen (z. B. nach wie vor mehr Kohlekraftwerke in Polen und Tschechien, mehr Kernkraft in Frankreich, anteilig mehr Wind offshore in Großbritannien, Frankreich und Spanien, mehr Photovoltaik in den südlichen Ländern, in Spanien auch einige solarthermische Kraftwerke). In den südlichen Ländern werden verstärkt effiziente Kühlanlagen in Gebäuden eingesetzt.

In den Entwicklungs- und Schwellenländern erfolgen diese Entwicklungen in abgeschwächter Form, sodass trotz allem die fossilen Brennstoffe noch dominieren. Es werden sowohl erneuerbare Energien für die Stromerzeugung gebaut, aber auch neue Kohlekraftwerke zur Bedarfsdeckung zugebaut. Vorhandene Industrieanlagen werden im Zuge von Modernisierungen ebenfalls effizienter, allerdings werden hier in großen Teilen auch rohstoffnähere und daher energieintensive Branchen und Prozesse aufgebaut (z. B. Textilfaserproduktion) und im Zuge der Wohlstandsentwicklung erfolgt auch erhebliche Bautätigkeit mit energieintensiven Baustoffen. Elektromobilität wird vor allem in den Megacities eingesetzt, der ländliche Verkehr wird in den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern nach wie vor von erdölbasierten Kraftstoffen dominiert sein.

## Szenario 1

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Entwicklungslinien bei Handel, Branchenstruktur, Beschäftigung und BIP

## Entwicklung international

Langfristige Entwicklungen des Wirtschaftssystems sind mit großen Unsicherheiten verbunden, wie die aktuelle Corona-Krise zeigt. Zugleich sind Projektionen der langfristigen Wirtschaftsentwicklung für Planungsprozesse notwendig. Es gibt ein solides Fundament für die Projektionen. Die Entwicklung der (arbeitsfähigen) Bevölkerung und ihr Bildungs- und Wissensstand, das sogenannte Humankapital, sind eine zentrale Basis. Die Entwicklung in den nächsten 20 Jahren lässt sich gut abschätzen. Weltweit wird erwartet, dass ein immer größerer Teil der Bevölkerung in Städten leben wird, was als Urbanisierung bekannt ist. Dafür werden Infrastrukturen aufgebaut, wie Straßen und Gebäude mit Ver- und Entsorgungssystemen. Der Neubau von Gebäuden machte in Deutschland im Jahr 2019 bei Vollauslastung der Bauindustrie gerade einmal 0,75 Prozent des Bestands aus. Auch in der Industrie wird der Kapitalstock oft langfristig genutzt: Raffinerien, Stahlwerke, Chemiewerke oder Zementöfen werden über viele Jahrzehnte betrieben. Ähnliches gilt für Fahr- und Flugzeuge oder Schiffe. Der technologische Fortschritt solcher reifer Technologien lässt sich entlang globaler Lernkurven recht gut vorhersagen. Andere Wirtschaftsbereiche wandeln sich schneller.

Es gibt auch disruptive Technologien gerade im Bereich der Digitalisierung, die in der Corona-Krise im Zeitraffer zu beobachten sind, die die Vorhersagen erschweren.

Letztlich bestimmen insbesondere Annahmen über die Zunahme der Produktionsfaktoren (Arbeit als Funktion der arbeitsfähigen Bevölkerung und Kapital) und zur totalen Faktorproduktivität die zukünftige Entwicklung in sehr einfachen Wachstumsmodellen. Die totale Faktorproduktivität erfasst den technischen Fortschritt und die Verknüpfung der Produktionsfaktoren. In Ländern mit geringem Wachstum oder zukünftig sogar erwarteter Schrumpfung der Zahl der Erwerbstätigen wie in Deutschland fallen die langfristigen Wachstumserwartungen geringer aus als in Ländern mit höheren Geburtenraten wie den USA. Für Schwellen- und Entwicklungsländer wird angenommen, dass sie einen Teil des Rückstands im Pro-Kopf-Einkommen zu den führenden Industrieländern aufholen werden. Dass das Arbeitsangebot vor allem über Migrationsströme in gewisser Weise wiederum eine Funktion des Wirtschaftswachstums ist, wird in den Modellen nicht abgebildet.

## Kasten 28

## Ökonomische Modelle

Ökonomische Modelle werden eingesetzt, um zukünftige Entwicklungen abzuschätzen und die Folgen von politischen Maßnahmen abzuschätzen. Entsprechende Impact Assessments erfolgen für die Europäische Kommission und die Bundesregierung.

Eine Gruppe von Modellen sind sogenannte „Integrated-Assessment Modelle“, die die globale Entwicklung langfristig erklären. Es handelt sich um globale Modelle mit einfachen ökonomischen Modulen mit geringer Sektor- und Länderauflösung. Für Abschätzungen in der mittleren Frist bis 2030 oder 2050 werden stärker disaggregierte Modelle eingesetzt, die einzelne Länder und verschiedene Sektoren der Volkswirtschaft getrennt abbilden. Das im Folgenden genutzte Modell GINFORS-E ist ein entsprechendes Modell der Weltwirtschaft, das Produktion, Welthandel, Energieeinsatz und Emissionen konsistent miteinander verknüpft.<sup>287</sup> Bilaterale Handelsanteile (welchen Wertanteil haben z.B. deutsche Autos an den US-Autoimporten) sind nach 33

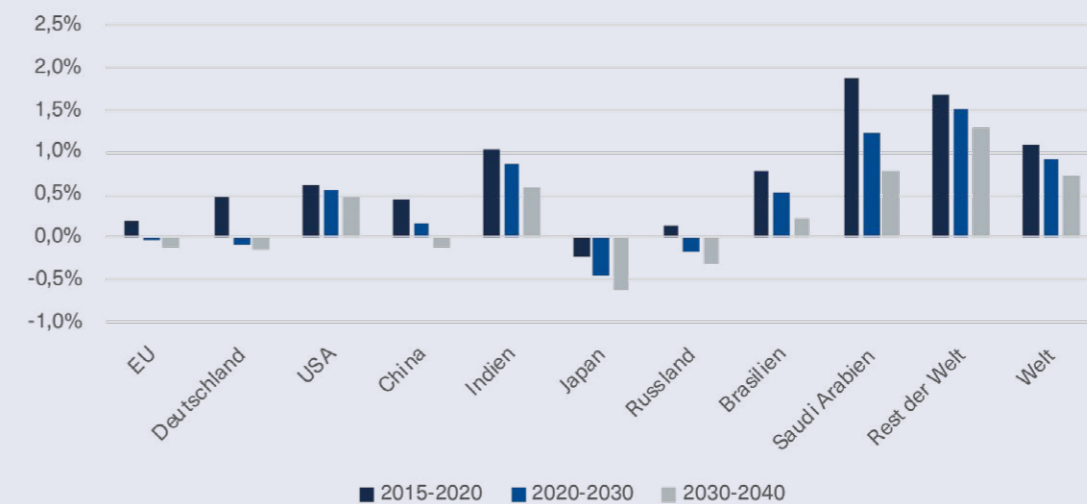
Gütergruppen und 154 Ländern ökonometrisch geschätzt, wobei relative Preise und Zeittrends erklärende Größen sind. Veränderungen der Kostensituation auf Ebene von 36 Wirtschaftsbereichen übertragen sich auf den Welthandel, verändern sektorale Produktion und Wertschöpfung sowie das BIP. CO<sub>2</sub>-Preise werden explizit abgebildet. Die Daten basieren auf internationalen Datensätzen der OECD und der Internationalen Energieagentur für 64 Länder und eine Region Rest der Welt. Dadurch sind alle EU-Staaten und die wichtigen Handelspartner direkt erfasst.

Mit dem Modell GINFORS-E werden im Folgenden die vier Szenarien quantifiziert. Dazu wird auf Annahmen zur Entwicklung der Weltbevölkerung und des BIP wichtiger Länder und Regionen der Internationalen Energieagentur (IEA, 2019) zurückgegriffen, die als Basis für deren jährliche langfristige Projektionen des internationalen Energiesystems dienen.

Abbildung 74 zeigt, dass die Bevölkerungszahlen in der EU ebenso wie in Japan und Russland zukünftig stagnieren oder sogar rückläufig sein werden. In China sind ebenfalls nur noch geringe Steigerung der Bevölkerungszahlen zu erwarten, die arbeitsfähige Bevölkerung ist bereits rückläufig. Auch in anderen Schwellenländern wie Indien und Brasilien zeigt sich eine Abnahme des Bevölkerungswachstums. Dagegen wird die Weltbevölkerung in anderen Teilen der Welt, gerade in Afrika, aber auch in Teilen Asiens und Lateinamerikas weiter dynamisch wachsen. Die Weltbevölkerung wird nach der zugrundeliegenden „mittleren Variante“ der UN (2019) die 9 Mrd. Grenze bis 2040 überschreiten.

Abbildung 74

## Bevölkerungsentwicklung im internationalen Vergleich im Szenario „Business as Usual“ – durchschnittliche jährliche Wachstumsraten



Quelle: GWS, 2020

Die Bevölkerungsentwicklung ist bei der Betrachtung des Wirtschaftswachstums zu berücksichtigen. Pro Kopf fallen die ausgewiesenen Wachstumsraten (Abbildung 75) in den Industrieländern ähnlich aus. Höheres Wachstum zeigt sich vor allem für China und Indien. Beide Länder holen gegenüber den Industrieländern immer weiter auf. Aber auch in Afrika und Südostasien fällt das Wachstum überdurchschnittlich aus.

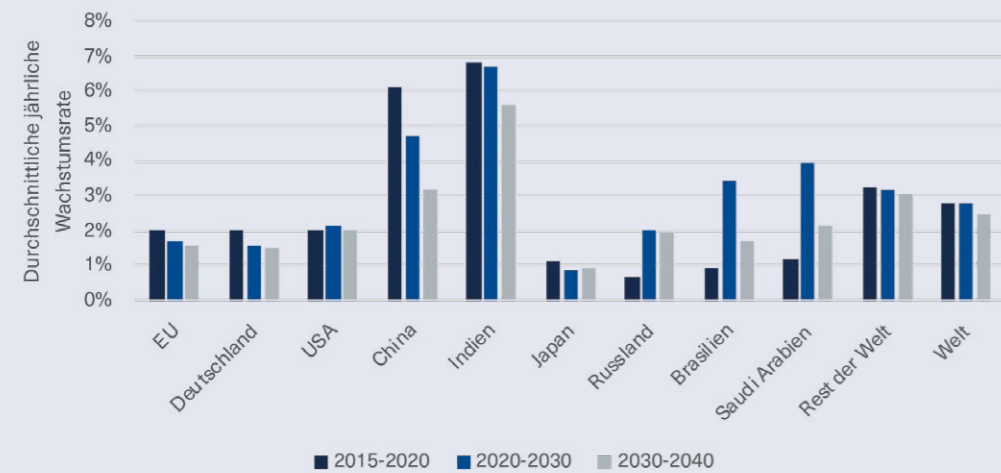
Negative Wirkungen der Pandemie sind nicht in den Modellierungen berücksichtigt worden. Entsprechend dürften die Werte für den Zeitraum 2015 bis 2020 tatsächlich niedriger ausfallen. Wenn innerhalb des kommenden Jahres ein Impfstoff oder ein Medikament entwickelt wird, der bzw. das COVID-19 wirksam bekämpft, könnte der ursprünglich angenommene Wachstumspfad bis 2030 wieder erreicht werden. Die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten für den Zeitraum 2020 bis 2030 würden dann höher ausfallen.



Szenario 1

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 75  
Wirtschaftswachstum im internationalen Vergleich – „BaU“ – durchschnittliche jährliche Wachstumsraten



Quelle: GWS, 2020

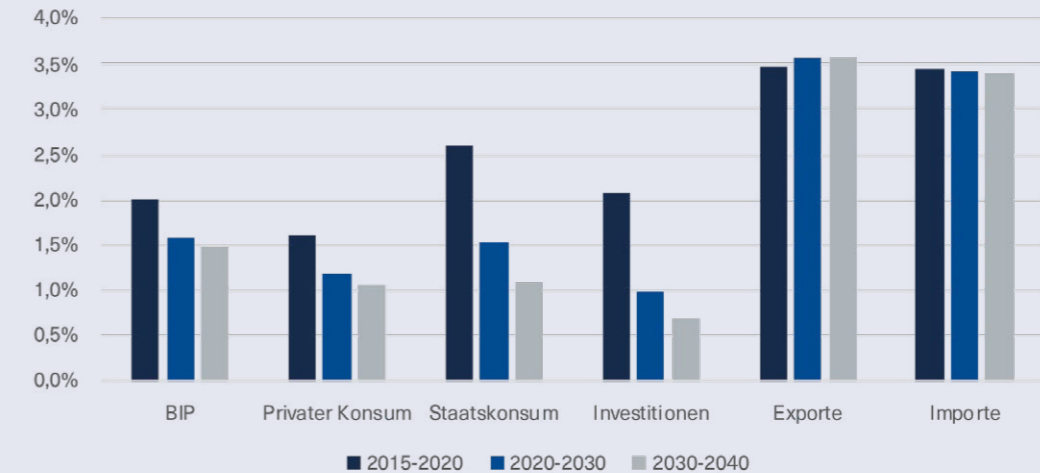
Über die weitere Entwicklung des internationalen Handels und strukturelle Veränderungen der Weltwirtschaft finden sich in den internationalen Projektionen nur wenige Informationen. Im ökonomischen Modell werden im Wesentlichen Trends der Vergangenheit fortgeschrieben. Außerdem spielen Änderungen relativer Preise eine Rolle. Steigen Produktionskosten in einem Land in einer Industrie schneller als in anderen Ländern, verlagert sich ein Teil der Produktion zu den günstigeren Produktionsstandorten.

Das starke Wirtschaftswachstum und damit einhergehende Lohnsteigerungen in Ländern wie China und Indien begrenzen den zukünftigen Ausbau der internationalen Arbeitsteilung. Handelskonflikte und mögliche Bemühungen aufgrund der COVID-19-Erfahrungen, Vorleistungsproduktion teilweise entweder wieder in die Industrieländer zurückzuholen oder Lieferanten noch stärker zu differenzieren, dürften ebenfalls dazu beitragen, dass der internationale Handel nicht wesentlich schneller wachsen dürfte als die globale Wirtschaftsleistung.

**Entwicklung in Deutschland**

Für Deutschland bedeutet die Fortschreibung bisheriger Trends im globalen Kontext, dass der Außenhandel weiter schneller wächst als die Inlandsnachfrage. Privater und staatlicher Konsum sowie die Investitionen entwickeln sich etwas langsamer als das BIP (Abbildung 76).

Abbildung 76  
Entwicklung des BIP und seiner Komponenten in Deutschland – „BaU“ – durchschnittliche jährliche Wachstumsraten

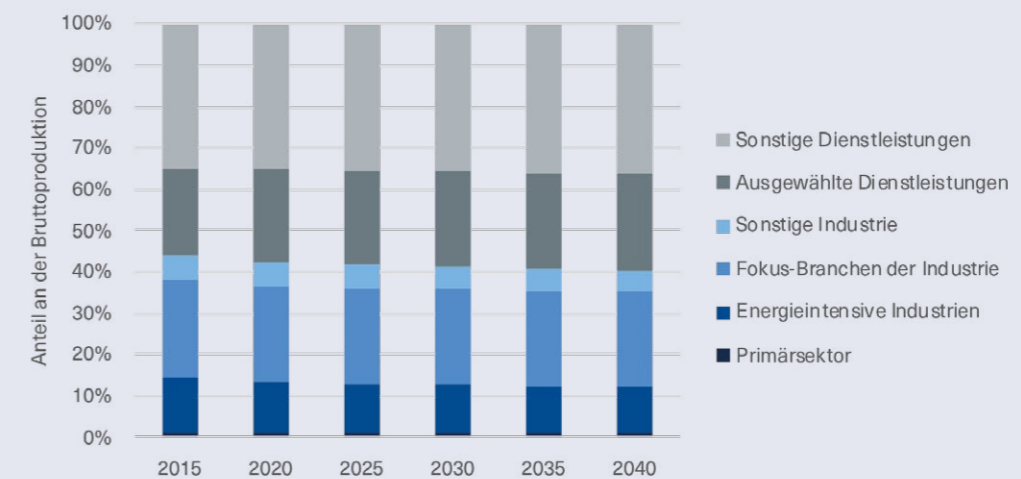


Quelle: GWS, 2020

Die Wirtschaftsstruktur (Abbildung 77) wird sich bis zum Jahr 2040 weiter leicht in Richtung der Dienstleistungen verschieben. Messen lässt sich die Wirtschaftsstruktur anhand der Bruttonachfrage, der Bruttowertschöpfung und der Beschäftigung in einer Branche. Gerade an dieser Stelle ist der Hinweis wichtig, dass es sich nicht um eine möglichst treffsichere Prognose der zukünftigen Wirtschafts-

struktur handelt. Sie ist vor allem konsistent im Modellzusammenhang. Der Erkenntnisgewinn liegt insbesondere im Vergleich der verschiedenen Szenarien. Bis zum Jahr 2040 nimmt der Anteil der Dienstleistungen an der Bruttonachfrage in Deutschland weiter leicht zu. Dagegen sinken die Anteile der Industrie und des primären Sektors etwas.

Abbildung 77  
Entwicklung der Wirtschaftsstruktur in Deutschland – „BaU“



Quelle: GWS, 2020

**Szenario 1**

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Um die Entwicklungslinien in der Wirtschaftsstruktur differenzierter darzustellen, wurden drei Branchencluster gebildet: „Energieintensive Industrien“, „Fokus-Branchen der Industrie“ und „Ausgewählte Dienstleistungen“. Mithilfe dieser feineren Unterscheidung können die unterschiedlichen Auswirkungen der einzelnen Szenarien auf die jeweiligen Cluster genauer analysiert und dargestellt werden (Tabelle 8):

Tabelle 8  
**Zusammensetzung der Branchencluster (mit Kurzbezeichnung)**

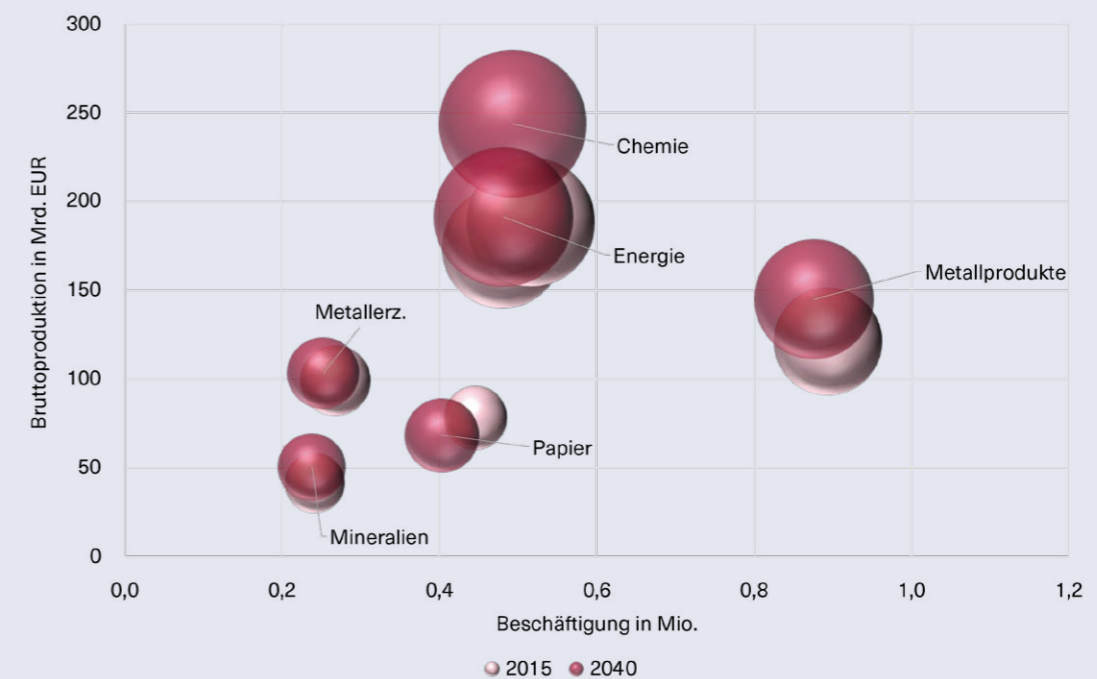
<b>Branchencluster „Energieintensive Industrien“</b>		
Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus		Papier
Herstellung von chemischen und pharmazeutischen Erzeugnissen		Chemie
Herstellung von Glas; Glaswaren; Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden		Mineralien
Metallerzeugung und -bearbeitung		Metallerzeugnisse
Herstellung von Metallerzeugnissen		Metallprodukte
Energieversorgung (Strom, Gas, Wärme)		Energie
<b>Branchencluster „Fokus-Branchen der Industrie“</b>		
Herstellung von Nahrungsmitteln und Getränken		Nahrungsmittel
Herstellung von DV-Geräten, elektronischen und optischen Geräten (inkl. Medizintechnik)		Medizinische Technik
Herstellung von elektrischen Ausrüstungen		Elektro
Maschinenbau		Maschinenbau
Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen		Automotive
Hochbau, Tiefbau, Bauinstallation		Bau
<b>Branchencluster „Ausgewählte Dienstleistungen“</b>		
Transport und Logistik		Transport
Beherbergung und Gastronomie		Gastgewerbe
Informationstechnologie u. a. Informations-DL		IT
Finanzen / Versicherungen		Finanz-DL
Gesundheits- und Sozialwesen		Gesundheit
Kunst, Unterhaltung, Freizeit und Erholung (inkl. Tourismus)		Tourismus

Quelle: GWS und TwinEconomics, 2020

Ein Blick auf den Zusammenhang von Bruttoproduktion und Beschäftigung verdeutlicht, dass die rot markierten Branchen energieintensiver Industrien eher geringe Beschäftigungsintensitäten aufweisen (Abbildung 78). Sie produzieren vielfach sehr kapitalintensiv. In einigen der Branchen wie bei der Stahl- oder Zementherstellung wird meist rund um die Uhr fast ganzjährig gearbeitet. Bis zum Jahr 2040 ist die Beschäftigung eher leicht rückläufig.

Dagegen ist die Energieintensität in den blau markierten Fokusbranchen deutlich geringer (Abbildung 79). Sie bieten u. a. die Klimaschutztechnologien an, die für den Rückgang der Treibhausgas-Emissionen notwendig sind. Zugleich stehen sie teilweise aber auch vor einem intrasektoralen Strukturwandel wie in der Automobilindustrie hin zur Elektromobilität und anderen Kraftstoffen, der im „BaU“ nicht unterstellt ist. Allein das Baugewerbe kommt auf eine Beschäftigung von fast 2,5 Mio., in den anderen Bereichen sind es gut eine Million im Maschinenbau oder darunter. Die Dienstleistungsbereiche sind beschäftigungsintensiv, was im Vergleich der drei Bereiche sichtbar wird (Abbildung 80). Gerade der Gesundheitsbereich, aber auch Transport- und Gastgewerbe weisen eine hohe Beschäftigung auf. Die Produktion wächst in den betrachteten Dienstleistungsbranchen teils sehr deutlich.

Abbildung 78  
**Energieintensive Industrien – Bruttoproduktion und Beschäftigung – „BaU“ (Kugelgröße entspricht Wertschöpfung in 2040)**



Quelle: GWS, 2020

## Szenario 1

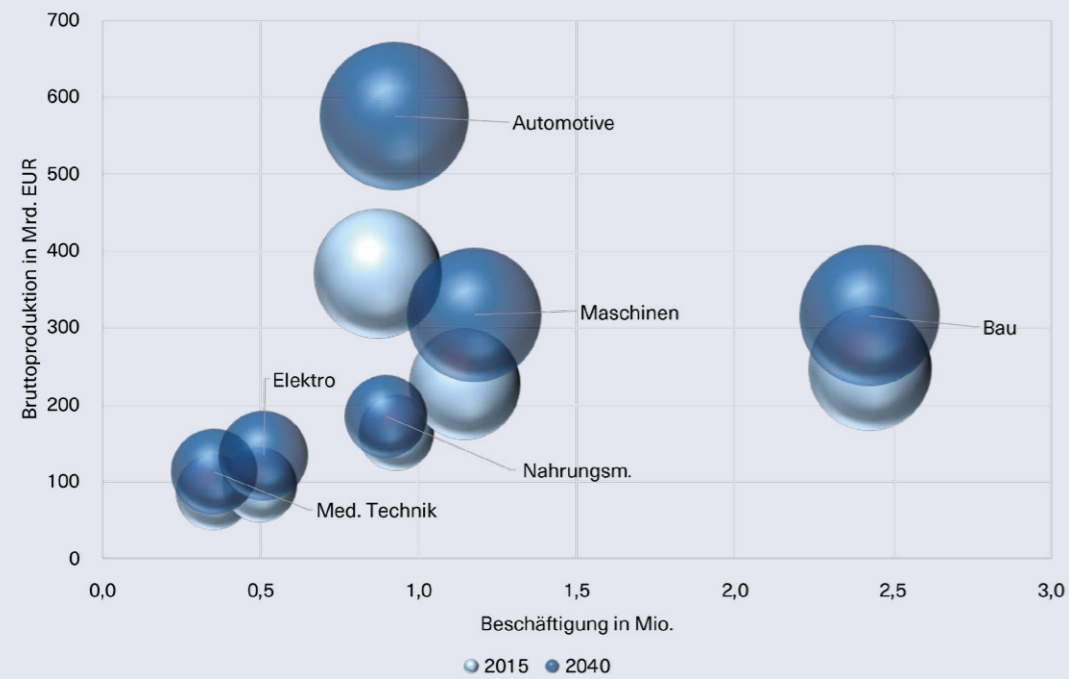
Energiesystem

Technologien

Effekte

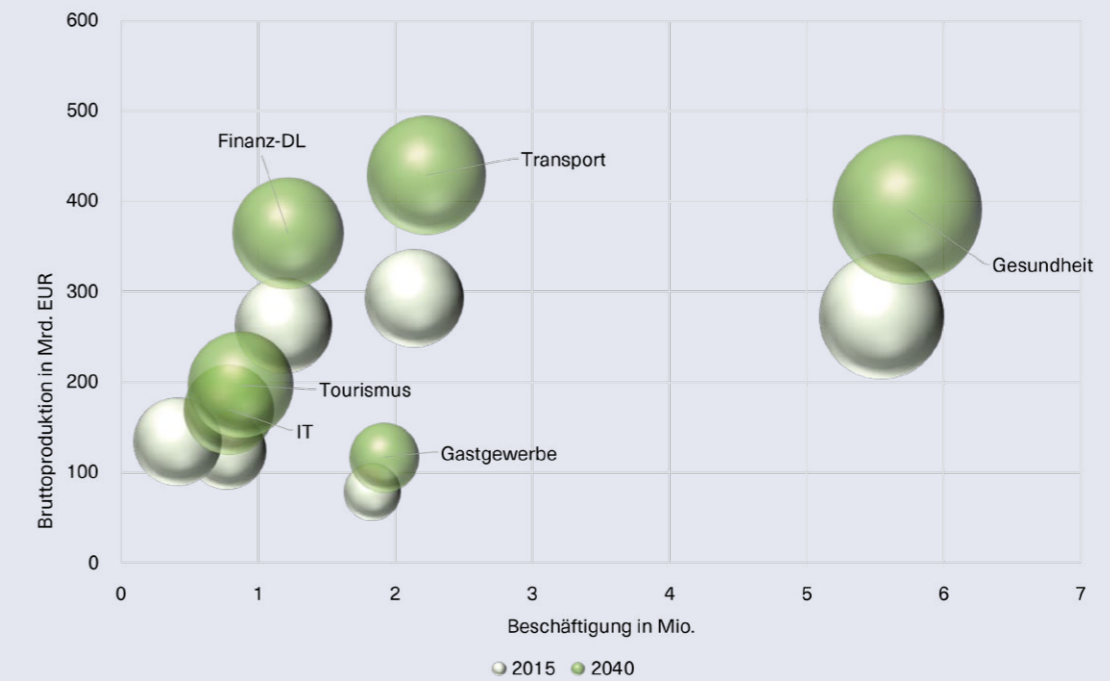
Auswirkungen

Abbildung 79  
Fokusbranchen der Industrie – Bruttoproduktion und Beschäftigung – „BaU“  
(Kugelgröße entspricht Wertschöpfung in 2040)



Quelle: GWS, 2020

Abbildung 80  
Ausgewählte Dienstleistungsbranchen – Bruttoproduktion und Beschäftigung – „BaU“  
(Kugelgröße entspricht Wertschöpfung in 2040)



Quelle: GWS, 2020

Das „BaU-Szenario“ stellt mit Blick auf den Klimaschutz eine kontrafaktische Entwicklung dar, an der die stärkeren Klimaschutzambitionen in den anderen Szenarien gespiegelt werden. Eine Umsetzung des Klimapakets der Bundesregierung oder des Green Deal der Europäischen Kommission wird im „BaU-Szenario“ nicht angenommen. Für die Automobilindustrie bedeutet das z. B., dass keine Umstellung in der Produktion auf Elektromobilität erfolgt, sondern weiterhin Verbrennungsmotoren dominieren.

Das „BaU-Szenario“ nimmt die globale Erwärmung auf mehr als 4 Grad C in Kauf. Oberhalb dieser Schwelle sind die Auswirkungen des Klimawandels global, aber auch für Europa deutlich. Für Europa beziffert die PESETA-III-Studie (s. u.) die Verluste auf fast zwei Prozent des BIP. Südeuropa ist dabei deutlich stärker betroffen als Nordeuropa. Die wichtigsten Handlungsfelder betreffen Hochwasser, sowohl an der Küste als auch an Flüssen, und die menschliche Gesundheit, die einer Vielzahl von Risiken ausgesetzt ist, sei es durch Hitzewellen im urbanen Raum, sei es durch temperaturbedingt übertragene Krankheiten. Verluste der Arbeitsproduktivität senken die Gewinne in allen ökonomischen Sektoren, wobei Arbeiten, die im Freien stattfinden müssen, deutlich stärker betroffen sein werden, etwa in der Bauindustrie. Für Deutschland wirken sich die extremwetterbezogenen Ereignisse mit weniger als einem Prozent auf das BIP aus.

Szenario 1

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Entwicklungslinien der ökonomischen Effekte in der Wertschöpfungskette in Deutschland und in Bayern

Deutschland

Um die Tragweite der wirtschaftlichen Auswirkungen des „BaU-Szenarios“ in den einzelnen Branchen bzw. Branchenclustern umfassend darzustellen, muss auch dessen Auswirkung im Wertschöpfungsnetzwerk der einzelnen Branchen analysiert werden. Im vorangegangenen Kapitel wurden bereits die unmittelbaren ökonomischen Effekte (sogenannte „direkte Effekte“) des „BaU-Szenarios“ in ausgewählten Branchen bzw. Branchenclustern in Deutschland dargestellt. Die ökonomischen Effekte reichen aber deutlich weiter. Denn die direkten Effekte des „BaU-Szenarios“ in einzelnen Branchen wirken sich über deren Vorleistungsbeziehungen auch auf vorgelagerte Branchen in den Wertschöpfungsketten aus. Diesen Effekt bezeichnet man als indirekten Effekt. Die indirekten Effekte umfassen also diejenigen Effekte, die die jeweilige Branche durch ihre Vorleistungskäufe in anderen Branchen generiert. Direkte und indirekte Effekte zusammen bilden den gesamten ökonomischen Effekt des „BaU-Szenarios“ in den einzelnen Branchen bzw. Branchenclustern ab. Im Folgenden werden die direkten und indirekten Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte für ausgewählte Branchen bzw. Branchencluster in Deutschland analysiert. In beiden Fällen beziehen sich die indirekten Effekte auf das Inland, d. h. auf die Vorleistungsbranchen in Deutschland.

Im „BaU-Szenario“ steigt in allen Branchen die direkte und indirekte Bruttowertschöpfung zwischen 2015 und 2040 an. Den größten absoluten Anstieg innerhalb der Branchencluster „Energieintensive Industrien“ und „Fokus-Branchen“ verzeichnen zwischen 2015 und 2040 die Branchen Automotive (+307 Mrd. USD), Maschinenbau (+253 Mrd. USD) und Bau (+238 Mrd. USD); den größten Anstieg der direkten Bruttowertschöpfung weist der Maschinenbau auf (+163 Mrd. USD), den größten Anstieg bei der indirekten Bruttowertschöpfung der Sektor Automotive (+148 Mrd. USD). Gerade Maschinenbau und Automotive als exportabhängige und auf der Produktionsseite sehr stark mit Vorleistungsbranchen verknüpfte Branchen profitieren stark von der im „BaU-Szenario“ unterstellten Fortschreibung des globalen Wachstumstrends. Bei den Dienstleistungen ereignet sich der größte absolute Anstieg insgesamt im Bereich Gesundheit (+343 Mrd. USD). In der nachfolgenden Abbildung 80 wird die Entwicklung kondensiert für die drei erwähnten Branchencluster „Energieintensive Industrien“, „Fokus-Industrien“ und „Ausgewählte Dienstleistungen“ dargestellt; die absolute Entwicklung der Bruttowertschöpfung im „BaU-Szenario“ gibt auch Tabelle 9 wieder.

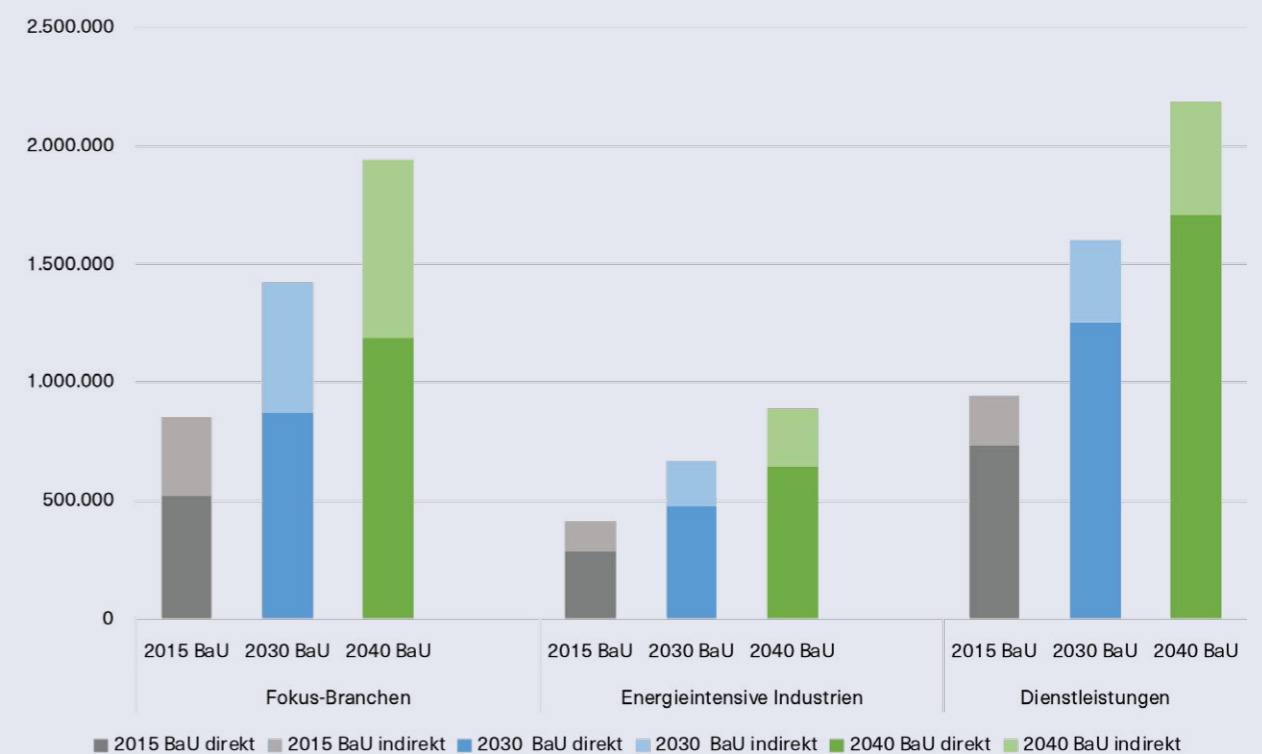
Tabelle 9  
Zeitliche Entwicklung der BWS im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in Mio. USD

		Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Ausgewählte Dienstleistungen
2015	direkt	284.026	521.780	733.860
	indirekt	125.673	330.053	210.185
	<b>gesamt</b>	<b>409.698</b>	<b>851.833</b>	<b>944.045</b>
2030	direkt	480.186	873.578	1.252.153
	indirekt	187.135	546.109	349.326
	<b>gesamt</b>	<b>667.322</b>	<b>1.419.686</b>	<b>1.601.479</b>
2040	direkt	643.484	1.187.105	1.706.910
	indirekt	247.774	754.649	477.254
	<b>gesamt</b>	<b>891.258</b>	<b>1.941.753</b>	<b>2.184.164</b>

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Bei der Wachstumsdynamik spielen nicht nur das direkte Branchenwachstum, sondern auch die durch die Wirtschaftsaktivität in den Lieferketten initiierten indirekten Effekte eine bedeutsame Rolle. Große Hebel bei der indirekten Wertschöpfung verzeichnen im Jahr 2040 der Sektor „Herstellung von Nahrungsmitteln und Getränken“ sowie der Automotive-Sektor: Jeder Euro direkte Wertschöpfung in diesen Branchen generiert weitere 0,98 Euro (Nahrungsmittel) bzw. 0,79 Euro (Automotive) zusätzliche Wertschöpfung in den Zulieferbetrieben. Aber auch der Maschinenbau und die Bauwirtschaft weisen mit jeweils 0,58 Euro hohe Anstoßeffekte in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen auf. Auch hier wird – wie schon im Jahr 2030 – die im „BaU-Szenario“ unterstellte Fortschreibung des globalen Wachstumstrends sowie die kontrafaktische Entwicklung in Bezug auf den Klimaschutz reflektiert: Die Entwicklung der Produktion in den Branchen ist keinen gravierenden Veränderungen unterworfen, was auch für die jeweiligen Wertschöpfungsketten gilt.

Abbildung 81  
Zeitliche Entwicklung der BWS im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in Mio. USD



Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

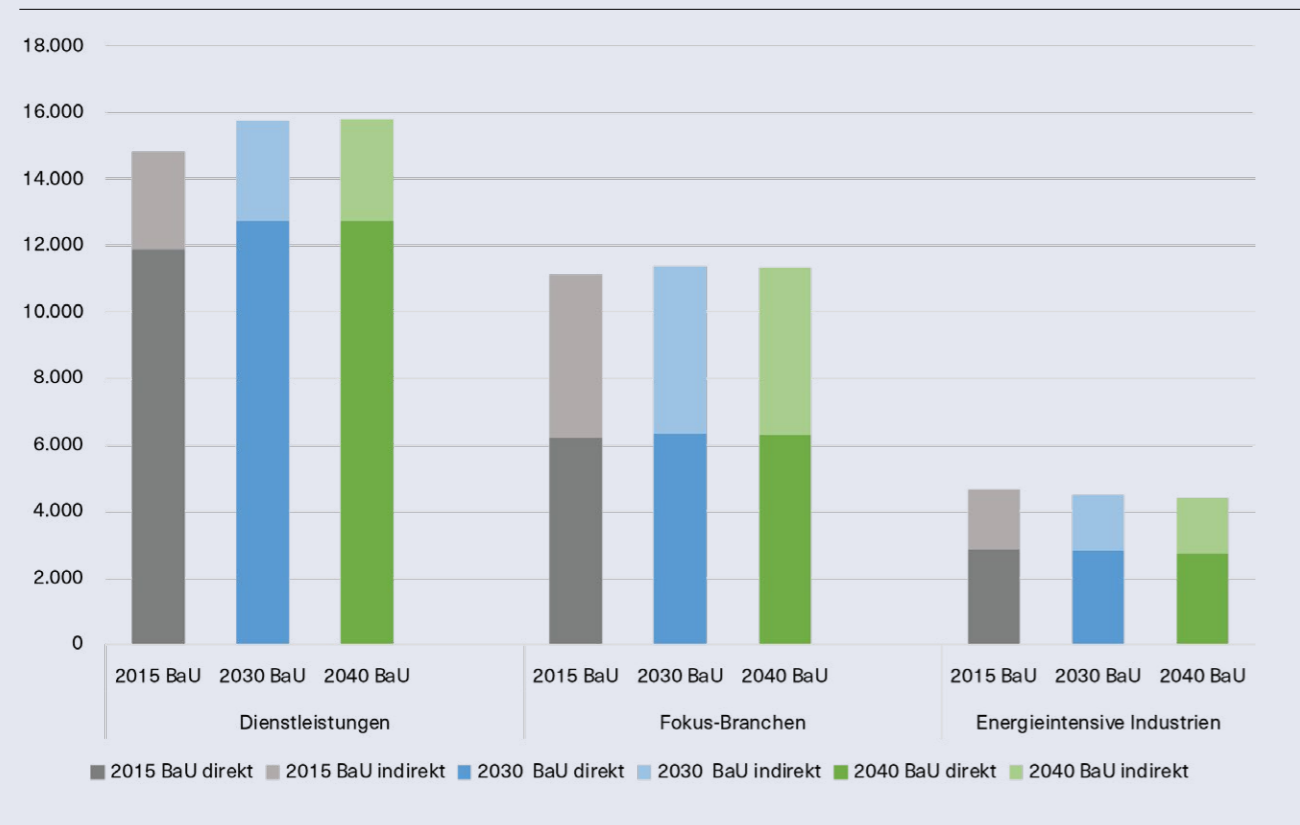
Bei der Beschäftigungsentwicklung im „BaU-Szenario“ zeigt sich ein gemischtes Bild: Während die Bereiche Automotive, Chemie und Maschinenbau insgesamt bis 2040 Beschäftigung aufbauen (vor allem auch in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen), wird in den Branchen Energieerzeugung und Metallerzeugung sowie in der Papierindustrie Beschäftigung abgebaut. Dies liegt daran, dass die energieintensiven Industrien sehr kapitalintensiv produzieren und dort bis

zum Jahr 2040 im „BaU-Szenario“ mit einer leicht rückläufigen Beschäftigung zu rechnen ist. Die ohnehin beschäftigungsintensiven Dienstleistungsbranchen bauen bis 2040 vor allem weiter direkte Beschäftigung auf, insbesondere im Bereich Tourismus und Gesundheit. In der nachfolgenden Abbildung 82 wird die Entwicklung für die drei Branchencluster gebündelt dargestellt.

Szenario 1

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 82  
**Zeitliche Entwicklung der Beschäftigung im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in 1.000 Beschäftigten**



Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

**Bayern**

Knapp jeder fünfte Euro, der in Deutschland produziert und erwirtschaftet wird, stammt – gemessen an den aktuellsten verfügbaren Zahlen aus 2019 – aus Bayern.<sup>288</sup> Nach Nordrhein-Westfalen ist Bayern somit das wirtschaftlich zweitgrößte Bundesland, in welchem mehr als 18 Prozent des in Deutschland produzierten Outputs und der Wertschöpfung generiert werden. Etwas geringer liegt der Beschäftigungsanteil mit rund 17,3 Prozent, was im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass der Anteil der beschäftigungsintensiveren Dienstleistungssektoren in Bayern mit 54,1 Prozent etwas unter dem deutschlandweiten Schnitt von 57,3 Prozent liegt.

<sup>288</sup> Arbeitskreis "Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder" im Auftrag der Statistischen Ämter der 16 Bundesländer, des Statistischen Bundesamtes und des Bürgeramtes, Statistik und Wahlen, Frankfurt a. M.

Tabelle 10  
**Wirtschaftliche Kennzahlen, Bayern und Deutschland, 2015<sup>289</sup>**

	Bruttoproduktionswert (Mio. USD)	Bruttowertschöpfung (Mio. USD)	Beschäftigte (in 1.000)
Bayern	1.122.503	558.696	7.164
Deutschland	6.097.462	3.039.094	41.513
Anteil Bayerns an Deutschland	18,41 %	18,38 %	17,26 %

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics

Um die Unterschiede in der wirtschaftlichen Entwicklung Bayerns gegenüber Gesamtdeutschland zu verstehen, bedarf es zunächst eines detaillierteren Blicks auf die strukturelle Zusammensetzung der Wirtschaft und vor allem die Ausgangssituation im Jahr 2015.

Wie Tabelle 11 zeigt, liegt Bayern mit den Fokus-Branchen im Jahr 2015 deutlich über dem Durchschnitt, bei ausgewählten Dienstleistungen und energieintensiven Industrien hingegen unter dem deutschlandweiten Mittel. Bis 2040 ist zu erwarten, dass sich diese Anteile im „BaU-Szenario“ verändern werden, unmerklich bei den ausgewählten Dienstleistungen, hingegen deutlich bei den energieintensiven Industrien, wo die Schere noch weiter aufgeht, und den Fokus-Branchen, wo sich die Anteile Bayerns und Deutschland angleichen.

Tabelle 11  
**Entwicklung der Anteile der Branchencluster an der Gesamtwirtschaft, Bayern und Deutschland**

	Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Ausgewählte Dienstleistungen
2015	6,8 %	23,0 %	24,2 %
	9,3 %	17,2 %	26,3 %
2030	6,8 %	23,0 %	24,3 %
	9,3 %	17,2 %	26,3 %
2040	6,7 %	22,8 %	24,6 %
	11,6 %	23,4 %	25,4 %

Quelle: TwinEconomics.

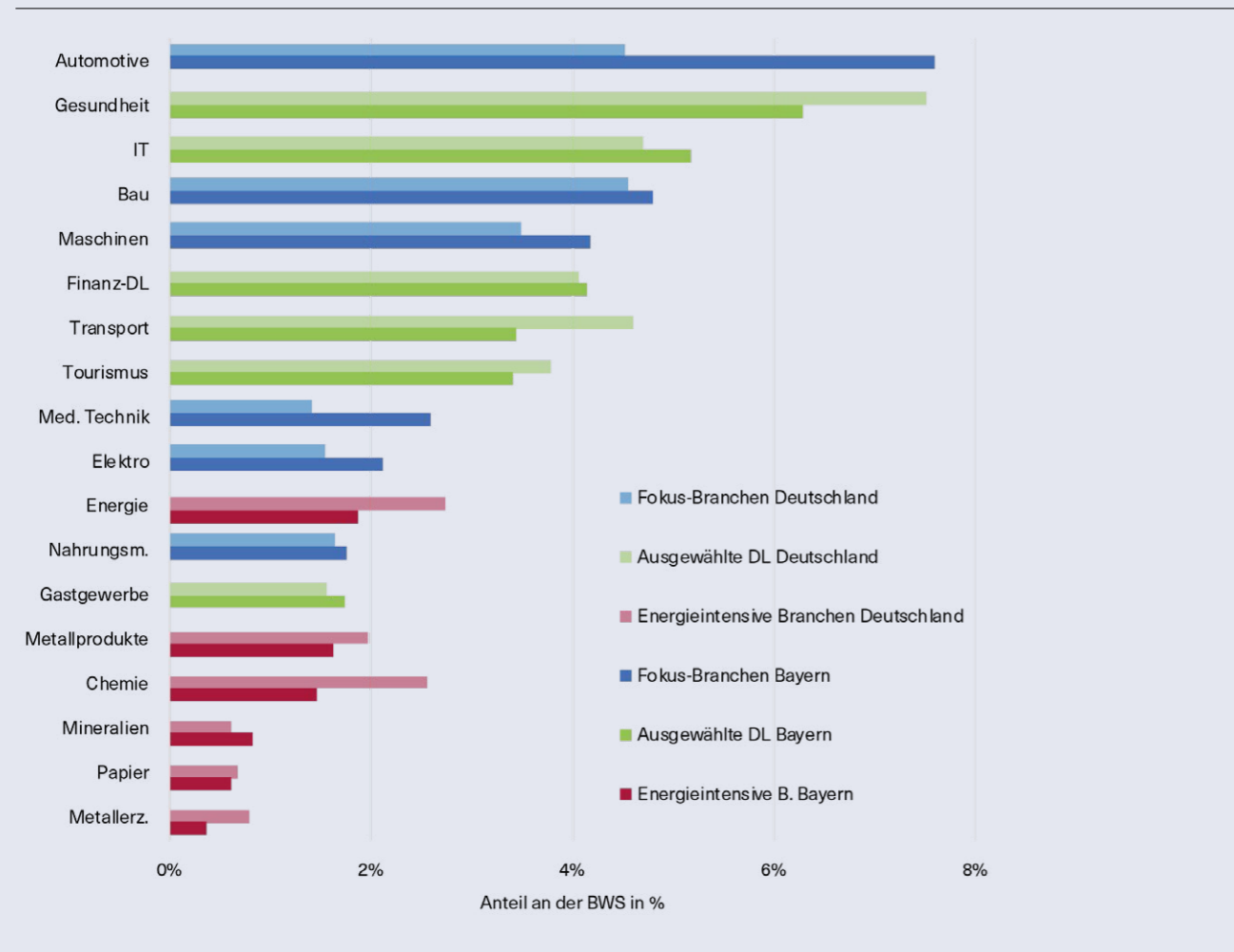
<sup>289</sup> Der Ausweis der monetären Werte erfolgt, modellbedingt, nicht in Euro, sondern US-Dollar (USD), da die, den Berechnungen zugrunde gelegte, ICIO-Tabelle, welche die internationalen Verflechtungen auf Länder- und Sektorebene abbildet, ausschließlich in USD erstellt wird. Eine Umrechnung in Euro wäre in diesem international ausgelegten Modell nicht sinnvoll.

Szenario 1

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Dies bestätigt auch Abbildung 83, die zeigt, dass im Jahr 2015 die Wertschöpfungsanteile aller Fokus-Branchen deutlich über dem deutschlandweiten Durchschnitt liegen. Die besonderen Stärkefelder Bayerns sind demnach im Wesentlichen in den Fokus-Branchen konzentriert, wobei der Sektor Automotive mit einem Anteil von 7,6 Prozent in Bayern gegenüber 4,5 Prozent in Deutschland besonders auffällt. Hingegen anteilig unterdurchschnittlich stark vertreten sind im Jahr 2015 die energieintensiven Industrien, wobei die Sektoren Chemie<sup>290</sup> (mit einem Anteil von 1,5 Prozent an der Wirtschaft Bayerns) und Energie<sup>291</sup> (mit einem Anteil von 1,9 Prozent) die ausgeprägtesten Unterschiede zu Deutschland (mit einem Anteil von 2,6 Prozent für Chemie und 2,7 Prozent für Energie) aufweisen.

Abbildung 83  
**Wirtschaftsstruktur Bayerns und Deutschlands gemessen an der BWS, nach Branchenclustern; anteilig in Prozent an der Gesamtwirtschaft, 2015**

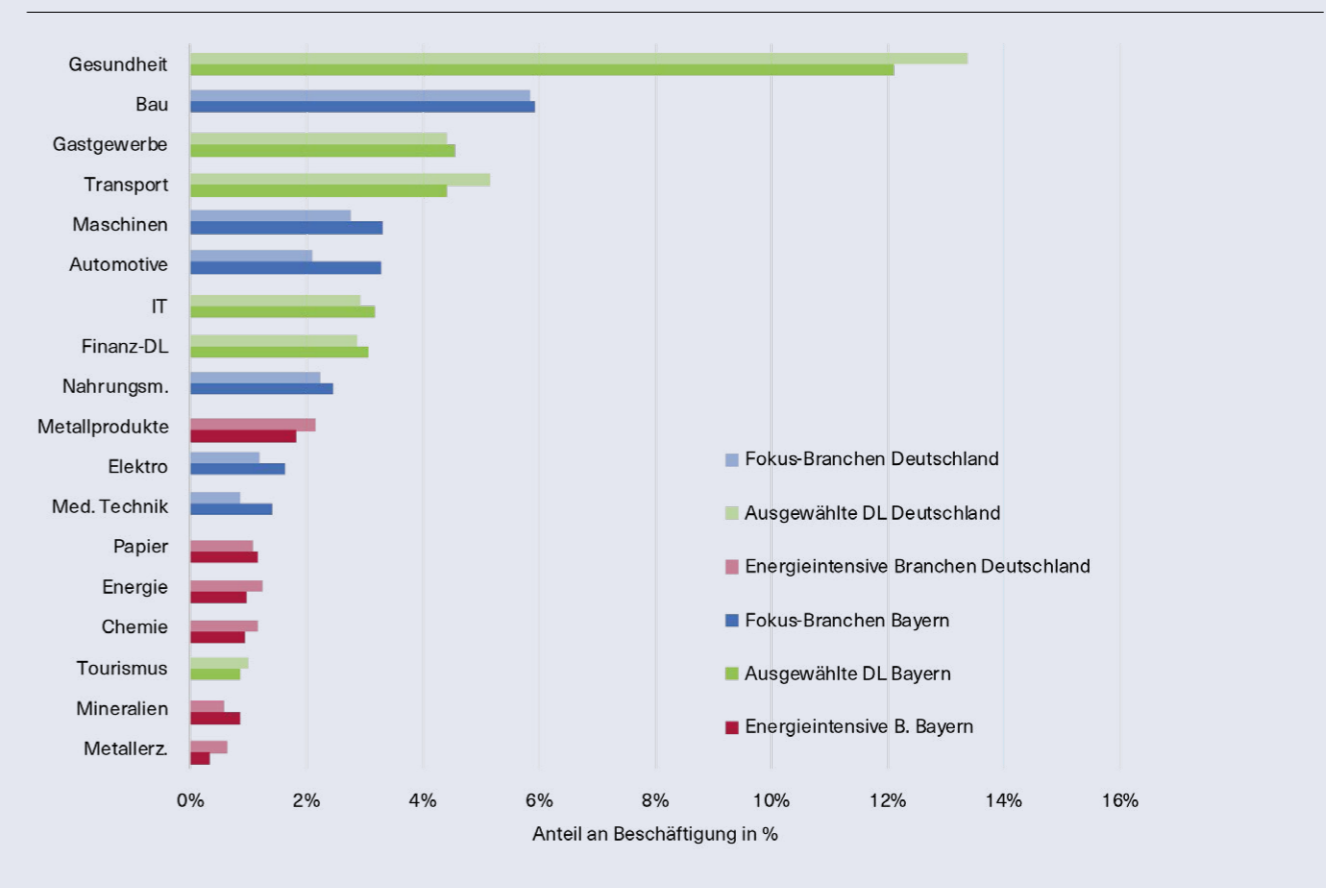


Quelle: TwinEconomics

<sup>290</sup> Dieser umfasst die Herstellung chemischer als auch pharmazeutischer Erzeugnisse.  
<sup>291</sup> Dieser umfasst die Energieversorgung, Wasserversorgung und Entsorgung.

Gemessen an der Beschäftigung im Jahr 2015 sind es, wie zu erwarten, vor allem die ausgewählten Dienstleistungen, auf welche die größten Beschäftigungsanteile entfallen. So sind alleine das Gesundheitswesen mit 12,1 Prozent, das Gastgewerbe mit 4,5 Prozent und das Transportwesen mit 4,4 Prozent bereits für mehr als jeden fünften Arbeitsplatz in Bayern verantwortlich. Mit der Bauwirtschaft (5,9 Prozent in Bayern vs. 5,8 Prozent in Deutschland), dem Maschinenbau (3,3 Prozent in Bayern vs. 2,8 Prozent in Deutschland) und Automotive (3,3 Prozent in Bayern vs. 2,1 Prozent in Deutschland) entfallen aber auch nennenswerte Beschäftigungsanteile Bayerns auf die Fokus-Branchen.

Abbildung 84  
**Wirtschaftsstruktur Bayerns und Deutschlands gemessen an der Beschäftigung, nach Branchenclustern; anteilig in Prozent an der Gesamtwirtschaft, 2015**



Quelle: TwinEconomics

Szenario 1

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

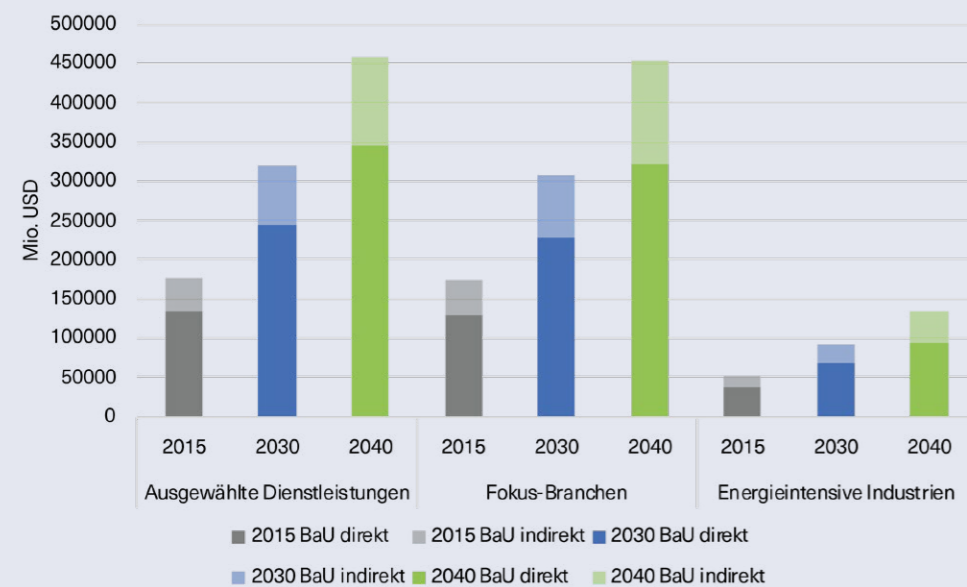
Betrachtet man die wirtschaftliche Entwicklung Bayerns von 2015 bis 2040, so zeigt sich im „BaU-Szenario“ für die Wertschöpfung nach Branchenclustern ein ähnliches Bild wie für Deutschland, allerdings mit stärkeren Wachstumsraten im direkten Effekt (Abbildung 85). Die indirekten Effekte, die hier ausschließlich für Bayern ausgewiesen werden, fallen aufgrund der kleinräumigeren Betrachtung naturgemäß geringer aus als deutschlandweit.<sup>292</sup> So weisen die Fokus-Branchen mit einem Wert von 1,36 den größten Wertschöpfungsmultiplikator auf, gefolgt von den energieintensiven Branchen mit 1,35 und den ausgewählten Dienstleistungsbranchen mit 1,31<sup>293</sup>. Der Multiplikator, definiert als Quotient aus totalem und direktem Effekt, ist eine Maßzahl für den volks- oder regionalwirtschaftlichen Hebel einer Branche und ist – am Beispiel der Fokus-Branchen – derart zu interpretieren, dass ein Euro Wertschöpfung, der in den Fokus-

Branchen erwirtschaftet wird, über Vorleistungsbezüge weitere 36 Cent Wertschöpfung in anderen Branchen absichert. Je höher der Multiplikator, desto eher kommt einer Branche die Rolle eines sogenannten Schlüsselsektors zu, d. h., Investitionen in diese Sektoren führen (über den Bezug vieler Vorleistungen, lange Wertschöpfungsketten und geringe Importe) automatisch zu hohen Effekten in verbundenen Sektoren.

Berücksichtigt man über die indirekten Effekte, die in Bayern ausgelöst werden, auch noch die indirekten Effekte, die in Restdeutschland ausgelöst werden, dann weisen sowohl die energieintensiven Industrien als auch die Fokus-Branchen mit einem Multiplikator von 1,75 eine hohe nationale Verflechtung bei vergleichsweise moderaten Importen auf.

Abbildung 85

Zeitliche Entwicklung der nominalen BWS in Bayern im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in Mio. USD



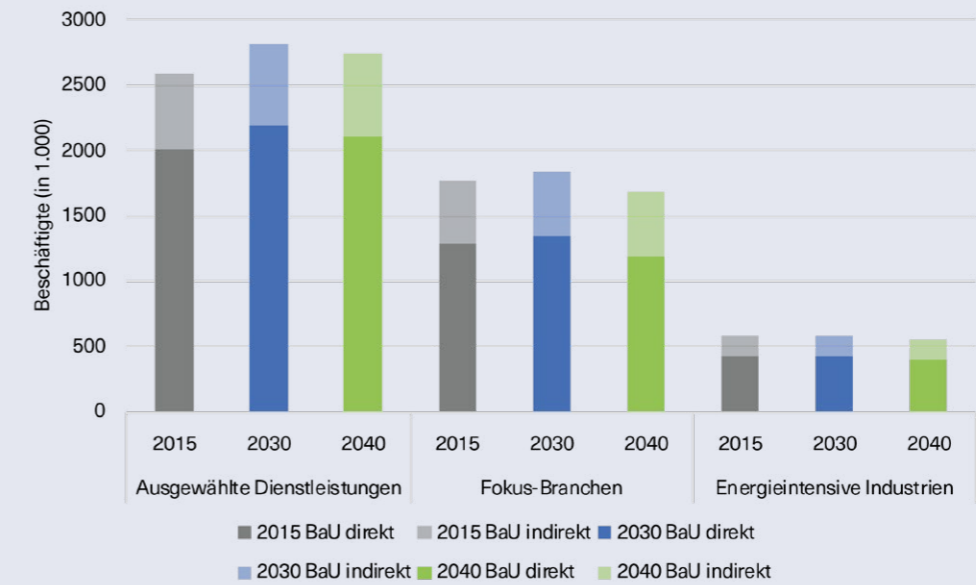
Quelle: TwinEconomics

<sup>292</sup> So werden für Bayern alle Vorleistungsbezüge, die nicht aus Bayern stammen, als Importe gewertet, die in weiterer Folge nicht in Bayern wertschöpfungswirksam werden. D. h. dass nicht nur Importe aus dem Ausland (wie in der deutschlandweiten Betrachtung), sondern auch alle Lieferungen aus Rest-Deutschland (die in der deutschlandweiten Betrachtung natürlich heimische Vorleistungen darstellen) für den indirekten Bayern-Effekt abgezogen werden.

<sup>293</sup> Anzumerken ist, dass Multiplikatoren für Dienstleistungen aufgrund der geringeren Vorleistungsintensität üblicherweise geringer, der direkte Effekt – verglichen mit dem Bruttoproduktionswert – dafür höher ausfällt.

Abbildung 86

Zeitliche Entwicklung der Beschäftigung in Bayern im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in 1.000 Beschäftigten



Quelle: TwinEconomics

## Szenario 1

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

### Auswirkungen auf Emissionen entlang der Wertschöpfungsketten in Deutschland und in Bayern

Eine umfassende Beurteilung der Auswirkungen klimapolitischer Szenarien ist nur dann möglich, wenn neben den direkten Emissionen der Unternehmen auch deren indirekte Emissionen in die Analyse miteinbezogen werden. Indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen umfassen diejenigen Emissionen, die ein Unternehmen durch den Erwerb von Vorleistungen aus anderen Branchen im In- und Ausland implizit mit „einkauft“, wie z. B. Energie; diese Emissionen können je nach eingesetzter Technologie oder Rohstoffen sehr hoch sein. Je nach Branche liegt ein Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen als indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen verborgen.

Die Emissionsentwicklung nach Branchen und Ländern in den Szenarien wird auf zwei Arten dargestellt: Zum einen werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in absoluten Werten (in Tonnen CO<sub>2</sub>) und zum anderen auch als relatives Maß, bezogen auf den Output (in Tonnen CO<sub>2</sub> je eine Mio. USD) der sogenannten CO<sub>2</sub>-Intensität, dargestellt. Die CO<sub>2</sub>-Intensität zeigt, wie viel Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Erzeugung von einer Mio. USD Produktion verursacht werden und erlaubt im Gegensatz zu den absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen einen unverzerrten Branchenvergleich bei der Frage, wie CO<sub>2</sub>-intensiv in den Szenarien im Zeitverlauf produziert wird. Auf diese Weise können Branchen mit hohen absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen (z. B. Energiewirtschaft und Metallherzeugung) und Branchen mit vergleichsweise niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen (in der Regel Dienstleistungsbranchen) besser miteinander verglichen werden.

#### Effekte in Deutschland

Nachfolgend werden die Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Intensitäten sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen den Jahren 2015, 2030 und 2040 für die Branchencluster „Energieintensive Industrien“, „Fokus-Industrien“ und „Dienstleistungen“ im „BaU-Szenario“ analysiert. Dazu werden für jedes Cluster die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten bzw. die direkten und indirekten absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen in einer Grafik zusammengeführt. Hierdurch wird schnell ersichtlich, welche Branchen wie viel CO<sub>2</sub>-Emissionen in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen generieren. Darüber hinaus ist der Produktionswert der einzelnen Branchencluster durch die Größe der Blasen ersichtlich.

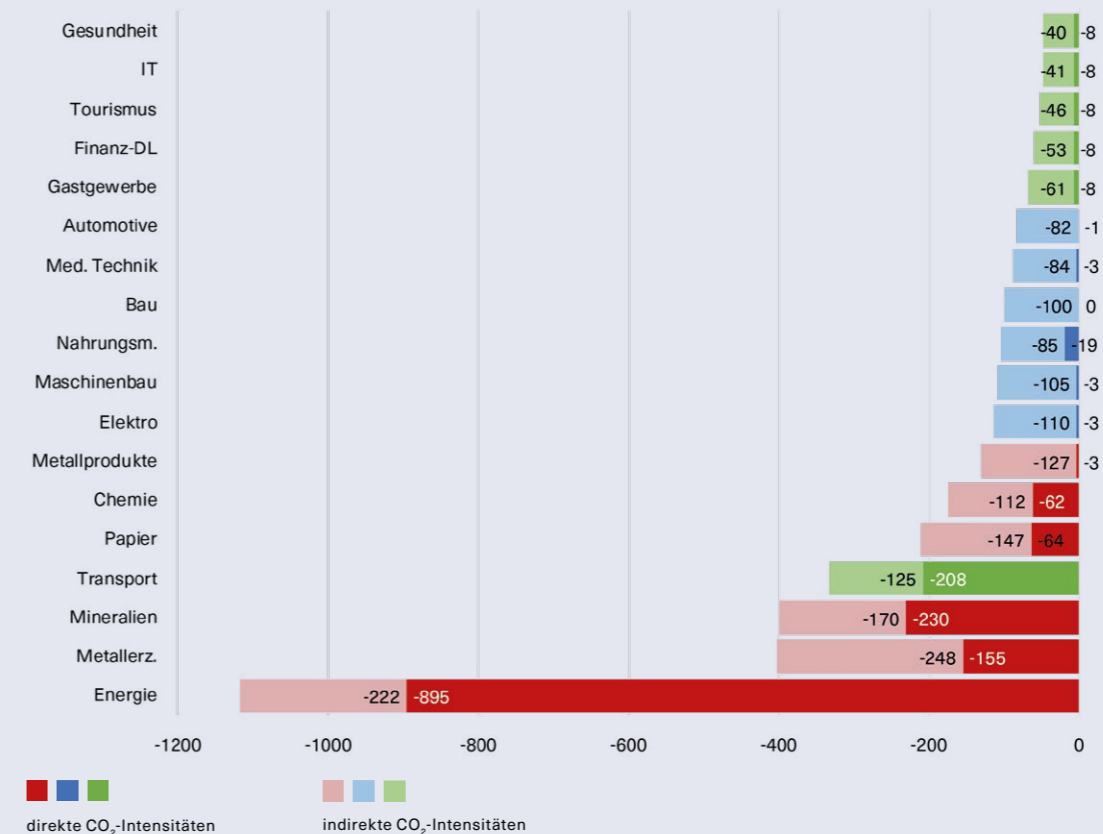
Im Jahr 2015 weisen bei den energieintensiven Branchen die Energiewirtschaft<sup>294</sup> mit insgesamt 1.938 Tonnen CO<sub>2</sub> je einer Mio. USD Output, die Herstellung mineralischer Erzeugnisse (1.086 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) sowie die Metallherzeugung (771 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) die höchste CO<sub>2</sub>-Intensität auf. In der Metallherzeugung, der Papierindustrie und der Chemieindustrie stammen rund zwei Drittel der generierten CO<sub>2</sub>-Intensität aus den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen. Im Jahr 2030 haben über alle Branchen sowohl die direkten und indirekten absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch die CO<sub>2</sub>-Intensitäten beträchtlich abgenommen (Abbildung 86 sowie Abbildung 87). Am stärksten sinkt die CO<sub>2</sub>-Intensität in den Branchen Energie, Metallherzeugung und Mineralien. Dies liegt daran, dass in diesen Branchen die bereits ergriffenen Energieeffizienzmaßnahmen sowie technologische Verbesserungen im Energiesystem auch im „BaU-Szenario“ greifen und sich derartige Maßnahmen auch in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen zeigen. Gerade bei den Effekten in der Wertschöpfungskette fallen die Rückgänge bei den indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in der Metallherzeugung, der Energiewirtschaft, der Herstellung mineralischer Erzeugnisse und der Papierindustrie am stärksten aus; die CO<sub>2</sub>-Intensität der eingekauften

<sup>294</sup> Die Energiewirtschaft ist in den Abbildungen nicht explizit dargestellt. Ihre Einbindung in die Grafik wäre aufgrund ihrer hohen CO<sub>2</sub>-Intensität nur durch eine größere Skalierung möglich. Dies würde die Darstellung der übrigen Branchen in der selben Abbildung sehr unübersichtlich machen.

Vorleistungen dieser Branchen geht ebenfalls deutlich zurück. Bei Fokus-Industrien ist der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität ganz überwiegend auf das Absinken der indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten zurückzuführen; am stärksten fällt der Rückgang der indirekten CO<sub>2</sub>-Intensität bei Elektro (-110 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) und Maschinenbau (-105 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) aus; auch dies liegt vor allem daran, dass in den Vorleistungsbranchen zunehmend energieeffizientere Querschnittstechnologien eingesetzt werden. Bei den ausgewählten Dienstleistungen ist der Rückgang in der Gastronomie am stärksten; auch dort spielen sich die Rückgänge ganz überwiegend in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen (indirekte CO<sub>2</sub>-Intensität) ab. Im Jahr 2040 gehen die CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Branchenclustern noch weiter zurück. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensitäten über die einzelnen Branchen der Branchencluster zwischen 2015 und 2030; das Jahr 2030 wurde gewählt, weil dieser Zeitpunkt bereits in „greifbarer“ Zukunft liegt.

Abbildung 87

Rückgang der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Business as Usual“ zwischen 2015 und 2030; in Tonnen CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output



Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Die nachfolgende Abbildung 88 gibt die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Intensitäten für die drei Branchencluster noch einmal gebündelt wieder.



## Szenario 1

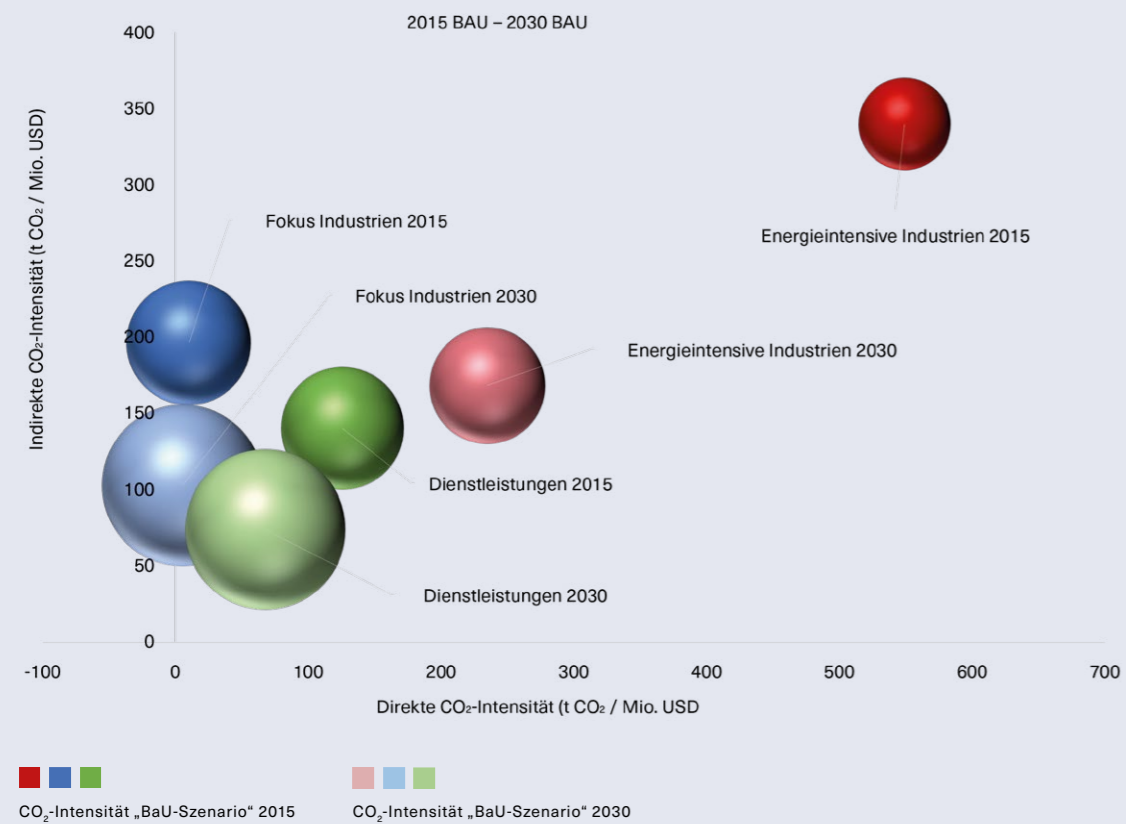
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Abbildung 88  
Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Business as Usual“ zwischen 2015 und 2030



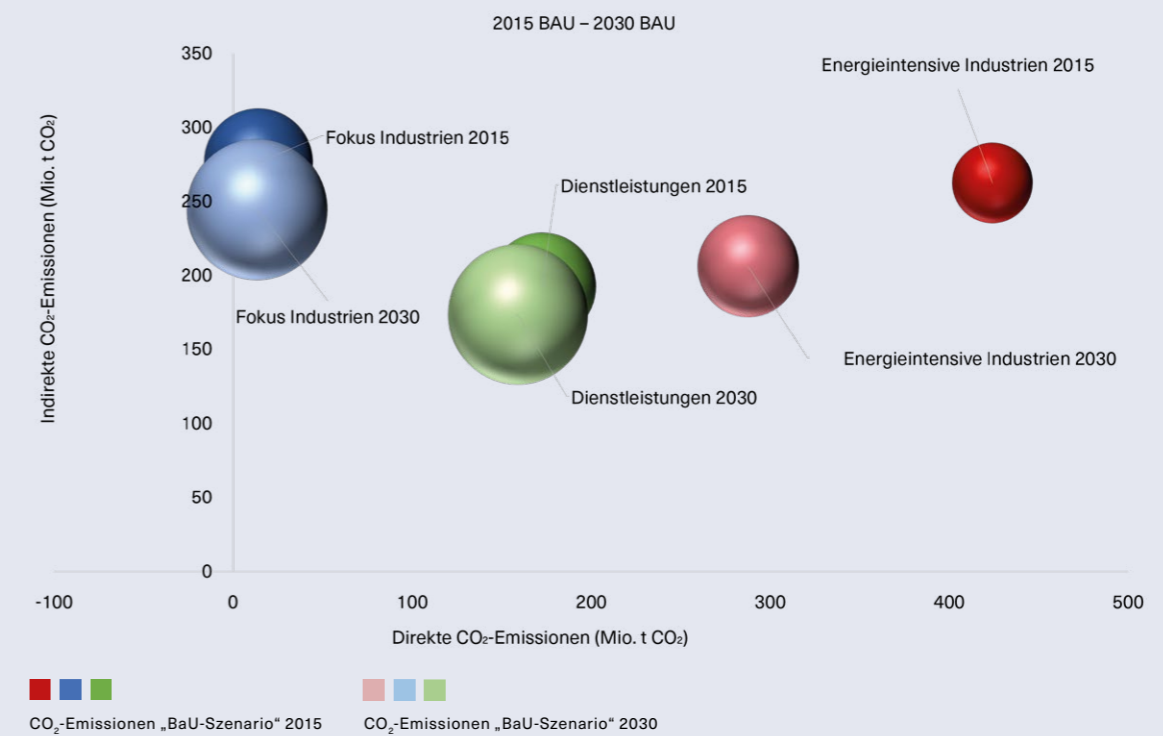
Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio. USD in 2015 bzw. 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Der künftige Rückgang<sup>295</sup> der CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den einzelnen Branchen bzw. Branchenclustern ist nicht allein auf den beträchtlichen Anstieg der Produktion zurückzuführen, da auch die absoluten direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im „BaU-Szenario“ in allen Branchenclustern deutlich zurückgehen, wie die nachfolgende Abbildung 89 und die Tabelle 12 zeigen. Die größten Rückgänge bei den absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen verzeichnen die energieintensiven Industrien (v. a. Energie, Metallerzeugung und Papier), aber auch der Transportsektor bei den Fokus-Industrien. Die energieintensiven Industrien generieren deutlich mehr direkte als indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Fokus-Industrien in der Regel ganz überwiegend indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Dienstleistungsbranchen mehr indirekte als direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bei der Herkunft der indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen stammen bei den energieintensiven Industrien und den ausgewählten Dienstleistungen 2015 rund zwei Drittel aus dem Inland; dieser Anteil sinkt aber bis 2040 leicht ab auf ca. 60 Prozent. Bei den Fokus-Industrien stammen 2015 gut 53 Prozent der indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Ausland; dieser Anteil erhöht sich bis 2040 leicht auf fast 57 Prozent.

<sup>295</sup> Ein Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität kann entweder allein durch einen Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei konstanter Produktion oder durch einen Anstieg der Produktion bei konstanten CO<sub>2</sub>-Emissionen oder durch einen Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei gleichzeitigem Anstieg der Produktion zurückzuführen sein.

Abbildung 89  
Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“ zwischen 2015 und 2030



Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio. USD in 2015 bzw. 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

## Szenario 1

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Tabelle 12  
Zeitliche Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“

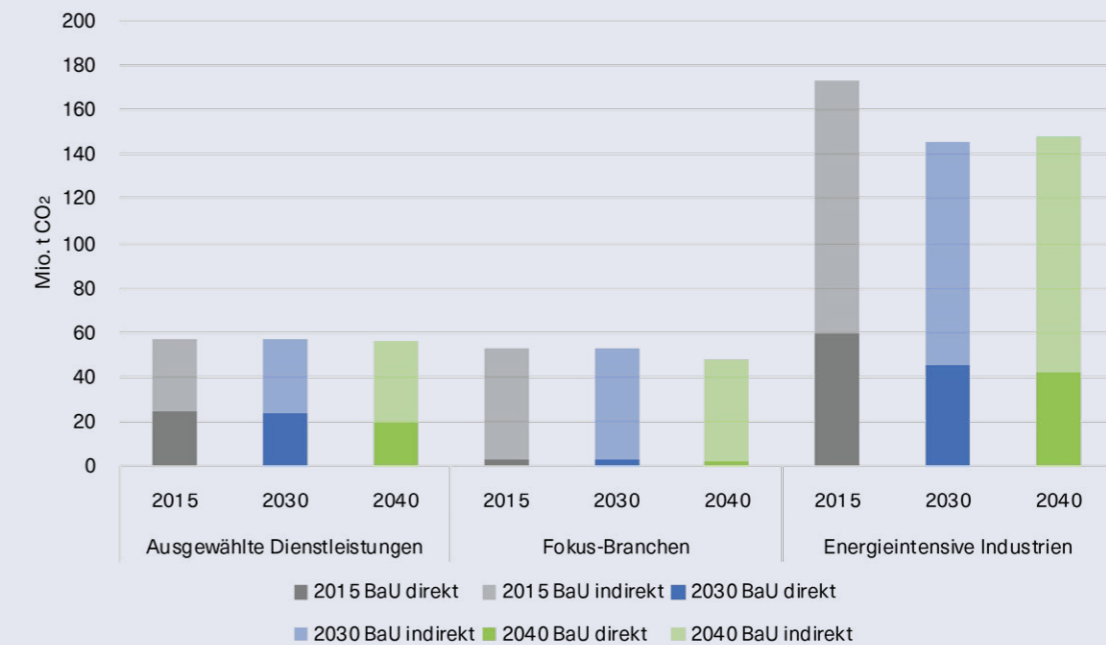
		Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Ausgewählte Dienstleistungen
<b>CO<sub>2</sub>-Intensitäten (t CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output)</b>				
2015	direkt	549	10	126
	indirekt	340	197	141
	<b>gesamt</b>	<b>889</b>	<b>207</b>	<b>266</b>
2030	direkt	235	6	68
	indirekt	169	103	74
	<b>gesamt</b>	<b>403</b>	<b>109</b>	<b>142</b>
2040	direkt	155	3	39
	indirekt	115	69	49
	<b>gesamt</b>	<b>270</b>	<b>72</b>	<b>88</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Intensitäten (t CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output)</b>				
2015	direkt	424	14	173
	indirekt	263	277	193
	davon Ausland	93	147	63
	<b>gesamt</b>	<b>687</b>	<b>291</b>	<b>366</b>
2030	direkt	288	13	159
	indirekt	207	245	174
	davon Ausland	85	136	64
	<b>gesamt</b>	<b>494</b>	<b>258</b>	<b>333</b>
2040	direkt	252	11	126
	indirekt	187	226	158
	davon Ausland	80	128	63
	<b>gesamt</b>	<b>439</b>	<b>237</b>	<b>284</b>

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

## Effekte in Bayern

Unterschiede hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen Bayern und Deutschland leiten sich im Wesentlichen aus den zuvor beschriebenen strukturellen Unterschieden in der sektoralen Zusammensetzung als auch aus der unterschiedlichen geografischen Abgrenzung ab. So sind für Bayern bei den indirekten Effekten nicht nur die importierten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Ausland, sondern auch die importierten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Restdeutschland zu berücksichtigen.

Abbildung 90  
Zeitliche Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“ in Bayern nach Branchenclustern



Quelle: TwinEconomics

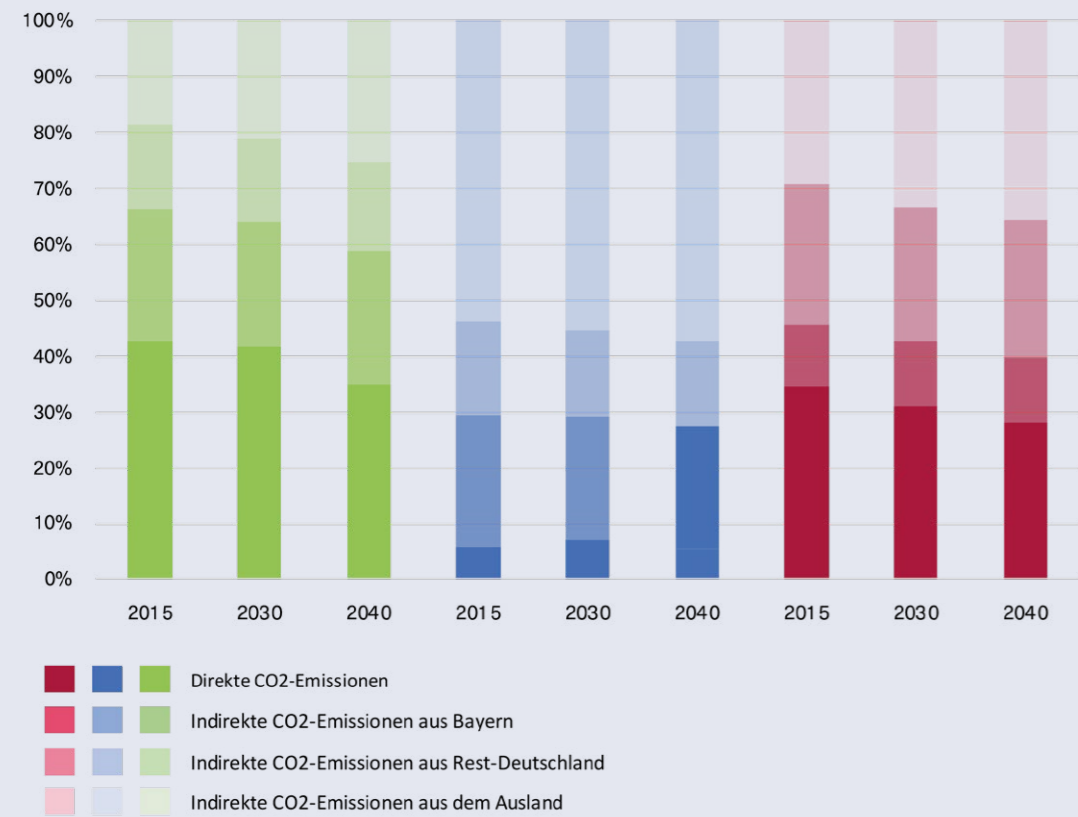
Im Vergleich der Branchencluster fällt, wie auch bereits für Deutschland gezeigt, auf, dass im „BaU-Szenario“ bis 2030 Einsparungen vor allem in den energieintensiven Industrien zu erwarten wären. In den Fokus-Branchen und ausgewählten Dienstleistungen wäre mit keinen nennenswerten Einsparungen über den gesamten Betrachtungszeitraum bis 2040 zu rechnen.

Während sich die absoluten Gesamtwerte der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Ausnahme der energieintensiven Industrien kaum verändern, zeigt sich aber – wie in Abbildung 91 dargestellt – dass sich die Zusammensetzung der Emissionen verändern wird. Derartige Veränderungen resultieren im direkten Effekt vor allem aus technologischem Fortschritt und Effizienzsteigerungen in den betrachteten Branchen selbst, im indirekten Effekt aus sich verändernden Vorleistungsnetzwerken und zunehmender Spezialisierung, welche sich in der Auslagerung von Aktivitäten und Dienstleistungen und damit verbundenen höheren indirekten Effekten widerspiegelt. So sinken im Zeitverlauf sowohl bei den energieintensiven Industrien als auch bei den ausgewählten Dienstleistungen die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen anteilig, wohingegen der Anteil der importierten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem indirekten Effekt steigt. In den Fokus-Branchen ist der anteilige Anstieg der direkten Emissionen der Tatsache geschuldet, dass die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitverlauf stärker sinken als die direkten Emissionen.

Szenario 1

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 91  
**Zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern**



Quelle: TwinEconomics

Eine zusammenfassende Darstellung der direkten und indirekten Emissionen liefert folgende Tabelle.

Tabelle 13  
**Zeitliche Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“ in Bayern, in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>**

		Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Ausgewählte Dienstleistungen
2015	CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	60	3	24
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	19	13	13
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	43	9	9
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	51	29	11
	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>173</b>	<b>53</b>	<b>57</b>
2030	CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	45	3	24
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	10	13
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	35	7	8
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	49	25	12
	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>146</b>	<b>44</b>	<b>57</b>
2040	CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	42	3	20
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	10	14
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	37	7	9
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	53	27	14
	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>148</b>	<b>48</b>	<b>57</b>

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

## Szenario 2

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Szenario 2 Einheitliches Vorgehen

**Weltweit sinken die Emissionen deutlich, in den Industrieländern sehr stark. Die Industrieländer, insbesondere Deutschland, profitieren wirtschaftlich.**

Eine Zusammenfassung finden Sie auf S. 154

### Veränderungen im Energiesystem und bei den Emissionen

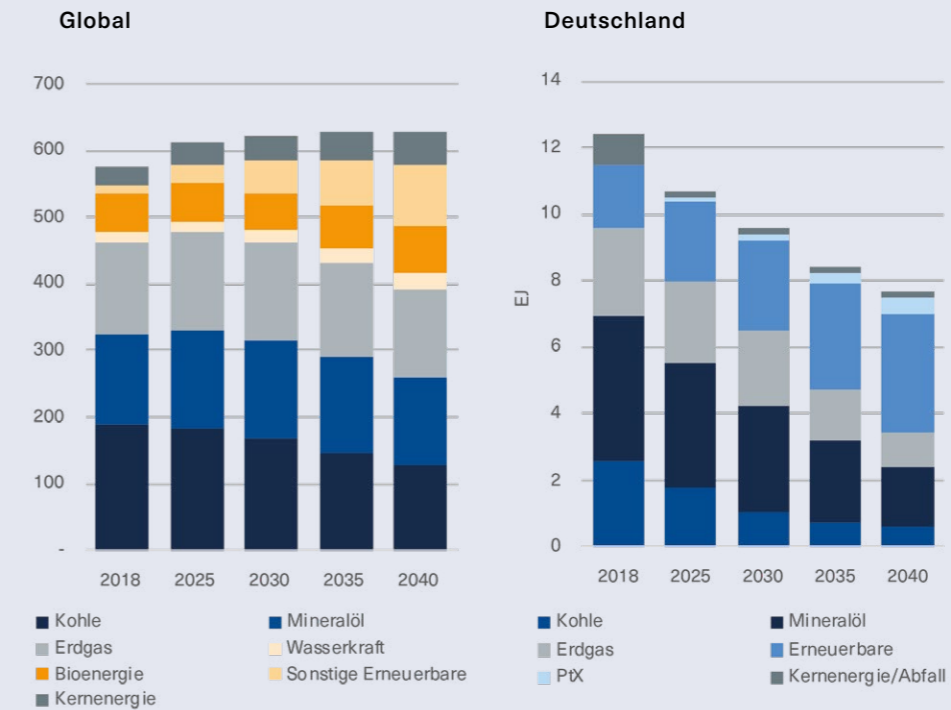
#### Veränderungen im Energiesystem: Primärenergieverbrauch

Das Szenario erfordert eine erhebliche Reduktion der energie- und prozessbedingten Treibhausgas-Emissionen bis 2040. Das erfordert deutliche Veränderungen in den nationalen Energiesystemen. Weltweit kommt es in allen Ländern zu einer starken Durchdringung der Energiesysteme mit erneuerbaren Energien. Zugleich geht der Energiebedarf in allen Industrieländern und China infolge steigender Effizienz und Elektrifizierung deutlich zurück. Bspw. sinkt der Primärenergieverbrauch gegenüber 2018 bis 2040 in der EU um rund 32 Prozent und in Deutschland um etwa 38 Prozent. Weltweit nimmt der Primärenergieverbrauch auch in diesem Szenario weiter zu. Insbesondere in den Entwicklungs- und Schwellenländern führt ein fortschreitendes Wirtschaftswachstum zu steigenden Energiebedarfen, die die sinkenden Verbräuche in den Industrieländern überkompensieren. Der Anteil fossiler Energieträger am weltweiten Primärenergieverbrauch geht infolge des Ausbaus erneuerbarer Energien von 81 Prozent im Jahr 2018 auf 58 Prozent Jahr 2040 zurück, sodass auch die Emissionen deutlich sinken. In Deutschland beträgt der Anteil erneuerbarer Energien im Jahr 2019 19 Prozent und steigt bis 2040 im Szenario auf gut 46 Prozent an (Abbildung 92).

#### Veränderungen im Energiesystem: Stromerzeugung

Weltweit kommt es in dem Szenario zu einem starken Anstieg der Stromnachfrage und der Produktion von erneuerbaren Energien, insbesondere der Windkraft und Photovoltaik (Abbildung 93). Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung steigt weltweit von heute 26 Prozent auf 79 Prozent in 2040. In Deutschland werden im Jahr 2040 rund 80 Prozent der Stromversorgung über erneuerbare Energien bereitgestellt, die durch flexible Gaskraftwerke ergänzt werden. Ab 2040 kommen mit voranschreitenden notwendigen Emissionseinsparungen zunehmend synthetische Gase als Brennstoff für die Backup-Kapazitäten zum Einsatz.

Abbildung 92  
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ in EJ



Quelle: WEO 2019, Eigene Darstellung Prognos, 2020

Die Stromerzeugung aus Kernenergie nimmt bis 2040 weltweit zu. Dies ist insbesondere auf den Ausbau in China und Indien zurückzuführen. Infolge der Zunahme des Strombedarfs bewegt sich der weltweite Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung im Jahr 2040 mit elf Prozent jedoch auf ähnlichem Niveau wie heute (zehn Prozent). Der Einsatz von erneuerbaren Energien in den Weltregionen ist unterschiedlich und in erster Linie abhängig von den regionalen Potenzialen. Bspw. kommt in China vermehrt Sonnenenergie zum Einsatz, während in Europa die Windkraft, insbesondere Offshore-Wind, dominiert. In beiden Regionen sind fossile Energieträger zur Stromerzeugung auch bis 2040 weiterhin relevant; in Europa vor allem Gas und in China Kohle (Abbildung 93).

Weltweit ist der Einsatz fossiler Energieträger bei einheitlichem Vorgehen jedoch stark rückläufig und macht im Jahr 2040 trotz steigenden Strombedarfs (+45 Prozent gegenüber 2018) nur noch knappe 50 Prozent aus.

Szenario 2

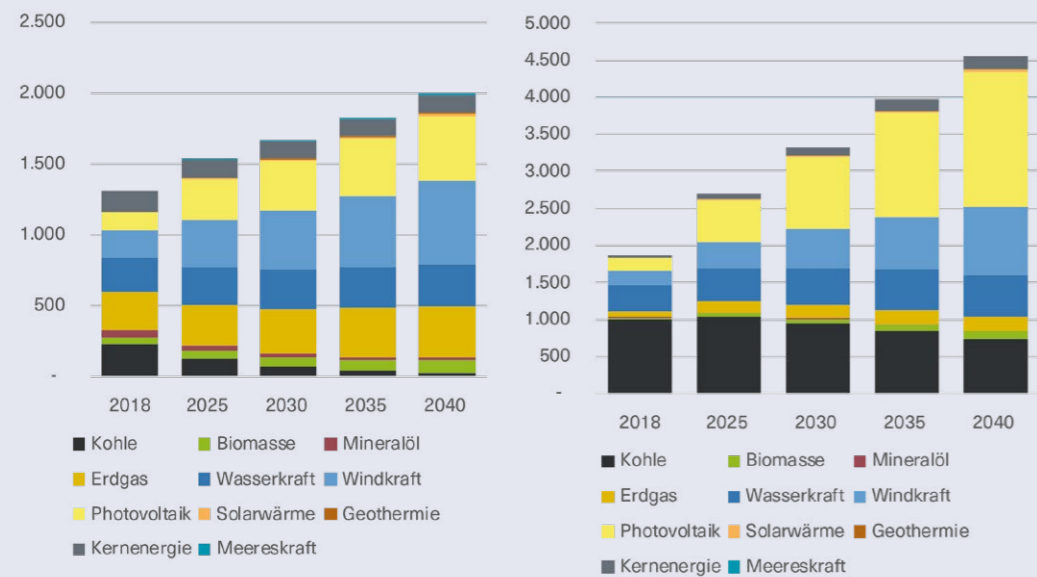
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Abbildung 93  
Entwicklung des Stromerzeugungskapazitäten im Szenario „Einheitliches Vorgehen“



Quelle: WEO 2019, Eigene Darstellung Prognos, 2020

Veränderung der Kosten für fossile Energieträger

Infolge des Rückgangs der weltweiten Nachfrage nach fossilen Energieträgern fallen deren Preise. Im Jahr 2040 liegen die Großhandelspreise für fossile Energieträger im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ deutlich niedriger als im Szenario „Business as Usual“. Der Weltmarktpreis für Rohöl ist rund 55 Prozent geringer. Die Preise für Erdgas und Steinkohle variieren je nach Weltregion. Sie sind zwischen einem Drittel und 25 Prozent niedriger als im „Business as Usual“-Szenario.

Veränderungen bei Investitionen

Die weltweiten kumulierten Investitionen in die Energiesysteme bis 2040 liegen im „Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gut 20 Prozent höher als im Szenario „Business as Usual“. Der Anstieg ist vor allem auf höhere Investitionen in erneuerbare Energien (+250 Prozent) und Energieeffizienz (+173 Prozent) zurückzuführen. Die kumulierten Investitionen für die Bereitstellung fossiler Energieträger bis 2040 fallen bei „Einheitlichem Vorgehen“ nur ungefähr halb so hoch aus wie im Szenario „Business as Usual“. Sie sind über den Szenariozeitraum deutlich rückläufig und liegen zwischen 2031 und 2040 bei nur noch rund 60 Prozent des Wertes den sie zwischen 2010 und 2018.

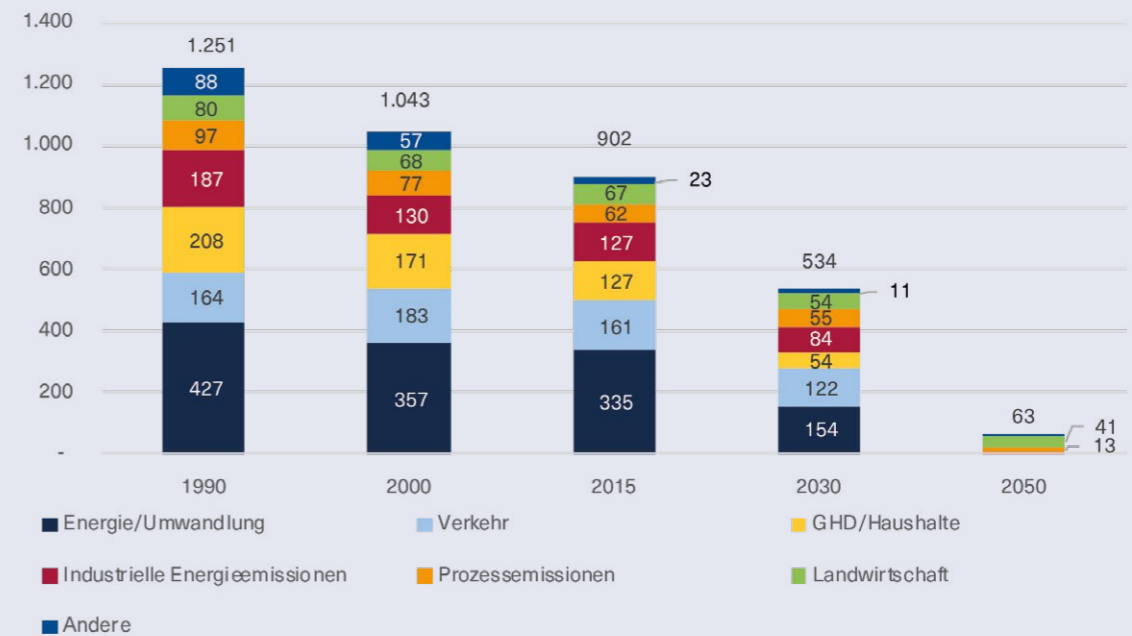
Für Deutschland wurden die Mehrinvestitionen gegenüber dem Szenario 1 („Business as Usual“) sehr detailliert abgeschätzt. Insgesamt belaufen sie sich auf ca. 1.800 Mrd. Euro von 2018 bis 2050, also im Durchschnitt ca. 56 Mrd. Euro jährlich. Diese Investitionen werden in Anlagen (erneuerbare Energien, Produktionsanlagen, Heizungsanlagen, raumluftechnische Anlagen etc.), Bauten sowie Infrastruktur getätigt. Diesen steht – ebenfalls im Vergleich mit der Referenz – bis 2050 die zunehmende Einsparung der fossilen Energieträger gegenüber, die kumuliert ca. 1.650 Mrd. Euro ausmacht, sodass die resultierenden direkten volkswirtschaftlichen Mehrkosten lediglich 150 Mrd. Euro betragen, also durchschnittlich 4,7 Mrd. Euro im Jahr. Diesen Mehrkosten stehen die in den nächsten

Kapiteln erläuterten volkswirtschaftlichen Effekte gegenüber, die einerseits durch Verteilungseffekte von Investitionen und Einsparungen nach Branchen und Einkommensgruppen entstehen. Andererseits wird ein Großteil der Investitionen in Bauten und Anlagen von inländischen Unternehmen produziert und umgesetzt, was wiederum leicht positive Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzeffekte zur Folge hat.

Veränderungen bei den Treibhausgas-Emissionen

In dem Szenario werden die Treibhausgas-Emissionen bis 2050 gegenüber 2018 auf globaler Ebene um etwa 71 Prozent und in Deutschland um fast 100 Prozent reduziert. Abbildung 94 zeigt die Treibhausgasentwicklungen nach Sektoren in Deutschland. Diese Reduktion führt zu einer globalen Erwärmung um 1,5 Grad bis 2,0 Grad C bis 2100 gegenüber vorindustriellen Werten und bleibt somit in dem Veränderungsbereich, dessen Konsequenzen für die Weltbevölkerung, die Nahrungsketten und die gebaute Umwelt gemäß den Analysen des IPCC voraussichtlich handhabbar sind.

Abbildung 94  
Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq. im Szenario „Einheitliches Vorgehen“



Quelle: BDI, 2018, Eigene Darstellung Prognos, 2020

## Szenario 2

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Technologische Veränderungen

Die in dem Szenario erforderlichen technologischen Veränderungen betreffen vor allem die Bereiche Verkehr und Industrie.

Im Verkehr findet weltweit eine zunehmende Elektrifizierung statt. Bis 2050 steigt nach den Szenarien der IEA der weltweite Neuzulassungsanteil an Elektrofahrzeugen auf 72 Prozent an. In Deutschland werden im Jahr 2050 im Pkw-Segment fast ausschließlich Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zugelassen. Zunehmend effizientere Verbrenner spielen noch als Übergangstechnologie während ca. einer Fahrzeuggeneration eine Rolle.

Für die Nutzung des Güterverkehrs sind in Deutschland nach den BDI-Klimapfaden 8.000 Autobahnkilometer mit Oberleitungen ausgestattet. Analog dazu ändert sich der Fahrzeugbestand an schweren Nutzfahrzeugen, sodass 85 Prozent der schweren Nutzfahrzeuge im Jahr 2050 in Deutschland durch alternative Antriebsarten angetrieben werden. Bei den Antriebsarten überwiegen die batterieelektrischen und Oberleitungshybrid-Fahrzeuge mit einem Anteil von über 50 Prozent. Auch hier steigt die Effizienz der Verbrennungsmotoren weiterhin an.

Im internationalen Seeverkehr gehen nach dem WEO-Szenario die Treibhausgase bis 2050 in Übereinstimmung mit der International Maritime Organization um rund die Hälfte gegenüber 2008 zurück. Dies ist vor allen Dingen Ergebnis effizienterer Antriebssysteme. Im Szenario der BDI-Klimapfade kommen bis 2050 für den von Deutschland ausgehenden Seeverkehr ausschließlich strombasierte (synthetische) Energieträger zum Einsatz.

Im internationalen Flugverkehr werden nach dem Szenario der WEO die Emissionen gegenüber 2005 um 50 Prozent reduziert. Hierfür ist neben einer jährlichen Steigerung der Energieeffizienz um 2,6 Prozent pro Jahr auch der Einsatz von biogenen Kraftstoffen verantwortlich. Im Szenario der BDI-Klimapfade werden bis 2050 die von Deutschland ausgehenden Flüge ausschließlich klimaneutral mit strombasierten synthetischen Energieträgern betrieben.

In der Industrie schreitet die Elektrifizierung des Energieverbrauchs weltweit weiter voran und steigt von heute 28 Prozent bis auf 40 Prozent bis zum Jahr 2050. In der Stahl-, Zement- und Chemieindustrie kommt das Abscheiden und anschließende Speichern oder Weiternutzen von CO<sub>2</sub>-Emissionen (CCUS) bis 2040 zunehmend zum Einsatz. Im Energiesektor wird diese Technologie nach dem WEO im Jahr 2040 bei rund fünf Prozent der weltweiten Stromerzeugung eingesetzt, was eine konsequente Entwicklung und relativ rasche Diffusion erfordert. Nach der Analyse für den BDI kommt in Deutschland CCS nur im Industriesektor und bei der Abfallverbrennung zum Einsatz und spielt in der Strom- und Fernwärmeerzeugung keine Rolle. Als Einsatzbranchen von CCS sind in Deutschland vor allen Dingen die Stahl-, Zement-, und Chemieindustrie zu nennen. Daneben kommt CCS noch bei der Müllverbrennung und in den verbleibenden Raffinerien zum Einsatz. Ein Anteil des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> wird als Rohstoff wieder eingesetzt, vor allem in der Chemieproduktion.

Nach den Klimapfaden erfolgt die Stromerzeugung in Deutschland vor allen Dingen über erneuerbare Energien wie Photovoltaik und Windkraftwerke, sowohl on- als auch offshore. Als Backup-Kraftwerke werden in Deutschland Gaskraftwerke genutzt, die im Jahr 2050 ausschließlich mit synthetischem Methan betrieben werden, das mithilfe von erneuerbar produziertem Strom erzeugt wurde.

Neben dem Umwandlungssektor kommen strombasierte Energieträger in Deutschland überwiegend im Verkehr zum Einsatz und decken dort rund die Hälfte der Energienachfrage. Hier werden vor allem Methan und flüssige Kohlenwasserstoffe (PtL) als Energieträger eingesetzt.

Wasserstoff kommt in dem Szenario weltweit in relativ geringem Ausmaß zum Einsatz. Im Jahr 2040 liegt der Anteil von Wasserstoff am Endenergieverbrauch bei ungefähr 0,7 Prozent. Vereinfacht wurde in dem WEO-Szenario angenommen, dass weltweit der Anteil bei zehn Volumenprozent und in Nordamerika und China bei fünf Prozent des Energiegehaltes des transportierten Erdgases im Netz liegt. In Deutschland wird Wasserstoff nach dem BDI-Szenario ausschließlich im Verkehrssektor (vor allem Schwerverkehr, kleinere Anteile Pkw und Schiene) eingesetzt, in dem Wasserstoff einen Anteil von gut sechs Prozent am Endenergieverbrauch ausmacht.

Biomasse wird weltweit bis 2040 verstärkt energetisch genutzt, der Primärenergieeinsatz aus Biomasse steigt gegenüber 2018 um rund 20 Prozent an. Auch in den Klimapfaden für Deutschland kommt Biomasse im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2015 stärker zum Einsatz (Anstieg um 16 Prozent). In Deutschland kommt es aufgrund der Kosteneffizienz zu einer Verschiebung der Einsatzsektoren von Biomasse, wodurch in der Industrie rund 60 Prozent der genutzten Biomasse eingesetzt wird – im Vergleich zu zehn Prozent im Jahr 2015. Im Gegenzug dazu wird Biomasse in geringerem Umfang in Gebäuden und der Stromnutzung verwendet. Der Anteil der Biomasse im Verkehr bleibt in etwa auf dem Niveau des Jahres 2015.

Im Gebäudesektor spielt zunehmende Effizienz eine erhebliche Rolle. Weltweit liegt der Neubauanteil von Null-Emissionsgebäuden im Jahr 2030 bei über drei Prozent. In Deutschland wird von einer deutlichen Erhöhung der jährlichen Sanierungsrate auf 1,9 Prozent gegenüber 1,1 Prozent im „BaU“ ausgegangen. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass die Beheizung dann auf Basis erneuerbarer Energien (vor allem Wärmepumpen und Solarthermie), sowohl in Einzelsystemen als auch in Ballungsräumen verstärkt in leitungsgebundenen Systemen erfolgen kann.

Weltweit kommt es nach dem WEO-Szenario im Gebäudesektor zu einem verstärkten Einsatz von Wärmepumpen, bereits 2030 liegt der Marktanteil an neu verkauften Heizungssystemen bei über drei Prozent. In Deutschland sind bis 2050 nach den BDI-Klimapfaden 16 Mio. Wärmepumpen zur Bereitstellung von Raumwärme installiert. Das WEO-Szenario sieht ab 2030 auch den vermehrten Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen in Heizungssystemen und bei der Warmwasserbereitung vor. In Deutschland spielt diese Technologie nach dem BDI-Szenario im Gebäudesektor jedoch insbesondere aus Kostengründen keine Rolle.

## Szenario 2

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

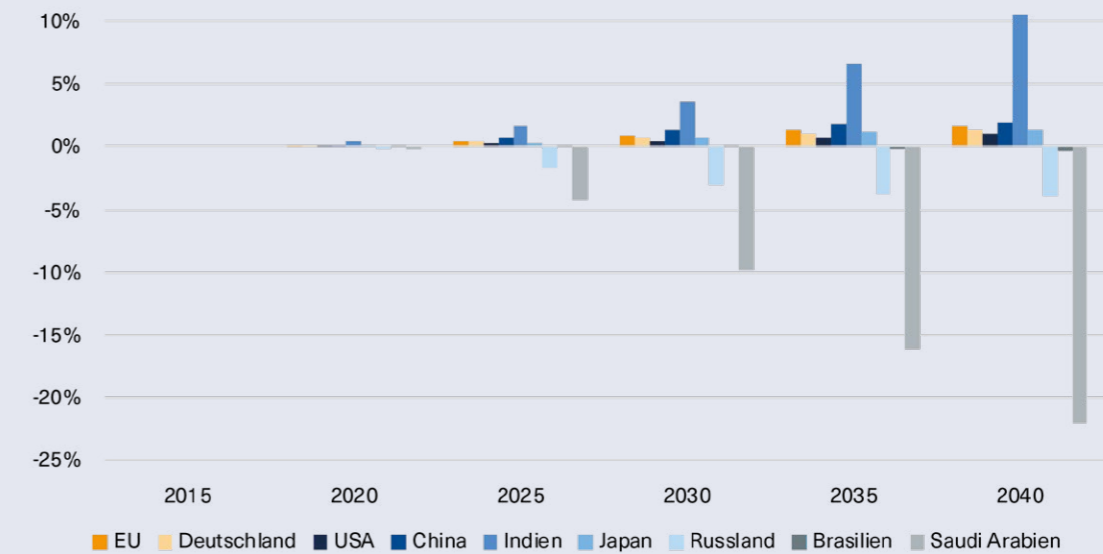
## Effekte bei Handel, Branchenstruktur, Beschäftigung und BIP

Im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ ist in Anlehnung an das „Sustainable Development Scenario“ der Internationalen Energieagentur (IEA, 2019) unterstellt, dass weltweit umfassende Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden. Allerdings geht die IEA nicht davon aus, dass dies bis zum Jahr 2040 bereits zu einem einheitlichen globalen CO<sub>2</sub>-Preis führen wird. Für die Industrieländer wird ein CO<sub>2</sub>-Preis von 100 USD pro Tonne CO<sub>2</sub> erwartet, für China von 75 USD und für weniger entwickelte Länder wie u. a. Indien werden noch keine CO<sub>2</sub>-Preise angenommen. Trotzdem setzen auch diese Länder wie die Industrieländer viele Klimaschutzmaßnahmen um. Die IEA unterstellt einen Mix aus Politikmaßnahmen zur Erreichung der Treibhausgas-Minderungen. Im Modell GINFORS\_E wird entsprechend angenommen, dass ein Teil der Treibhausgas-Minderungen durch die CO<sub>2</sub>-Preise erfolgt und ein anderer Teil durch zusätzliche Investitionen ausgelöst wird. Im Folgenden werden die Abweichungen zur Entwicklung im „BaU-Szenario“ betrachtet. Sie können auf die Klimaschutzmaßnahmen, d. h. die Treibhausgas-Minderungen, die CO<sub>2</sub>-Preise und die zusätzlichen Investitionen, etwa zum Wasserstoffeinsatz in der Stahlindustrie oder aktuell zum Hochlauf der Elektromobilität, zurückgeführt werden.

## Entwicklung international

Die Entwicklung der Weltbevölkerung bleibt gegenüber dem „BaU-Szenario“ ebenso unverändert wie andere Annahmen zu den internationalen Energiepreisen. Dagegen zeigen sich in einigen Ländern deutliche Effekte auf die Wirtschaftsleistung (Abbildung 95). In Indien liegt das BIP im Jahr 2040 gut zehn Prozent höher als im „BaU-Szenario“. Das Land profitiert besonders von den Klimaschutzmaßnahmen, die zu einer deutlichen Einsparung von Energieimporten führen. In den Ländern, die bisher fossile Energieträger wie Öl und Gas exportieren, fallen die Effekte deutlich negativ aus. In Saudi-Arabien liegt das BIP im Jahr 2040 um 22 Prozent niedriger als im „BaU-Szenario“. Das würde immer noch Wirtschaftswachstum bedeuten. Grundsätzlich hat ein Land wie Saudi-Arabien aber die Möglichkeit, alternative Energiequellen wie Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe CO<sub>2</sub>-frei zu produzieren, was die Effekte deutlich reduzieren würde. In den Industrieländern und in China fallen die Effekte leicht positiv aus. Maßnahmen zur höheren Energieeffizienz und der Ausbau erneuerbarer Energien senken die Energieimporte. Die Maßnahmen lohnen sich vielfach auch einzelwirtschaftlich.

Abbildung 95  
Abweichung des BIP gegenüber dem Szenario „Business as Usual“



Quelle: GWS, 2020

Mit Ausnahme von Indien und Saudi-Arabien sind die Wirkungen auf die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten gering. In den Industrieländern inkl. Deutschland steigt die jährliche Wachstumsrate um weniger als 0,1 Prozentpunkte.

## Direkte Effekte in Deutschland

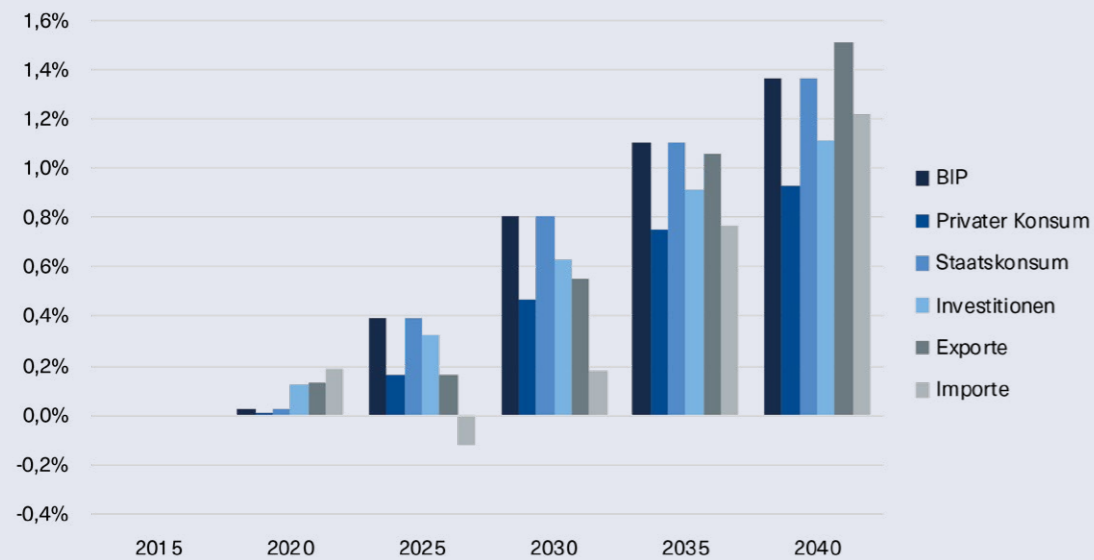
Für Deutschland bedeutet dies, dass das BIP im Jahr 2040 knapp 1,4 Prozent höher liegt als im „BaU-Szenario“. Insbesondere der Außenhandel und zusätzliche Investitionen in Klimaschutz treiben das BIP an. Im Außenhandel sind einerseits die Importe fossiler Energieträger rückläufig, zum anderen steigen die Exporte, weil Deutschland bei Klimaschutzgütern wie auch bei Investitionsgütern generell hohe Weltmarktanteile aufweist. Angesichts der sehr hohen deutschen Handelsbilanzüberschüsse sind die Möglichkeiten allerdings kleiner, als dies in Studien erscheint, die lediglich auf das absolute Marktwachstum von Klimaschutztechnologien abzielen.

Das einheitliche Vorgehen führt auch zu deutlichen sektoralen Verschiebungen (Abbildung 97). Stark negative Effekte ergeben sich in der klassischen Energiewirtschaft, weil der Einsatz von Kohle, Öl und Gas zurückgeht. Durch die starke Elektrifizierung „gewinnt“ die Elektrizitätswirtschaft, was jedoch insbesondere die Rückgänge bei der Mineralöl- und Gasversorgung nicht aufwiegt. In der Industrie ergeben sich nur geringe Veränderungen. Während die Fokus-Branchen leicht profitieren können, geht die Bruttowertschöpfung in der energieintensiven Industrie gegenüber dem „BaU-Szenario“ leicht zurück. Am stärksten profitieren die Dienstleistungen.

Szenario 2

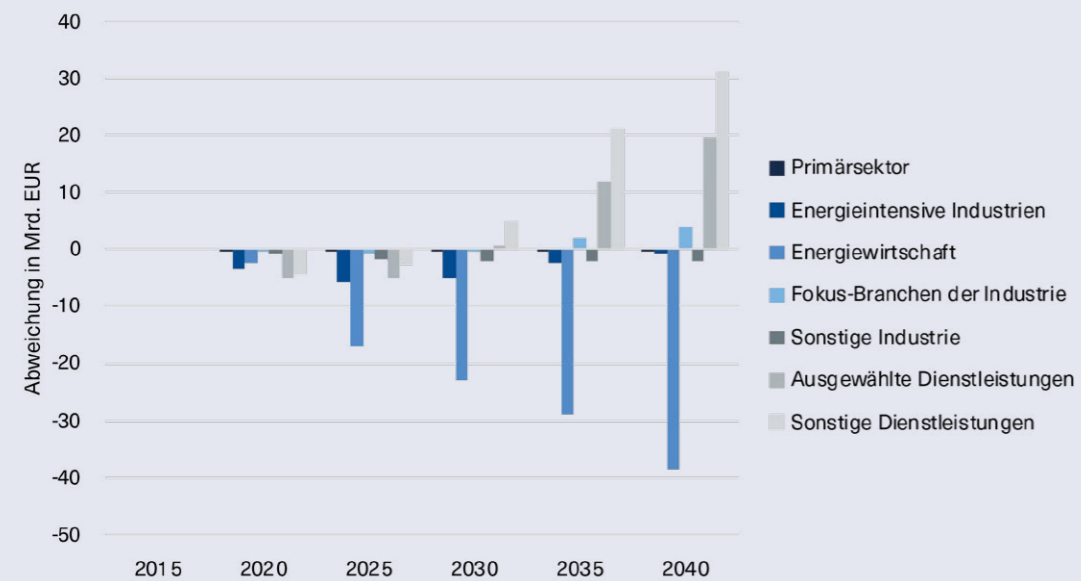
- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 96  
**Abweichungen des BIP und seiner Komponenten in Deutschland im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“**



Quelle: GWS, 2020

Abbildung 97  
**Abweichungen der Bruttowertschöpfung in konstanten Preisen in Deutschland im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“**

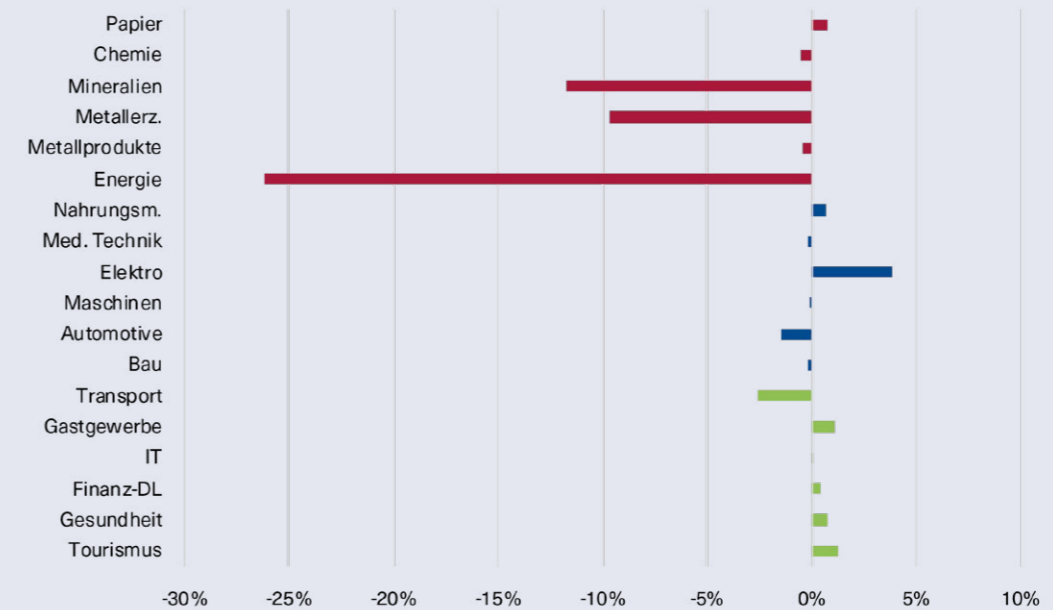


Quelle: GWS, 2020

Werden die Effekte weiter nach den Fokus-Branchen für das Jahr 2030 aufgegliedert, zeigt sich ein deutlicher Rückgang der Wertschöpfung der Energieversorgung, die die Bereitstellung von Gas, Strom und Wärme umfasst (Abbildung 98). Daneben weisen einige CO<sub>2</sub>-intensive Industrien wie die Metallherzeugung und die Herstellung von Glas, Keramik und Zement (Mineralien) deutliche Rückgänge gegenüber dem „BaU-Szenario“ aus.

Für die Bereiche Automotive und Transport zeigen sich leicht negative Effekte im Jahr 2030. Mit dem Übergang zur Elektromobilität erholen sie sich bis zum Jahr 2040. Die Elektromobilität führt u. a. dazu, dass die Elektrotechnik ein deutliches prozentuales Plus bei der Wertschöpfung aufweist. In anderen Industriebranchen sind die Effekte gering. Einige Dienstleistungsbereiche können ihre Wertschöpfung leicht steigern. Bei der Interpretation der Gesamtzahlen ist zu berücksichtigen, dass bereits heute die Wertschöpfung in Deutschland ganz überwiegend im Dienstleistungssektor erzielt wird. Eine kleine prozentuale Zunahme ist in absoluten Zahlen entsprechend groß.

Abbildung 98  
**Abweichungen der Bruttowertschöpfung in konst. Preisen im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“**



Quelle: GWS, 2020

Grund für die deutlichen Verluste in den CO<sub>2</sub>-intensiven Industrien sind die höheren CO<sub>2</sub>-Preise und die Kosten für zusätzliche Investitionen zur Minderung der Emissionen. Dies führt gerade in Industrien wie der Zementherstellung, die aufgrund der geringen Wertdichte der Produkte weniger im internationalen Handel stehen, dazu, dass die Produkte relativ teurer werden. In der Bauwirtschaft kann das z. B. bedeuten, dass mehr Holz und weniger Zement verbaut werden, z. B. bei Ein- und Zweifamilienhäusern sowie kleineren Mehrfamilienhäusern und Dienstleistungsgebäuden. Inwieweit es tatsächlich zu diesen Preissteigerungen kommt, hängt auch von den politischen Maßnahmen ab. Bei der Stahlerzeugung fördert die Bundesregierung die Umstellung auf Wasserstoffnutzung, die die Emissionen drastisch reduzieren kann. In den übrigen Branchen sind die Preiswirkungen gering, weil die CO<sub>2</sub>-Intensität der Produktion gering ist. Abbildung 99 zeigt eine Übersicht über die von den Fokus-Branchen erlebten Preisunterschiede im Vergleich zum „BaU-Szenario“.



## Szenario 2

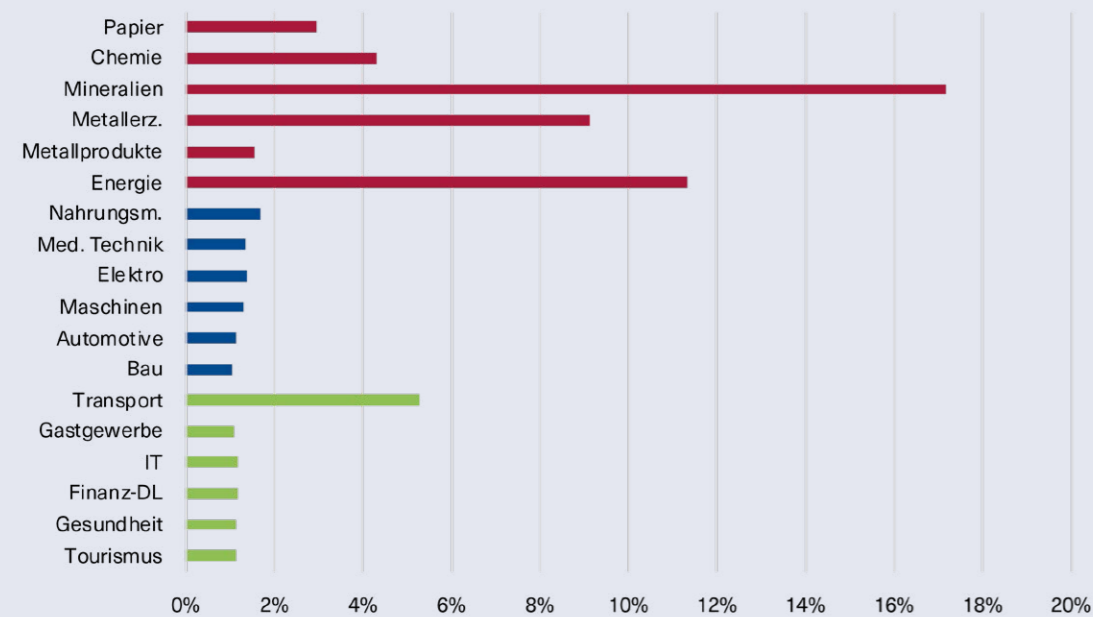
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

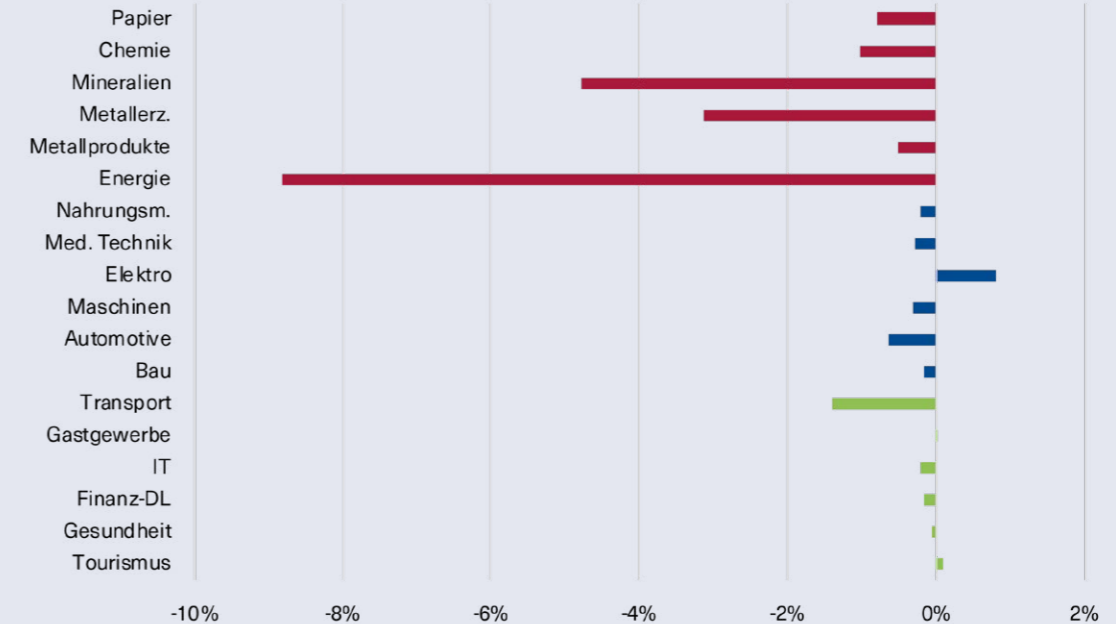
Abbildung 99  
Abweichungen der Güterpreise im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“



Quelle: GWS, 2020

Bei der Beschäftigung (Abbildung 100) ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der preisbereinigten Wertschöpfung, weil die prozentualen Änderungen geringer ausfallen. Durch die Preissteigerungen kommt es zu zusätzlichen Effizienzsteigerungen in den Industrien selbst. Außerdem steigen die Reallöhne weniger stark. Auch bei der Beschäftigung täuscht die prozentuale Betrachtung mit Blick auf die Gesamtentwicklung. Die leichte prozentuale Beschäftigungszunahme in Dienstleistungen wie unternehmensnahen und öffentlichen Dienstleistungen, die in der Abbildung teils nicht enthalten sind, dominiert die gesamte Beschäftigungsentwicklung.

Abbildung 100  
Abweichungen der Beschäftigung im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“



Quelle: GWS, 2020

#### Entwicklungslinien der ökonomischen Effekte in der Wertschöpfungskette in Deutschland und in Bayern

##### Deutschland

Im Folgenden wird das Szenario „Einheitliches Vorgehen“ im Hinblick auf die Wertschöpfungseffekte im Jahr 2030<sup>296</sup> untersucht, die, ausgehend von einzelnen Branchen in vorgelegten Bereichen der Wertschöpfungskette, angestoßen werden. Dazu wird das Szenario „Einheitliches Vorgehen“ dem Szenario „Business as Usual“ (BaU) gegenübergestellt. Analog zur Analyse der zeitlichen Entwicklung im „BaU-Szenario“ (Seite 169 ff) wird stets zwischen direkten und indirekten Effekten unterschieden. Die Betrachtung konzentriert sich zunächst auf Deutschland, bevor der Fokus auf Bayern erweitert wird. Dementsprechend beziehen sich die ausgewiesenen indirekten Effekte auch nur auf die jeweiligen Vorleistungsbranchen in Deutschland.

Abbildung 101 stellt die absolute Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem „BaU-Szenario“ für ausgewählte Branchen im Jahr 2030 dar. Es zeigt sich, dass im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ die meisten Branchen von den angenommenen Klimaschutzmaßnahmen infolge der zunehmenden Exporte und der zusätzlichen Investitionen in den Klimaschutz profitieren und absolute BWS-Zuwächse im Vergleich zum „BaU-Szenario“ 2030 erzielen können. Diese Zuwächse generieren die meisten Branchen direkt (dunkel eingefärbter Teil der Balken in Abbildung 101) und weniger durch Vorleistungskäufe in ihren Zulieferbranchen. Besonders stark fällt die Zunahme bei einigen Branchen im Dienstleistungsbereich aus (grün eingefärbte Balken).

<sup>296</sup> Das Jahr 2030 wurde in sämtlichen Abweichungsszenarien als Vergleichsjahr zu 2015 gewählt, da es einen Zustand in relativ naher Zukunft zeigt.

## Szenario 2

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

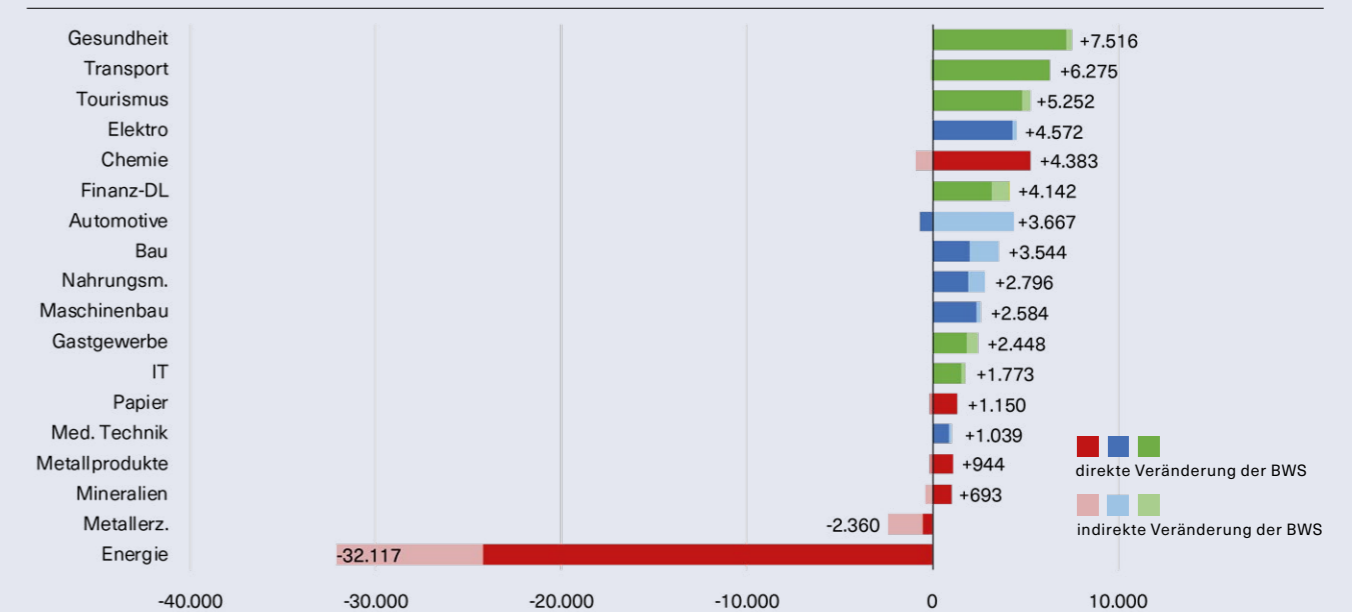
Während die Dienstleistungsbranchen zu den größten Gewinnern im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ zählen, trifft bei den energieintensiven Branchen (rot eingefärbte Balken) der Einbruch der Bruttowertschöpfung die Metallherzeugung und vor allem den Energiesektor besonders empfindlich. Dies liegt vor allem an den Investitionskosten für weitere Emissionsminderungen und dem Ausbau erneuerbarer Energien in der Energiewirtschaft (Dekarbonisierung) sowie den höheren CO<sub>2</sub>-Preisen, die diese Branchen zu schultern haben. Deutlich besser entwickelt sich dagegen die Chemieindustrie, die sogar stärker profitiert als die Dienstleistungsbranchen „Finanzdienstleistungen“ und „IT“ sowie die meisten Branchen im Cluster Fokus-Industrien.

Die Fokus-Branchen (blau eingefärbte Balken) belegen im Branchenvergleich vorwiegend Plätze im Mittelfeld. Die Elektroindustrie kann als Profiteur des technologischen Wandels mit Abstand den stärksten Bruttowertschöpfungszuwachs innerhalb des Clusters verzeichnen (+4.572 Mio. USD), gefolgt von der Automobilindustrie (+3.667 Mio. USD). Im Vergleich zu den Dienstleistungsbranchen fällt auf, dass in den Fokus-Branchen der indirekte Anteil des Gesamteffekts teilweise deutlich höher ausfällt. Dies ist insbesondere in der Automobilindustrie der Fall. Die dort unmittelbar generierte BWS sinkt, der Verlust wird jedoch von einem positiven indirekten Effekt überkompensiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sowohl in der Automobilindustrie als auch in den übrigen Fokus-Branchen Investitionen zur Verbesserung der Energieeffizienz, in modifizierte Produktions- und Fertigungsanlagen (Elektromobilität im Bereich Automotive) und in die Ausweitung der Produktion von Klimaschutztechnologien (z. B. im Maschinen- und Anlagebau) umgesetzt werden, die nicht nur unmittelbare positive Wertschöpfungseffekte in den Fokus-Branchen selbst auslösen, sondern auch über Vorleistungskäufe positive Effekte in den vorgelagerten Branchen und damit in der gesamten Wertschöpfungskette bewirken.

In den Dienstleistungsbranchen sind derartige Ausstrahlungswirkungen in der Wertschöpfungskette erheblich niedriger, weil dort die Wertschöpfungsketten häufig eine viel geringere Wertschöpfungstiefe aufweisen als die Fokus-Industrien.

Abbildung 101

**Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD**



Hinweis: Die ausgewiesenen Werte entsprechen jeweils der Gesamtveränderung gegenüber dem „BaU-Szenario“ (2030), d. h. der Summe aus direkter und indirekter Veränderung der BWS.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

## Bayern

Analog zu Deutschland sollen auch für Bayern die Ergebnisse aus dem Szenario „Einheitliches Vorgehen“ mit dem „BaU-Szenario“ in Beziehung gesetzt werden.

Ein Blick auf die gesamte bayerische Wirtschaft zeigt, dass ein „Einheitliches Vorgehen“ im Klimaschutz zu den – im Szenariovergleich – größten positiven Effekten auf Bruttoproduktionswert und Bruttowertschöpfung führen würde. Ein Plus von nominal rund 36 Mrd. USD für das heimische BIP 2040 wäre die Folge.

Ein genauerer Blick auf die einzelnen Branchencluster und Sektoren zeigt aber, dass das Bild sehr differenziert ausfallen würde und es auf Branchenebene sowohl Gewinner als auch Verlierer gäbe.

So zeigt sich hinsichtlich Produktion als auch Wertschöpfung, dass die energieintensiven Industrien zu den Verlierern zählen würden und bis 2040 die Produktion um rund 20 Mrd. USD und je Wertschöpfung um rund 7,6 Mrd. USD, was im Szenariovergleich einem Minus von 11,3 Prozent entspricht, zurückgehen würden. Innerhalb des Branchenclusters der energieintensiven Industrien zeigt sich, dass

dieses Minus ausschließlich auf den Sektor Energie zurückgeführt werden kann. Auch für den Arbeitsmarkt wären hier die Effekte am stärksten ausgeprägt: Mit einem Minus von bis zu 16.000 Arbeitsplätzen – verglichen mit dem „BaU-Szenario“ – müsste hier gerechnet werden.

Mit weiteren 5,4 Mrd. USD Minus an Wertschöpfung wäre entlang der vorgelagerten Wertschöpfungskette (indirekte Effekte) zu rechnen, wobei rund 2,5 Mrd. USD in Bayern selbst, weitere 2,9 Mrd. USD in anderen Teilen Deutschlands wirksam würden.

Mit knapp 6,9 Mrd. USD mehr, das entspricht einem Plus von 3,0 Prozent, könnte bis 2040 in den Fokus-Branchen gerechnet werden, wobei die Sektoren Elektro mit einem Plus von 2,28 Mrd. USD, der Maschinenbau mit plus 1,50 Mrd. USD und die Nahrungsmittel mit einer knappen Mrd. USD am stärksten profitieren würden. Auch im Bereich der Fokus-Branchen müsste jedoch mit einem Beschäftigungsminus von rund 1.000 Arbeitsplätzen – im Vergleich mit dem „BaU-Szenario“ – gerechnet werden. Dies lässt sich im Wesentlichen durch Verschiebungen innerhalb des Branchenclusters von beschäftigungsintensiveren hin zu

Szenario 2

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

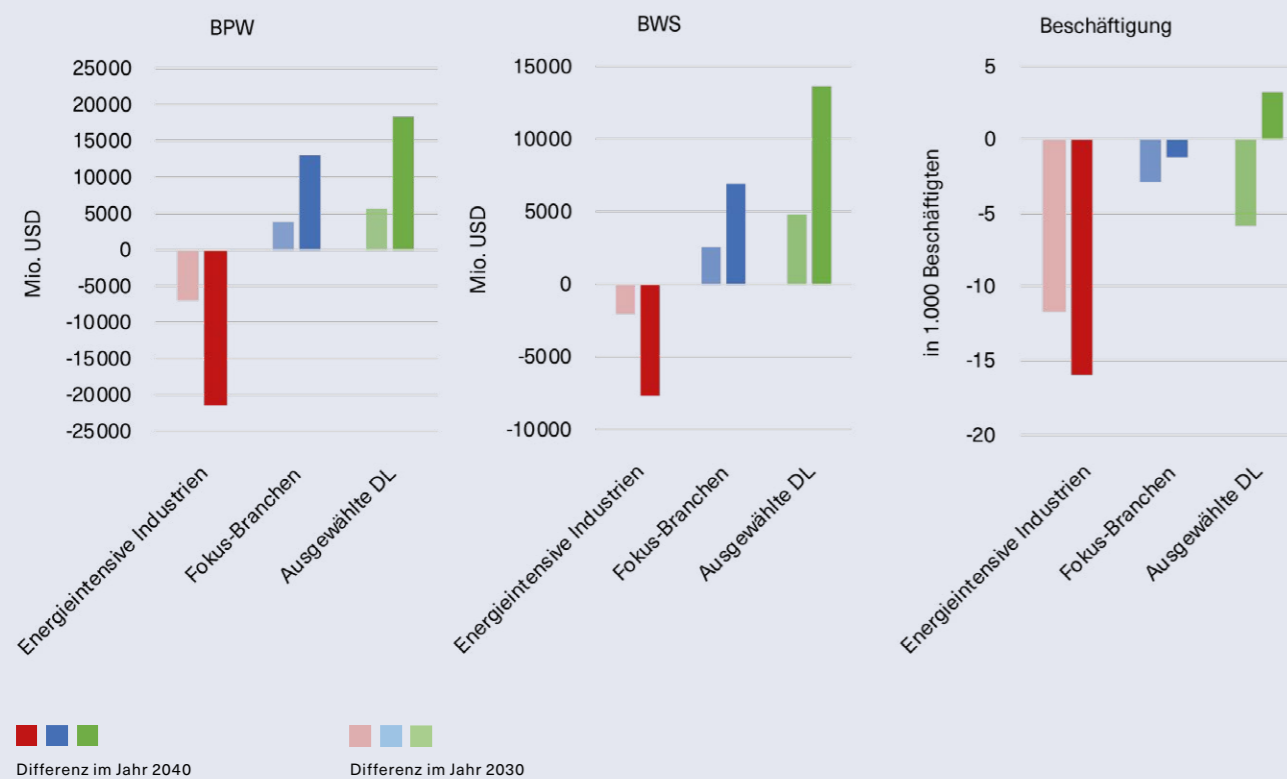
weniger beschäftigungsintensiven Sektoren, durch Effizienzsteigerungen und eine höhere Produktivität der Mitarbeiter (ausgedrückt in einer höheren Produktivität je Mitarbeiter) erklären. Zu berücksichtigen ist auch, dass es sich bei den für Output und Wertschöpfung ausgewiesenen Werten um Nominalwerte und nicht um Realwerte handelt, d.h. dass die Werte nicht preisbereinigt sind, sondern in laufenden Preisen ausgewiesen werden, sodass die absolute Differenz stärker ausfällt.

Berücksichtigt man auch bei den Fokus-Branchen die indirekten Wertschöpfungseffekte, so fällt der positive Effekt noch stärker aus. Zu einem Plus von 6,9 Mrd. USD im direkten Effekt kämen hier nochmals knapp 2,8 Mrd. USD in Bayern und 3,3 Mrd. USD in Restdeutschland in Form indirekter Wertschöpfungseffekte. Einen detaillierteren Ausblick liefert Abbildung 102.

Im Vergleich der Branchencluster würde der Bereich der ausgewählten Dienstleistungen am stärksten von einem Szenario „Einheitliches Vorgehen“ profitieren: Das Plus in der Produktion würde bei nominal knapp 18,5 Mrd. USD, bei der Wertschöpfung in Höhe von mehr als 13,6 Mrd. USD liegen. Alle angeführten Sektoren können profitieren, wobei der Effekt für das Gesundheitswesen (+3,42 Mrd. USD), den Transport (+2,55 Mrd. USD) und den Tourismus (+2,44 Mrd. USD) am stärksten ausfällt.

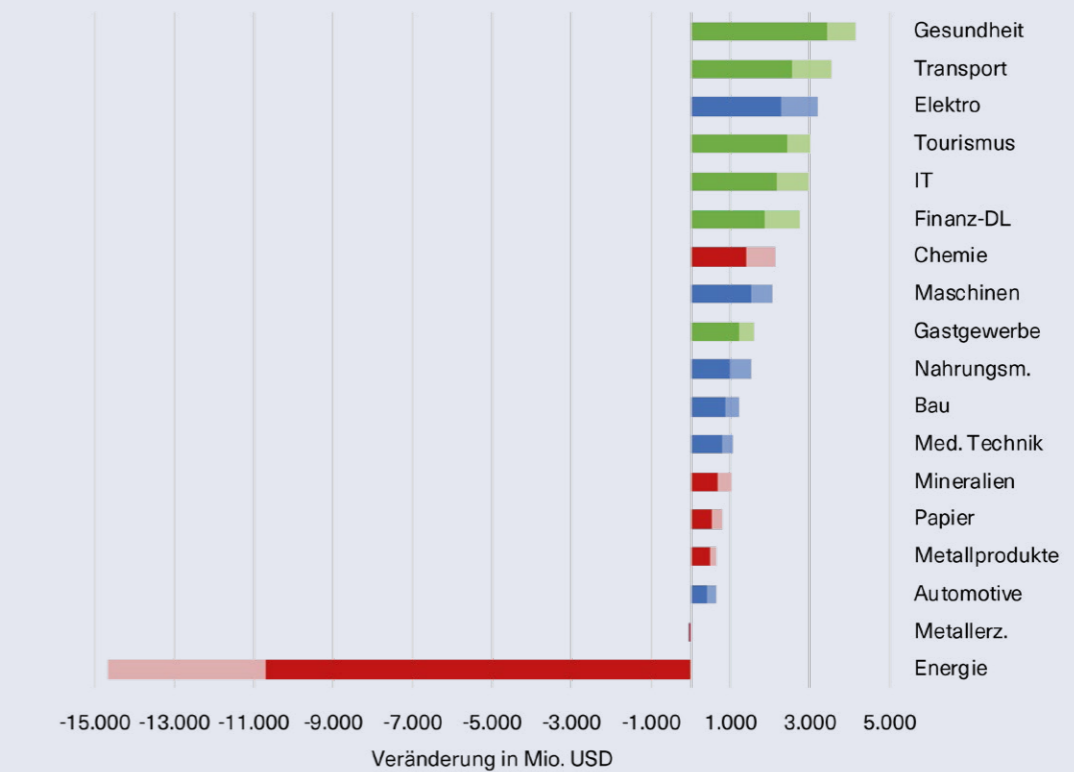
Auch für den Arbeitsmarkt würde sich ein Szenario „Einheitliches Vorgehen“ positiv auswirken: Rund 3.000 Arbeitsplätze mehr könnten hier in Bayern verzeichnet werden. Auch bei den ausgewählten Dienstleistungen würde das Wertschöpfungsplus im direkten Effekt zu einem Anstieg der Vorleistungen und damit zu einem positiven Effekt im indirekten Effekt führen: Insgesamt knapp 8,9 Mrd. USD wären deutschlandweit, davon 4,4 Mrd. USD in Bayern, zu verbuchen.

Abbildung 102  
Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD



Quelle: TwinEconomics

Abbildung 103  
Veränderungen der direkten und indirekten BWS in Bayern im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2040



Quelle: TwinEconomics

## Szenario 2

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

### Auswirkungen auf Emissionen entlang der Wertschöpfungsketten in Deutschland und in Bayern

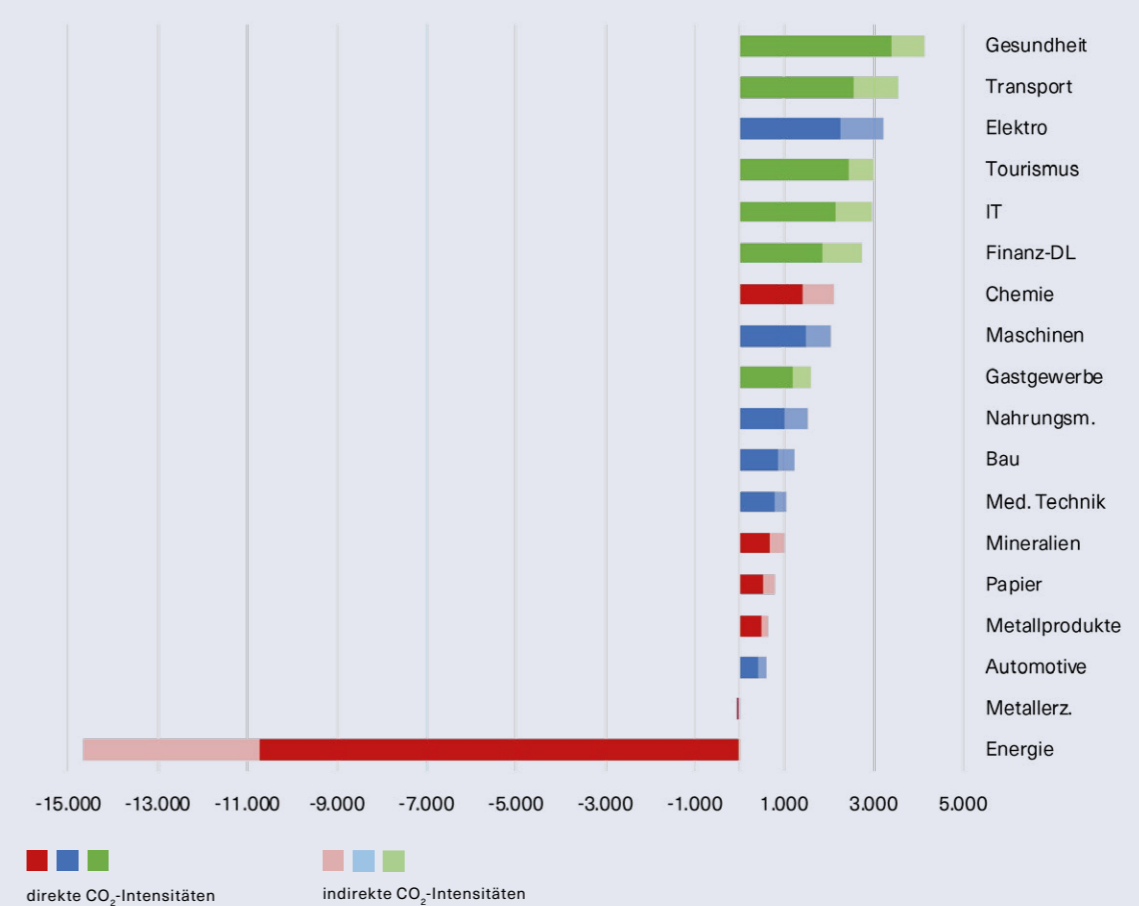
#### Effekte in Deutschland

Wie schon in der Analyse der direkten und indirekten Emissionseffekte im „BaU-Szenario“ werden nachfolgend die Abweichungen in den Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der CO<sub>2</sub>-Intensitäten zwischen dem „BaU-Szenario“ im Jahr 2030 und dem Szenario „Einheitliches Vorgehen“ im Jahr 2030 für die Branchencluster „energieintensive Industrien“, „Fokus-Industrien“ und „ausgewählte Dienstleistungen“ analysiert.

Die absolute CO<sub>2</sub>-Intensität sinkt im Branchencluster „Energieintensive Industrien“ in den Branchen „Energie“ (-225 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD), „Mineralien“ (-147 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) und „Metallerzeugung“ (-99 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 am stärksten. Die Rückgänge in diesen Branchen resultieren überwiegend aus Rückgängen bei den direkten CO<sub>2</sub>-Intensitäten. Dies ist zum einen auf die beträchtliche Durchdringung der nationalen Energiesysteme mit erneuerbaren Energien und zum anderen auf eine erhebliche Steigerung von Energieeffizienz und Elektrifizierung bei einem gleichzeitigen Rückgang des Primärenergieverbrauchs der Wirtschaft insgesamt zurückzuführen. Auch bei den Fokus-Industrien sinkt die CO<sub>2</sub>-Intensität insgesamt deutlich, aber weitaus weniger stark als bei den energieintensiven Industrien. Bei den Dienstleistungen ist der starke Rückgang im Transportsektor auf die starke Zunahme der Elektromobilität bei gleichzeitig starkem Rückgang des Einsatzes fossiler Energieträger zurückzuführen (Abbildung 104).

Sowohl bei den Fokus-Industrien als auch bei den ausgewählten Dienstleistungen vollzieht sich der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität ganz überwiegend im Bereich der Vorleistungsprodukte, also in den vorgelagerten Branchen der Wertschöpfungskette; die Vorleistungen weisen in den Fokus-Branchen und den ausgewählten Dienstleistungen im Jahr 2030 eine deutlich niedrigere CO<sub>2</sub>-Intensität auf als im „BaU-Szenario“. Der Rückgang der indirekten CO<sub>2</sub>-Intensität fällt sowohl bei den Fokus-Branchen als auch bei den Dienstleistungen um ein Vielfaches höher aus als der Rückgang der direkten CO<sub>2</sub>-Intensität. Dies liegt daran, dass in diesem Szenario auch bei wichtigen Handelspartnern der deutschen Wirtschaft erhebliche CO<sub>2</sub>-Minderungen erfolgen, die sich in einer geringeren CO<sub>2</sub>-Intensität bei der Produktion von Vorleistungsgütern niederschlagen. Die fortschreitende Dekarbonisierung der Wirtschaft durch drastischen Rückgang des Einsatzes fossiler Brennstoffe, die Elektrifizierung und die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen durchziehen im Jahr 2030 sämtliche Branchen weltweit, nicht nur in Deutschland.

Abbildung 104  
Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Tonnen CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output



Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Die nachfolgende Abbildung 105 gibt die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Intensitäten für die drei Branchencluster noch einmal gebündelt wieder.

Szenario 2

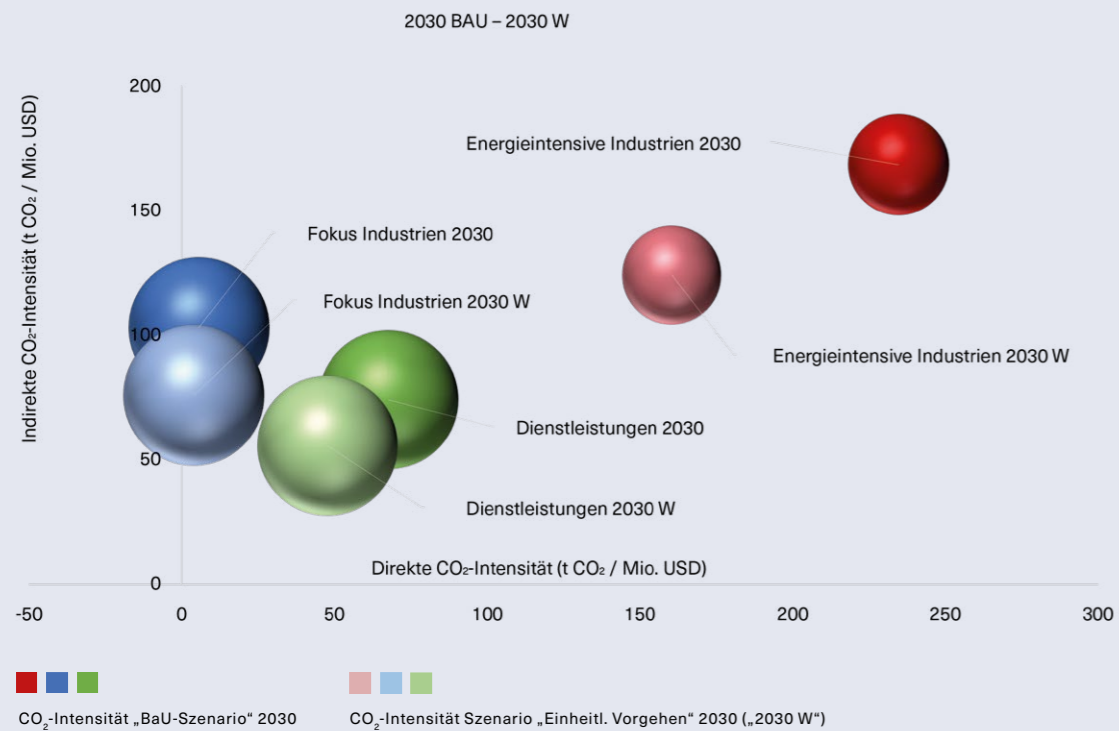
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Abbildung 105  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**

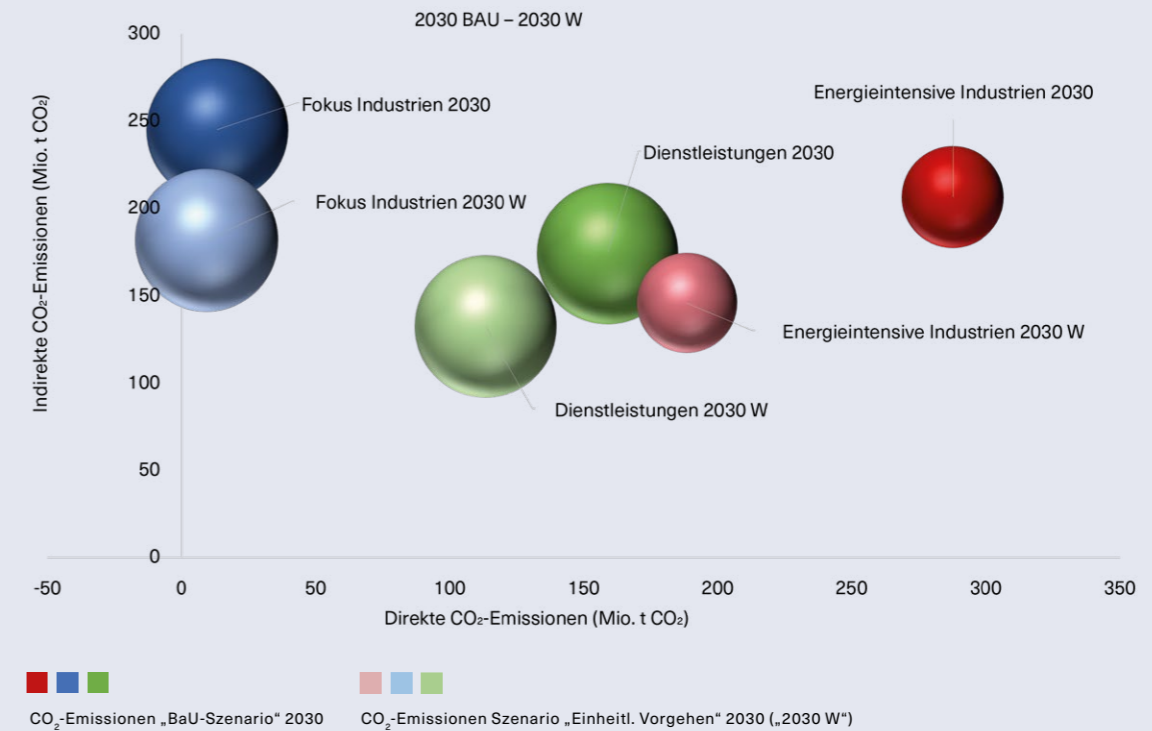


Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio. USD in 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Darüber hinaus ist der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 in den Branchen bzw. Branchenclustern auf einen absoluten Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen zurückzuführen und resultiert nicht allein aus einer gestiegenen Produktion. Denn auch die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken in den drei Branchenclustern gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 deutlich: bei den energieintensiven Industrien um 160 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, bei den Fokus-Industrien um 67 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> und bei den ausgewählten Dienstleistungen um 87 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, wie die nachfolgende Abbildung 106 sowie die Tabelle 14 und die Tabelle 15 zeigen. Die erheblichen Emissionsreduktionen gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 sind darauf zurückzuführen, dass bei einheitlichem Vorgehen nicht nur die direkten Emissionen in Deutschland in den einzelnen Branchenclustern deutlich sinken, sondern überall auf der Welt erhebliche CO<sub>2</sub>-Minderungsanstrengungen unternommen werden, was sich auch in einem deutlichen Rückgang der generierten indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Ausland zeigt.

Abbildung 106  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**



Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio. USD in 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Tabelle 14  
**Vergleich der CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**

	2030 „BaU“			2030 „Einheitliches Vorgehen“		
	gesamt	direkt	indirekt	gesamt	direkt	indirekt
<b>CO<sub>2</sub>-Intensitäten (t CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output)</b>						
Energieintensive Industrien	<b>403</b>	235	169	<b>285</b>	160	124
Fokus-Industrien	<b>109</b>	6	103	<b>80</b>	4	76
Ausgewählte Dienstleistungen	<b>142</b>	68	74	<b>103</b>	48	56

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

**Szenario 2**

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Tabelle 15  
Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“

2030		Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Ausgewählte Dienstleistungen
„BaU“	direkt	288	13	159
	indirekt	207	245	174
	davon Ausland	85	136	64
	<b>gesamt</b>	<b>494</b>	<b>258</b>	<b>333</b>
„Einheitliches Vorgehen“	direkt	189	9	113
	indirekt	146	182	132
	davon Ausland	61	100	50
	<b>gesamt</b>	<b>334</b>	<b>191</b>	<b>246</b>

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

**Effekte in Bayern**

Vergleicht man die Ergebnisse in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen Bayerns aus dem „BaU-Szenario“ mit jenen aus dem Szenario „Einheitliches Vorgehen“ (vergleiche hierzu auch Tabelle 16), so zeigt sich, dass bei einem einheitlichen Vorgehen in Sachen Klimaschutz in allen Branchenclustern eine deutliche Reduktion der Emissionen bewirkt werden kann. Im direkten Effekt beläuft sich das Minus – unabhängig davon, welchen Branchencluster man betrachtet – bereits auf rund 30 Prozent bis zum Jahr 2030.<sup>297</sup> Dieser Effekt erhöht sich nochmals deutlich, wenn man die Entwicklung bis 2040 vergleichend betrachtet: Minus 65,9 Prozent direkt bei den energieintensiven Industrien bedeutet in absoluten Zahlen den größten Rückgang in Höhe von 28 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>. Mit 15 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> in absoluten Zahlen zwar geringer, relativ betrachtet mit minus 74,9 Prozent aber noch stärker, fällt der Rückgang bei den ausgewählten Dienstleistungen aus. Auf ohnehin niedrigem Niveau in den direkten Effekten reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Fokus-Branchen um rund zwei Drittel.

Ähnlich verhält es sich, wenn man den gesamten CO<sub>2</sub>-Effekt genauer betrachtet. Dieser enthält zusätzlich zu den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die unmittelbar in der betrachteten Branche anfallen, auch all jene Emissionen, die bereits in den benötigten Vorleistungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette stecken, unabhängig davon, ob diese Vorleistungen aus dem Ausland importiert, außerhalb Bayerns oder in Bayern bezogen werden.

Auch hier belaufen sich die CO<sub>2</sub>-Einsparungen bis 2040, verglichen mit dem „Business as Usual“-Szenario, auf minus 64 Prozent bei den energieintensiven Industrien, auf minus 50,9 Prozent bei den Fokus-Branchen und minus 73,6 Prozent bei den ausgewählten Dienstleistungen.

Ein zusammenfassendes Schaubild nach Jahren und Branchenclustern liefert folgende Abbildung 107:

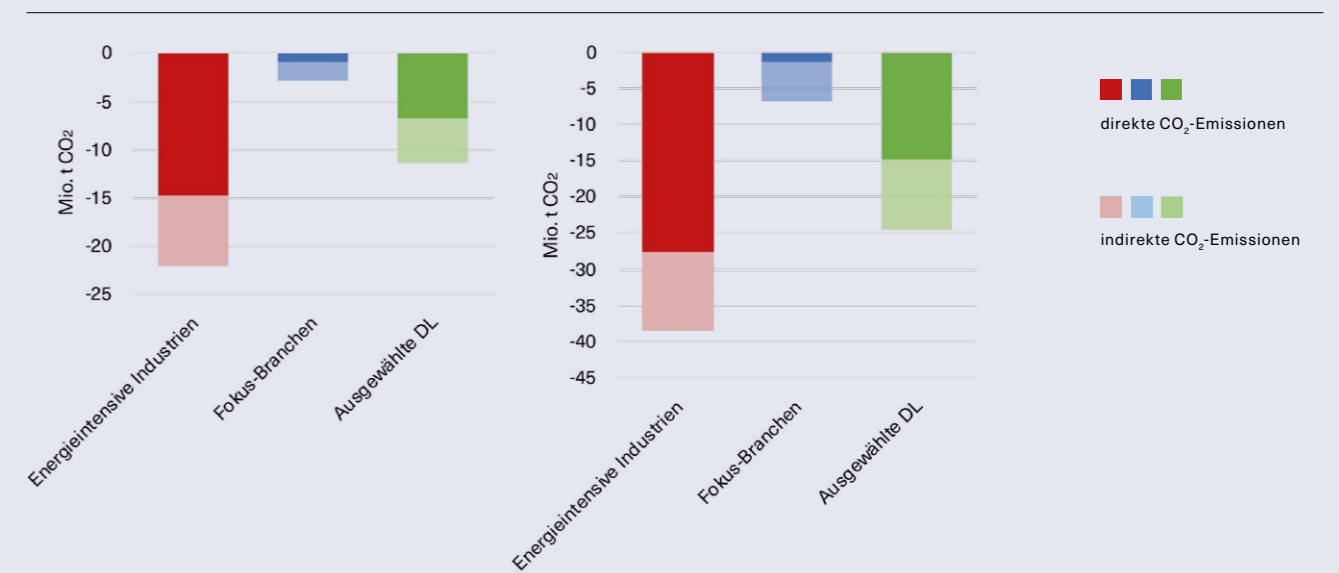
297 -28,7 % in den ausgewählten Dienstleistungen, -29,6 % in den Fokus-Branchen und -32,8 % bei den energieintensiven Industrien.

Tabelle 16  
Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (2030 und 2040); in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>

	Energieintensive Industrien		Fokus-Branchen		Ausgewählte Dienstleistungen		
	Business as Usual	Einheitliches Vorgehen	Business as Usual	Einheitliches Vorgehen	Business as Usual	Einheitliches Vorgehen	
2030	CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	45	30	3	2	24	17
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	9	10	8	13	8
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	35	19	7	5	8	6
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	49	27	25	20	12	8
	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>146</b>	<b>86</b>	<b>44</b>	<b>35</b>	<b>57</b>	<b>39</b>
2040	CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	42	14	3	1	20	5
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	6	10	5	14	4
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	37	13	7	4	9	2
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	53	20	27	14	14	4
	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>148</b>	<b>53</b>	<b>48</b>	<b>23</b>	<b>57</b>	<b>15</b>

Quelle: TwinEconomics

Abbildung 107  
Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ nach Branchenclustern (2030 und 2040)



Quelle: TwinEconomics

## Szenario 3

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Szenario 3 Europa geht voran

**Die weltweiten Emissionen steigen geringfügig an, die europäischen sinken deutlich. Deutschland und Europa profitieren leicht.**

Eine Zusammenfassung finden Sie auf S. 156

### Veränderungen im Energiesystem und bei den Emissionen

#### Veränderungen im Energiesystem: Primärenergieverbrauch

Der weltweite Primärenergieverbrauch steigt um ca. 25 Prozent, also deutlich weniger als das Wirtschaftswachstum (Abbildung 108). Weltweit dominieren 2040 in den Energiesystemen weiterhin fossile Energieträger, die durch einen, im Vergleich zu 2018, moderat ansteigenden Anteil erneuerbarer Energien ergänzt werden (+6 Prozentpunkte). Absolut gesehen erfahren die erneuerbaren Energien ein deutliches Wachstum von geringem Niveau aus: Die energetische Nutzung von Biomasse nimmt um ca. 35 Prozent zu, die sonstigen erneuerbaren Energien (vor allem Wasserkraft, Wind off- und onshore sowie Photovoltaik) werden insgesamt um ca. 71 Prozent zugebaut.

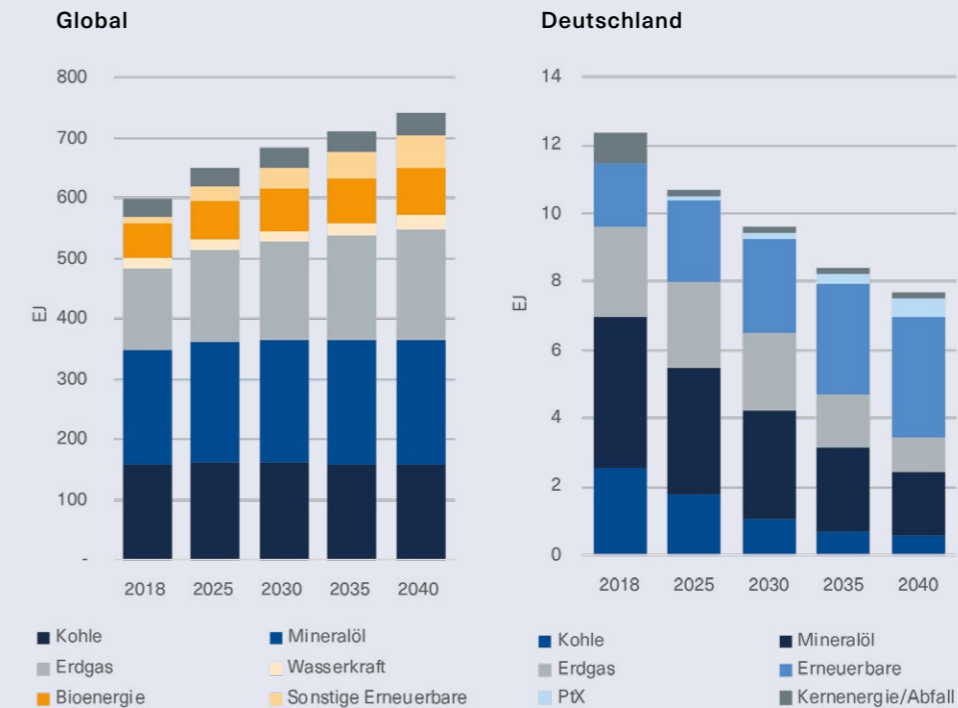
In Europa hingegen steigt der Anteil erneuerbarer Energien um 20 Prozentpunkte. In Deutschland sinkt der Primärenergieverbrauch bis 2040 um fast 40 Prozent gegenüber 2018. Bis 2050 sind keine fossilen Energieträger mehr im Mix, bis 2040 noch ca. 50 Prozent. Bei den Fossilen wird der Anteil der Kohle reduziert, was zusätzlich für Emissionsminderungen sorgt. Vor allem für den (Schwer-)Verkehr werden synthetische Treibstoffe importiert.

#### Veränderungen im Energiesystem: Stromerzeugung

Obwohl weltweit die Stromnachfrage stark wächst, geht der Anteil der Kohleverstromung im gesamten globalen Mix zurück, die Nutzung von Kohle als dem Energieträger mit den höchsten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bleibt zwischen 2018 und 2040 ungefähr konstant. Das bedeutet, dass neu gebaute Kohlekraftwerke erheblich effizienter sind als die alten, die aus dem Mix gehen, und ein erheblicher Teil an erneuerbaren Energien für die Stromerzeugung zugebaut wird. Die Nutzung von Kernkraft wächst um gut 25 Prozent, vor allem in China und Indien, macht aber weiterhin nur einen sehr geringen Anteil (ca. fünf Prozent) am Primärenergie-Mix aus.

In Deutschland sinkt der Anteil der Kohle an der Stromerzeugung bis 2040 dramatisch, im Jahr 2050 gibt es weder Kohle noch Gas im Strommix. Die Stromerzeugung erfolgt bis 2040 nahezu vollständig aus erneuerbaren Quellen, es bleiben lediglich geringe Anteile von Gas für Backup-Kapazitäten im Mix. 2050 werden diese Backup-Kapazitäten dann an sehr wenigen Stunden im Jahr mit synthetischem Gas betrieben, das mithilfe von Strom aus erneuerbaren Quellen synthetisiert wurde.

Abbildung 108  
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Europa geht voran“ in EJ



Quelle: WEO 2019, Eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Veränderung der Kosten für fossile Energieträger

In dem Szenario „Europa geht voran“ kommt es aufgrund der steigenden Energienachfrage zu einem Anstieg der Energiepreise gegenüber dem heutigen Niveau. Im Jahr 2040 liegen die Großhandelspreise für Rohöl mit 103 USD pro Barrel etwa 50 Prozent über dem Niveau von 2018. Aufgrund des geringeren Nachfrageanstiegs gegenüber dem Szenario 1 „Business as Usual“ liegen die Preise im Jahr 2040 jedoch rund 25 Prozent niedriger als in diesem Szenario. Die Preise für Erdgas und Steinkohle in Europa liegen aufgrund der stärker sinkenden Nachfrage nach fossilen Energieträgern in Europa um rund ein Viertel (Erdgas) bzw. ein Drittel (Steinkohle) niedriger als im Szenario 1 („BaU“).

#### Veränderungen bei Investitionen

Die weltweiten kumulierten Investitionen in die Energiesysteme bis 2040 liegen im Szenario „Europa geht voran“ rund vier Prozent höher als im Szenario „Business as Usual“. Der Anstieg ist vor allem auf höhere Investitionen in erneuerbare Energien (+163 Prozent) und Energieeffizienz (+130 Prozent) sowie das Stromsystem (+111 Prozent) zurückzuführen. Die kumulierten Investitionen in die Bereitstellung fossiler Energieträger liegen hingegen rund 20 Prozent niedriger als im „BaU-Szenario“. Die kumulierten Investitionen in Europa liegen aufgrund der verstärkten Klimapolitik jedoch fast 1,5-mal so hoch wie im „BaU-Szenario“. Im Gegenzug fallen die Investitionen für die Bereitstellung fossiler Energieträger in Europa rund 31 Prozent niedriger aus als im „Business as Usual“-Szenario. Die Investitionen und Einsparungen im Vergleich zur Referenz in Deutschland entsprechen denjenigen des Szenarios 2 „Einheitliches Vorgehen“, da hier das gleiche Szenario verwendet wurde.

## Szenario 3

Energiesystem

Technologien

Effekte

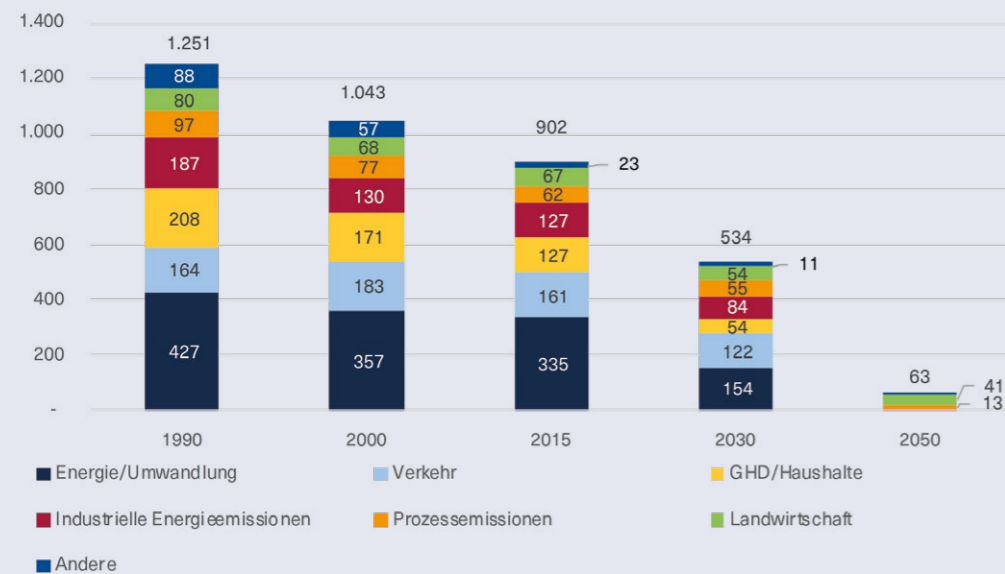
Auswirkungen

**Veränderungen bei den Treibhausgas-Emissionen**

In dem Szenario werden die Treibhausgas-Emissionen bis 2050 gegenüber 2018 auf globaler Ebene um etwa vier Prozent zunehmen und in Deutschland um fast 100 Prozent zurückgehen. Abbildung 109 zeigt die Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren in Deutschland.

Dies führt zu einer globalen Erwärmung um 2,8 Grad bis 3,2 Grad C bis 2100 gegenüber vorindustriellen Werten. Diese Veränderung liegt außerhalb des von der Klimaforschung als beherrschbar eingeschätzten Bereichs. Die Risiken unvorhergesehener Schäden und höherer Anpassungserfordernisse steigen. Grob eingeschätzt, werden somit ca. zwei bis drei Prozent des globalen BIP durch die Klimafolgen aufgezehrt (Teil II Kapitel 2.4.1).

Abbildung 109

**Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Szenario „Europa geht voran“**

Quelle: BDI, 2018, Eigene Darstellung Prognos, 2020

**Technologische Veränderungen**

Weltweit werden für die Stromerzeugung etwas mehr erneuerbare Kapazitäten zugebaut als Kohle- und Kernkraftwerke. Die neu gebauten Kohlekraftwerke sind hocheffizient. Mit dem stärkeren Zubau erneuerbarer Energien werden auch mehr höchsteffiziente und flexible Gaskraftwerke zugebaut, um die Stromsysteme entsprechend anpassungsfähig zu machen. Weltweit wird der Verkehr stärker elektrifiziert als im Szenario 1 „Business as Usual“, was zu einem um 15 Prozent reduzierten Einsatz von Erdölprodukten führt.

In Europa und Deutschland wird der Personenverkehr stark elektrifiziert – mit geringen Anteilen an Wasserstoffantrieben und synthetischen Energieträgern. Bei Verbrennungsmotoren sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr wird die Effizienz weiterhin

gesteigert. Im Personenverkehr spielen effiziente Verbrennungsmotoren noch ca. für eine Fahrzeuggeneration eine Rolle als Übergangstechnologie. In der MENA-Region (Nahe Osten und Nordafrika) werden erste Kapazitäten für die Produktion synthetischer flüssiger Energieträger aufgebaut, die in Europa für die Nutzung im Schwer- und im Flugverkehr abgenommen werden. In Europa, insbesondere in Deutschland, werden in allen Nachfragesektoren verstärkte Effizienzstrategien umgesetzt.

In Europa wird CCS konsequent eingesetzt, insbesondere in den energieintensiven rohstoffnahen Industrien, z.T. auch zur Reduktion von Prozessemissionen. In Deutschland wird CCS konsequent in der Stahlindustrie, der Grundstoffchemie, der Abfallverbrennung und den verbleibenden Raffinerien sowie zur Reduktion der Prozessemissionen der Zementproduktion eingesetzt. Anteile des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> werden wieder als Rohstoff eingesetzt, vor allem in der Chemieindustrie. Dies ist bezüglich der Emissionsbilanz besonders dann günstig, wenn das CO<sub>2</sub> aus Biomassefeuerungen abgeschieden wurde.

Weltweit wird CCS in einigen Ländern und großen emissionsintensiven Anlagen eingesetzt, jedoch nicht konsequent überall umgesetzt.

In Deutschland und Europa wird die Produktion von Prozesswärme in der Industrie zunehmend durch feste Biomassen und Biogas bereitgestellt. Im Gebäudesektor wird der Bestand in Deutschland durch eine starke Erhöhung der Sanierungsrate bis 2050 (von 1,1 Prozent jährlich im Szenario 1 auf 1,9 Prozent p.a. in den Szenarien 2 und 3) praktisch „durchsaniert“ und auf energetisch sehr effiziente Niveaus gebracht. Diese sind die Grundlage für eine durchgängige Versorgung mit erneuerbarer Energie, vor allem mit Wärmepumpen. In verdichteten Gebieten wird die Anschlussdichte von Fern- und Nahwärmenetzen erhöht, die mit erneuerbaren Energien oder Abwärme versorgt werden sowie über Power-to-Heat zum effizienten Betrieb des Stromsystems beitragen.

In (Gesamt-)Europa wird insgesamt vor allem ein effizienterer Neubaustandard umgesetzt und der Energieträgermix emissionsärmer gemacht.

In Deutschland werden die Emissionen in der Landwirtschaft durch verstärktes Düngermanagement, durch methanreduzierende Futterzusätze für Wiederkäuer sowie durch eine Verringerung des Viehbestandes reduziert. Es ist denkbar, dass diese mit einem verstärkten Konsum und entsprechend aufgebauter Produktion von Fleischersatzprodukten korrespondiert. Der World Energy Outlook betrachtet lediglich die weltweiten Energiesysteme und macht daher keine Aussagen zur Abfallverbrennung und zur Landwirtschaft weltweit und somit auch in Europa.



## Szenario 3

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Effekte bei Handel, Branchenstruktur, Beschäftigung und BIP

Im Szenario „Europa geht voran“ ist unterstellt, dass die EU Klimaschutz ebenso ambitioniert verfolgt wie im Szenario „Einheitliches Vorgehen“. Der Rest der Welt bleibt dagegen weitgehend bei seinen derzeitigen geringen Klimaschutzambitionen. Konkret orientieren sich die Vorgaben für den Rest der Welt am „Stated Policies Scenario“ der IEA (2019), das leicht ambitionierter ist als das „Current Policies Scenario“, das Basis für das „BaU-Szenario“ ist. Für die EU bedeutet dies einen CO<sub>2</sub>-Preis von 100 USD pro Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2030 und geringe CO<sub>2</sub>-Preise in einigen Ländern wie China und Südafrika, die bereits eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung umgesetzt oder sich diese fest vorgenommen haben. In den meisten Ländern wie etwa den USA und Japan werden nur geringe zusätzliche Klimaschutzanstrengungen wie ein Ausbau von Photovoltaik in sonnigen Regionen unternommen, die sich auch einzelwirtschaftlich rechnen.

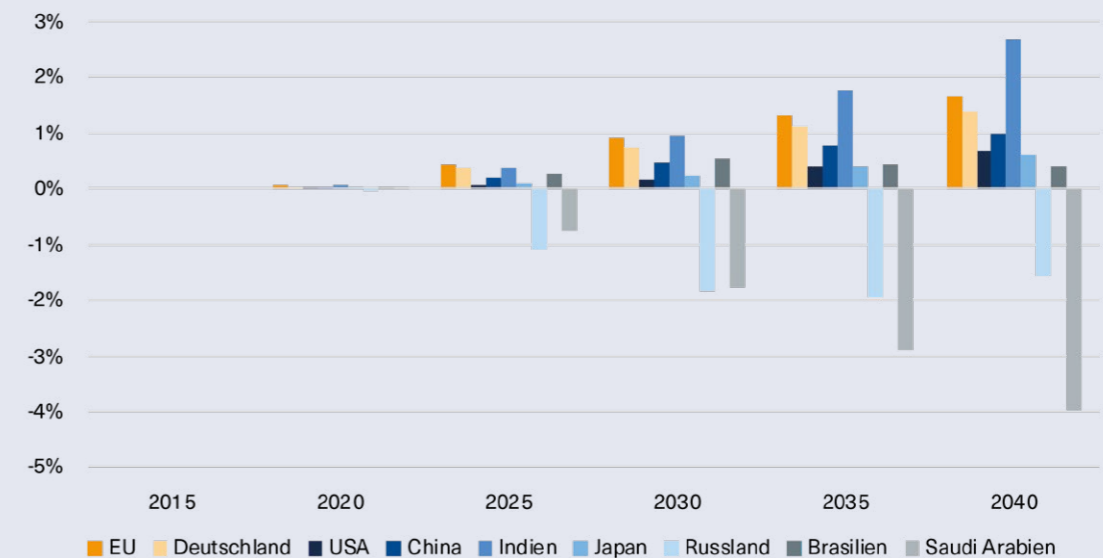
Wichtig für das Verständnis der Unterschiede zum Szenario „Einheitliches Vorgehen“ sind die Annahmen zur Ausgestaltung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung für die energieintensiven Industrien in der EU. Es wird angenommen, dass 50 Prozent der Zertifikate im Jahr 2030 versteigert werden, der Rest wird den Emittenten kostenlos zugeteilt. Die EU schützt über die Carbon Leakage Liste Branchen, die CO<sub>2</sub>-intensiv produzieren und zugleich im internationalen Wettbewerb stehen. Ihre Emissionszertifikate werden bis zu einem bestimmten Benchmark zu 100 Prozent kostenfrei zugeteilt. Im Fall eines EU-Alleingangs ist zu erwarten, dass entsprechende Mechanismen im Jahr 2030 weiter in Kraft sein werden, die Annahmen sind also eher konservativ. Auch dieses geänderte Szenario wird mit dem Modell GINFORS-E quantifiziert. Im Folgenden werden die Abweichungen zur Entwicklung im „BaU“ betrachtet. Sie können auf die Klimaschutzmaßnahmen, d. h. die Treibhausgas-Minderungen, die CO<sub>2</sub>-Preise und die zusätzlichen Investitionen zurückgeführt werden. Alle übrigen Annahmen und die Modellzusammenhänge bleiben gegenüber dem „BaU-Szenario“ unverändert.

## Entwicklung international

Außerhalb Europas entwickelt sich das BIP im Vergleich zum „BaU-Szenario“ leicht positiv. Die Länder realisieren einerseits einige der „low hanging fruits“ des Klimaschutzes und haben gegenüber der EU bei CO<sub>2</sub>-intensiven Produkten leichte Kostenvorteile. Ausnahmen sind die Energieförderländer wie Russland und Saudi-Arabien, die weniger ihrer Produkte absetzen können. Da Europa allerdings nur für einen kleinen Teil der globalen Energienachfrage steht, der in diesem Szenario bis 2030 noch weiter zurückgehen wird, bleiben die negativen Wirkungen für die Energieförderländer begrenzt.

Für Deutschland und die EU insgesamt ergeben sich leicht positive Effekte eines – wie oben kurz dargestellt - abgefederten Alleingangs sowohl im Vergleich zu einem deutschen Alleingang als auch im Vergleich zum „BaU-Szenario“. CO<sub>2</sub>-intensive Branchen in der EU haben zusätzliche Kosten für den Klimaschutz. Zugleich sinken aber auch die Energiekosten und andere Branchen können von den Änderungen der relativen Preise und den zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen profitieren. Im Detail wird dies unten am deutschen Beispiel verdeutlicht (Abbildung 110).

Abbildung 110  
BIP im internationalen Vergleich – Abweichungen im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“



Quelle: GWS, 2020

## Direkte Effekte in Deutschland

Für Deutschland bedeutet dies, dass das BIP im Jahr 2040 knapp 1,4 Prozent höher liegt als im „BaU“. Insbesondere der private Konsum und die zusätzlichen Investitionen in Klimaschutz treiben das BIP an. Im Außenhandel sind einerseits die Importe fossiler Energieträger zunächst etwas rückläufig, während die Exporte leicht zulegen. Einerseits gibt es in Europa zusätzliche Nachfrage nach Klimaschutzgütern, andererseits verliert die EU leicht an Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Regionen. Der Effekt wird durch die Schutzmaßnahmen für CO<sub>2</sub>-intensive Industrien begrenzt.

Dies wird auf der Branchenebene deutlich, wo lediglich in der Energieversorgung, bei Mineralien, in der Metallherzeugung und im Transportsektor die Güterpreise etwas mehr steigen. Mit Ausnahme der Energieversorgung bleiben die Effekte bei der Wertschöpfung aber sehr begrenzt. Andere Bereiche wie die Papier- und die Chemische Industrie, die Elektrotechnik sowie viele Dienstleistungen können sogar etwas profitieren (Abbildung 111).

## Szenario 3

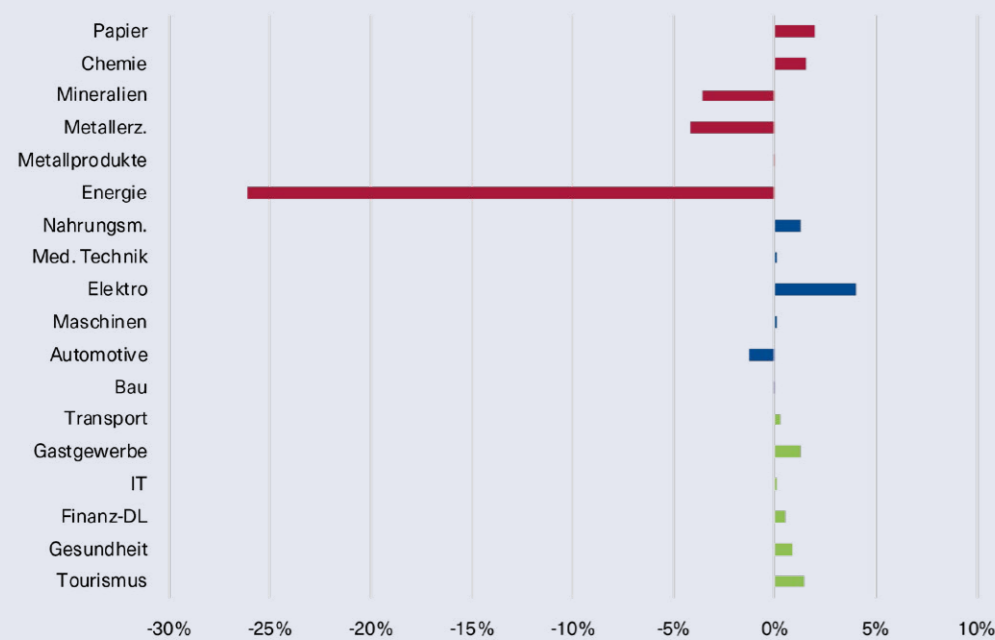
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Abbildung 111  
Abweichungen im Szenario "Europa geht voran" gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – reale Bruttowertschöpfung (2030)



Quelle: GWS, 2020

Die Beschäftigungseffekte sind wiederum, mit Ausnahme der Energieversorgung, klein. Geringen prozentualen Zunahmen bei Dienstleistungen und der Elektrotechnik stehen leichte Rückgänge bei den meisten betrachteten Fokus-Branchen gegenüber.

Auch in den Szenarien mit geringer Erwärmung kommen deutliche Kosten auf die Volkswirtschaften global, in Europa, in Deutschland und in Bayern zu. Global beschreibt das IPCC die volkswirtschaftlichen Schäden in einer sich auf 2 Grad C erwärmenden Welt wie folgt: „Für die meisten Wirtschaftssektoren werden Folgen durch Einflussfaktoren wie Veränderungen von Bevölkerung, Altersstruktur, Einkommen, Technologie, relativen Preisen, Lebensstil, Regulierungen und Regierungsführung projiziert, die im Verhältnis zu den Folgen des Klimawandels groß sind (...). Es wird erwartet, dass der Klimawandel den Energiebedarf für Heizung verringern und den Energiebedarf für Kühlung in den Wohn- und Gewerbesektoren erhöhen wird (...). Es wird projiziert, dass häufigere und/oder schwerere Extremwetterereignisse und / oder Gefährdungsarten Verluste und Verlustschwankungen in vielen Regionen erhöhen. Versicherungssysteme werden vor der Herausforderung stehen, bezahlbaren Versicherungsschutz anzubieten und gleichzeitig mehr risikobasiertes Kapital aufzubringen (...). Globale wirtschaftliche Folgen des Klimawandels lassen sich nur schwer abschätzen. Verfügbare Schätzungen aus den vergangenen 20 Jahren über die wirtschaftlichen Folgen berücksichtigen unterschiedliche Teilmengen an Wirtschaftssektoren und hängen von einer Vielzahl von Annahmen ab, von denen viele strittig sind. Unter Berücksichtigung dieser anerkannten Einschränkungen betragen die unvollständigen Schätzungen der jährlichen globalen wirtschaftlichen Verluste bei einem zusätzlichen Temperaturanstieg von etwa 2 Grad C zwischen 0,2 und 2,0 Prozent des Einkommens ( $\pm 1$  Standardabweichung um das Mittel) (...). Für Europa ergeben sich aus der

Forschungsreihe PESETA je nach Region volkswirtschaftliche Verluste in Höhe von 1,4 Prozent in einem 3-Grad-C-Erwärmungsszenario.<sup>298</sup>

Für Deutschland wurden die Effekte in Vorhaben für das UBA quantifiziert. Gesamtwirtschaftliche Effekte werden für eine Zunahme von Extremwetterereignissen quantifiziert (Lehr et al. 2020), die am ehesten einer 2 Grad C Welt entspricht. Hier liegen die Schäden bei 0,15 Prozent des BIP. Dabei gilt es zu beachten, dass Extremwetterereignisse lokal und temporär oftmals große Wucht und Schäden entfalten, die sich im Verlust an BIP im Jahresablauf nur unzureichend widerspiegeln. Am stärksten betroffen sind das Transportwesen, Industriebranchen, die auf Rohstoffzulieferungen angewiesen sind, wie etwa die Chemie und die Energieversorgung, wenn Leitungen betroffen sind. Die jeweiligen Schäden bleiben bundesweit und über das jeweilige Jahr verteilt aber deutlich unter einem Prozent, nehmen jedoch im Zeitverlauf ohne Anpassung deutlich zu. Für Bayern zeigt sich in Untersuchungen des UBA<sup>299</sup>, dass „ohne strikte Klimaschutzmaßnahmen 50 Prozent der Klimaprojektionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 einen Temperaturanstieg von +1,1 Grad C in der nahen Zukunft (2021–2050) aufweisen und von +3,1 Grad C in der fernen Zukunft (2071–2100). Der natürliche Schwankungsbereich der Temperatur Bayerns liegt bei etwa  $\pm 0,3$  Grad C, weshalb sowohl der zwischen 1931 und 2015 beobachtete mittlere Temperaturtrend von +1.3 Grad C als auch die noch erwarteten Klimaänderungen ein sehr deutliches Klimaänderungssignal darstellen. Die zukünftige Entwicklung weiterer Klimagrößen, wie des Niederschlags, ist hingegen mit größeren Unsicherheiten behaftet.“<sup>300</sup>

Um die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels in einer so exportorientierten Volkswirtschaft wie Deutschland vollständig abzuschätzen, müssen darüber hinaus Effekte für unsere wichtigsten Zuliefer- und Absatzmärkte berücksichtigt werden. Die Studie Peter et al. (2020) schätzt diese Effekte bis 2065 auf minus 0,2 Prozent des BIP.<sup>301</sup>

#### Entwicklungslinien der ökonomischen Effekte in der Wertschöpfungskette in Deutschland und in Bayern

##### Deutschland

Nachfolgend werden für das Szenario „Europa geht voran“ die Wertschöpfungseffekte im Jahr 2030 untersucht, die, ausgehend von einzelnen Branchen in vorgelagerten Bereichen der Wertschöpfungskette, angestoßen werden; die Ergebnisse werden dem Szenario „Business as Usual“ (BaU) für das Jahr 2030 gegenübergestellt. Die Betrachtung beschränkt sich auch hier auf indirekte Effekte in deutschen Vorleistungsbranchen.

Abbildung 112 zeigt die absolute Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem „BaU-Szenario“ für ausgewählte Branchen in Deutschland. Tendenziell sind ähnliche Effekte wie im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ zu beobachten, allerdings fallen sie in den meisten der betrachteten Branchen etwas schwächer aus als bei Annahme eines weltweit einheitlichen Vorgehens. Insgesamt ist ein branchenübergreifender BWS-Anstieg zu beobachten, von dem nahezu alle Branchen profitieren. Die Dienstleistungsbranchen „Gesundheit“ (+7.169 Mio. USD), „Transport“ (+6.324 Mio. USD) und „Tourismus“ (+5.105 Mio. USD) verzeichnen die größten Zuwächse. Innerhalb der Fokus-Branchen sticht die Elektroindustrie (+4.200 Mio. USD) besonders hervor. Im Gegensatz zum Dienstleistungsbereich spielen in den Fokus-Branchen auch indirekte BWS-Zuwächse eine bedeutende Rolle. Dies gilt vor allem für die Automobilindustrie. Die energieintensiven Industrien können ihre BWS – mit Ausnahme der Chemieindustrie – nur geringfügig steigern; in der Metallherzeugung und im Energiesektor nimmt die BWS analog zum Szenario „Einheitliches Vorgehen“ ab; hier fällt der Rückgang sogar noch höher aus, was vor allem auf die in diesen Branchen im Szenario „Europa geht voran“ anfallenden zusätzlichen Kosten für den Klimaschutz zurückzuführen ist.

<sup>298</sup> Feyen et al., 2020.

<sup>299</sup> UBA, 2020g.

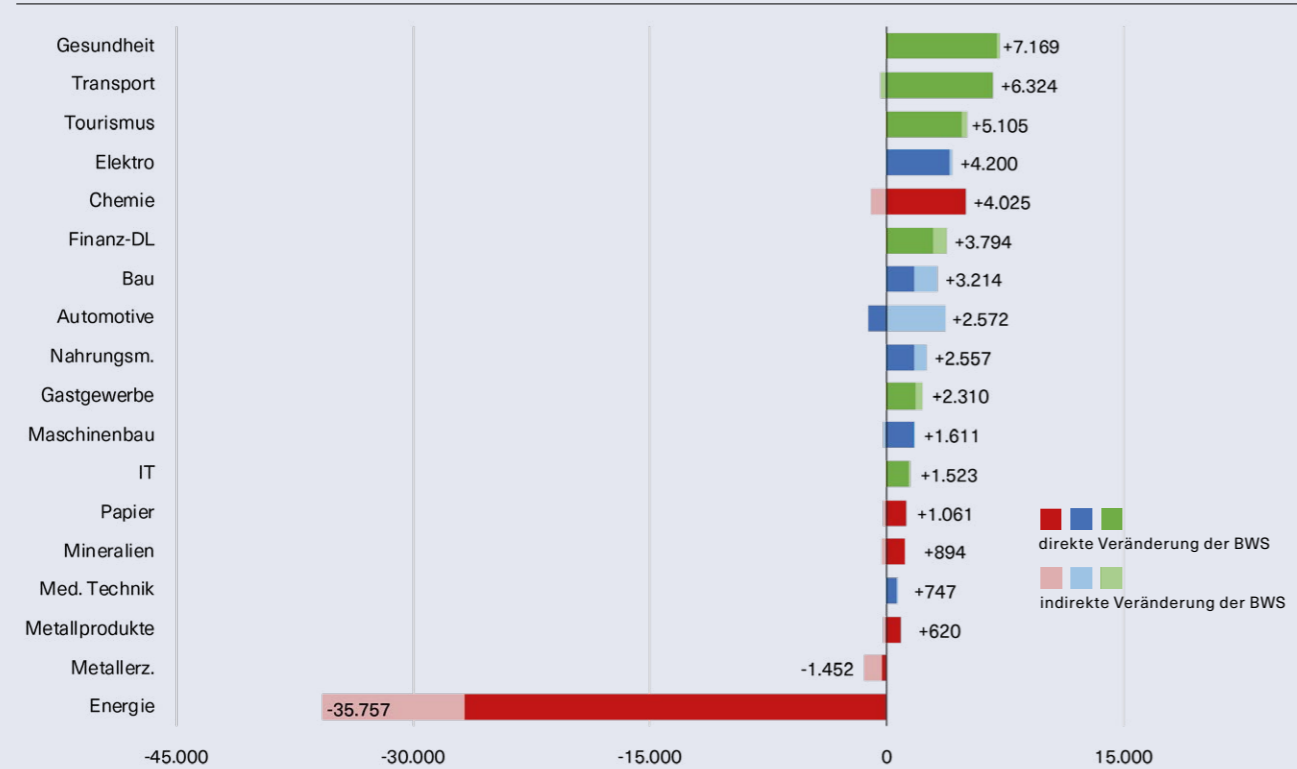
<sup>300</sup> StMUV, 2017a.

<sup>301</sup> Peter et al., 2020.

Szenario 3

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 112  
Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD



Hinweis: Die ausgewiesenen Werte entsprechen jeweils der Gesamtveränderung gegenüber dem „BaU-Szenario“ (2030), d. h. der Summe aus direkter und indirekter Veränderung der BWS.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

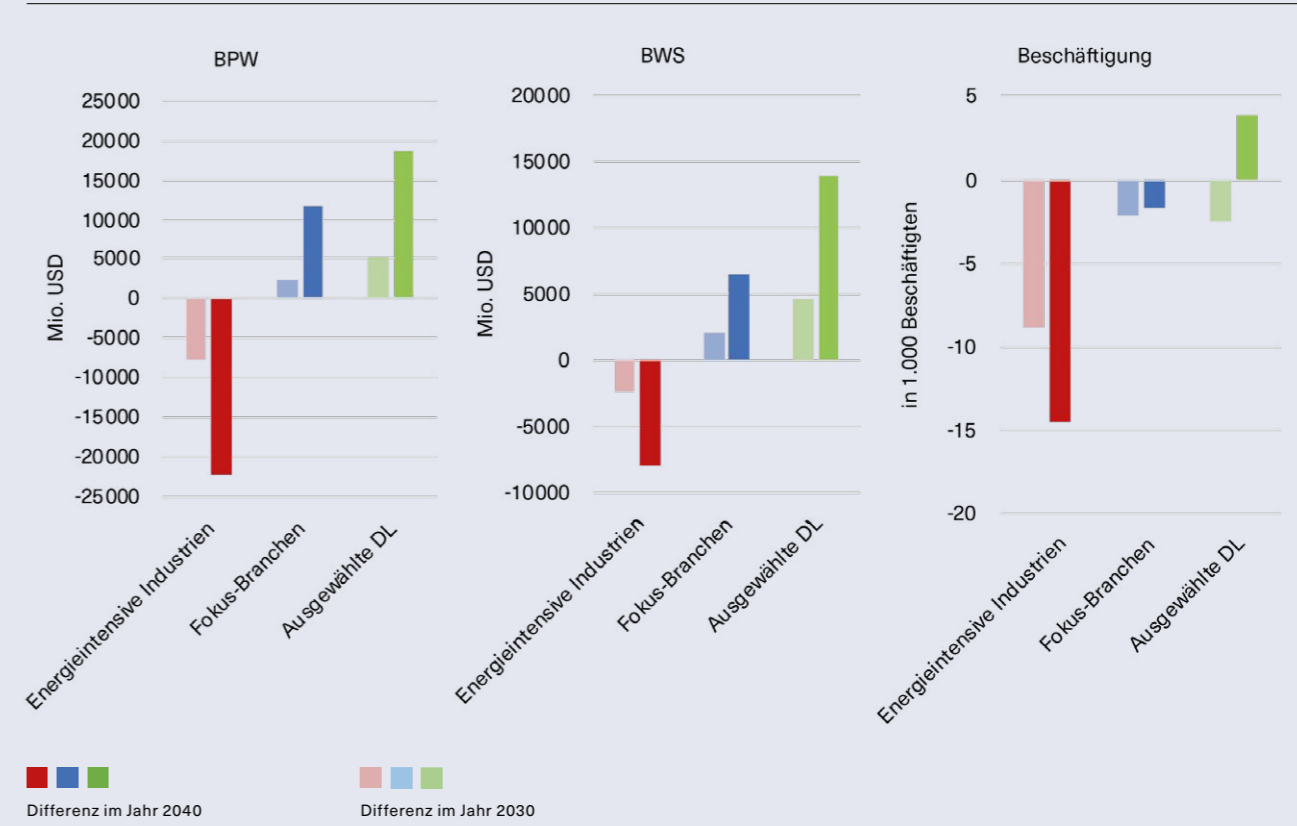
Bayern

Auch für das Szenario „Europa geht voran“ können die, auf die gesetzten Maßnahmen rückführbaren, Effekte auf Produktion, Wertschöpfung und Beschäftigung durch einen Vergleich mit dem „Business as Usual“-Szenario abgeleitet werden.

Demnach würde ein europaweit „Einheitliches Vorgehen“ im Klimaschutz für Bayern zwar zu deutlich besseren Effekten im Vergleich zum „Business as Usual“-Szenario führen, wesentlich andere Effekte als bei einem international akkordierten Vorgehen wären allerdings nicht zu erwarten. Demnach würde sich die Produktion – wiederum nominal betrachtet – um 32,6 Mrd. USD, die Wertschöpfung um 36,3 Mio. USD erhöhen.

Analog zum Szenario „Einheitliches Vorgehen“ lässt sich auch in der Europa-Variante des Klimaschutzes ein starker negativer Effekt auf die energieintensiven Industrien ableiten, welcher mit einem Minus von 7,98 Mio. USD Wertschöpfung sogar noch stärker ausfällt als im Szenario „Einheitliches Vorgehen“. Nahezu unverändert präsentieren sich die Fokus-Branchen (6,57 Mio. USD plus im europaweiten Vorgehen verglichen mit 6,88 Mio. USD plus im Szenario „Einheitliches Vorgehen“) und die ausgewählten Dienstleistungen (14,0 Mio. USD in der Europa-Variante verglichen mit 13,62 Mio. USD in der weltweiten Variante). Auch unter Berücksichtigung der Effekte aus der vorgelagerten Wertschöpfungskette (indirekte Effekte) kommt es zu keinen nennenswert abweichenden Effekten auf Wertschöpfung und Beschäftigung, verglichen mit den Ergebnissen für Szenario 2.

Abbildung 113  
Veränderungen von BPW, BWS und Beschäftigung in Bayern im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (2030 und 2040)



Quelle: TwinEconomics

Etwas geringer als im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ fällt der negative Beschäftigungseffekt aus. Insgesamt wären bis 2040 11.000 Arbeitsplätze in Bayern bedroht, wobei fast alle dieser Arbeitsplätze der Energieversorgung zuzuschreiben sind. Eine positive Entwicklung könnte sich langfristig bei den ausgewählten Dienstleistungen abzeichnen.

Einen Überblick über die Veränderungen in der gesamten Bruttowertschöpfung, d. h. der Summe aus direkter und indirekter Wertschöpfung, bis 2040 liefert Abbildung 114. Verglichen mit den Effekten aus dem Szenario „Einheitliches Vorgehen“ sind hier aber nur marginale Änderungen auszumachen.

## Szenario 3

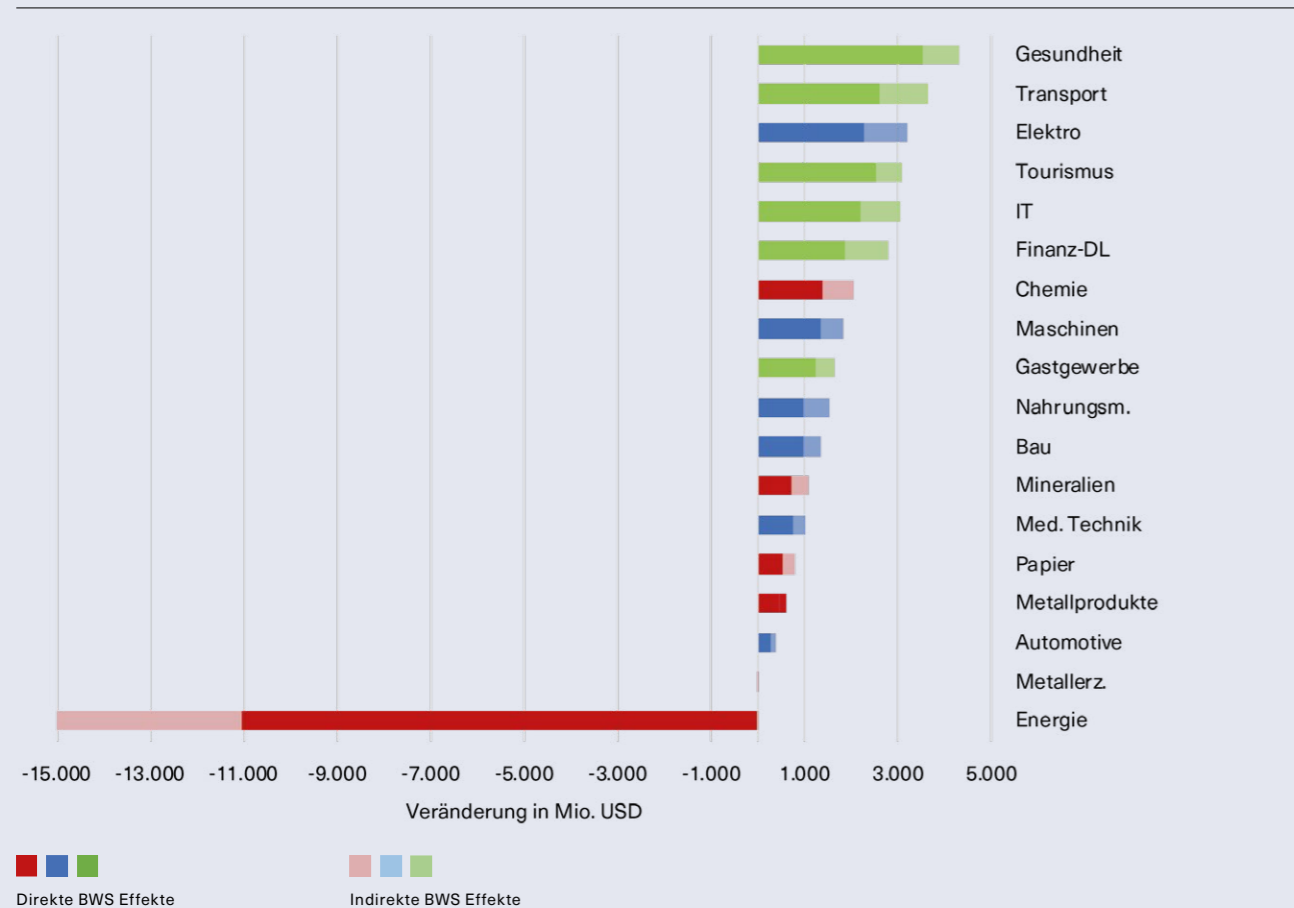
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Abbildung 114  
**Veränderungen der direkten und indirekten BWS in Bayern im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2040, in Mio. USD, nominal**



Quelle: TwinEconomics

### Auswirkungen auf Emissionen entlang der Wertschöpfungsketten in Deutschland und in Bayern

#### Effekte in Deutschland

Nachfolgend werden die direkten und indirekten Emissionseffekte im Szenario „Europa geht voran“ im Vergleich zum „BaU-Szenario“ 2030 vorgestellt.

Die CO<sub>2</sub>-Intensität sinkt im Branchencluster „Energieintensive Industrien“ in den Branchen Energie und Mineralien am stärksten. Bei den Fokus-Industrien ist dies in den Bereichen Nahrung, Maschinenbau und Elektro der Fall, bei ausgewählten Dienstleistungen im Transportsektor. Der Grund hierfür liegt in den diesem Szenario zugrunde liegenden ambitionierten Ziel der Herbeiführung der Klimaneutralität in der EU-Mitgliedstaaten bis zum Jahr 2050.

Abbildung 114 verdeutlicht, dass bei den energieintensiven Branchen der Rückgang im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 sowohl in der Energiewirtschaft (-266 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) und der Herstellung mineralischer Erzeugnisse (-115 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) vor allem durch den Rückgang bei der direkten CO<sub>2</sub>-Intensität bewirkt wird (-218 bzw. -75 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD). Die Rückgänge bei den direkten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in diesen Branchen resultieren überwiegend aus dem sinkenden Primärenergieverbrauch und dem starken Rückgang des Einsatzes fossiler Energieträger.

Auch die Fokus-Industrien produzieren weniger CO<sub>2</sub>-intensiv, vor allem in den Bereichen Elektro, Nahrungsmittel und Maschinenbau; im Dienstleistungssektor resultiert der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität vor allem auch aus der starken Elektrifizierung des Transportsektors. Ansonsten vollzieht sich der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität in den Fokus-Branchen und den ausgewählten Dienstleistungen vor allem bei den Vorleistungsprodukten bzw. Dienstleistungen in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen. Die Branchen partizipieren sehr stark von den Minderungsanstrengungen in den übrigen Branchen in Deutschland. Dies zeigt sich in Tabelle 14: Die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Ausland – also außerhalb Deutschlands – sinken in den jeweiligen Branchenclustern gegenüber dem „BaU-Szenario“ deutlich weniger stark als die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt; der Rückgang bei den nationalen indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 ist in den jeweiligen Clustern teilweise sogar doppelt so hoch wie bei den indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Ausland (außerhalb Deutschlands).<sup>302</sup> Im Vergleich dazu waren im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ 2030 die Rückgänge bei den indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Inland und dem Ausland noch annähernd gleich groß.

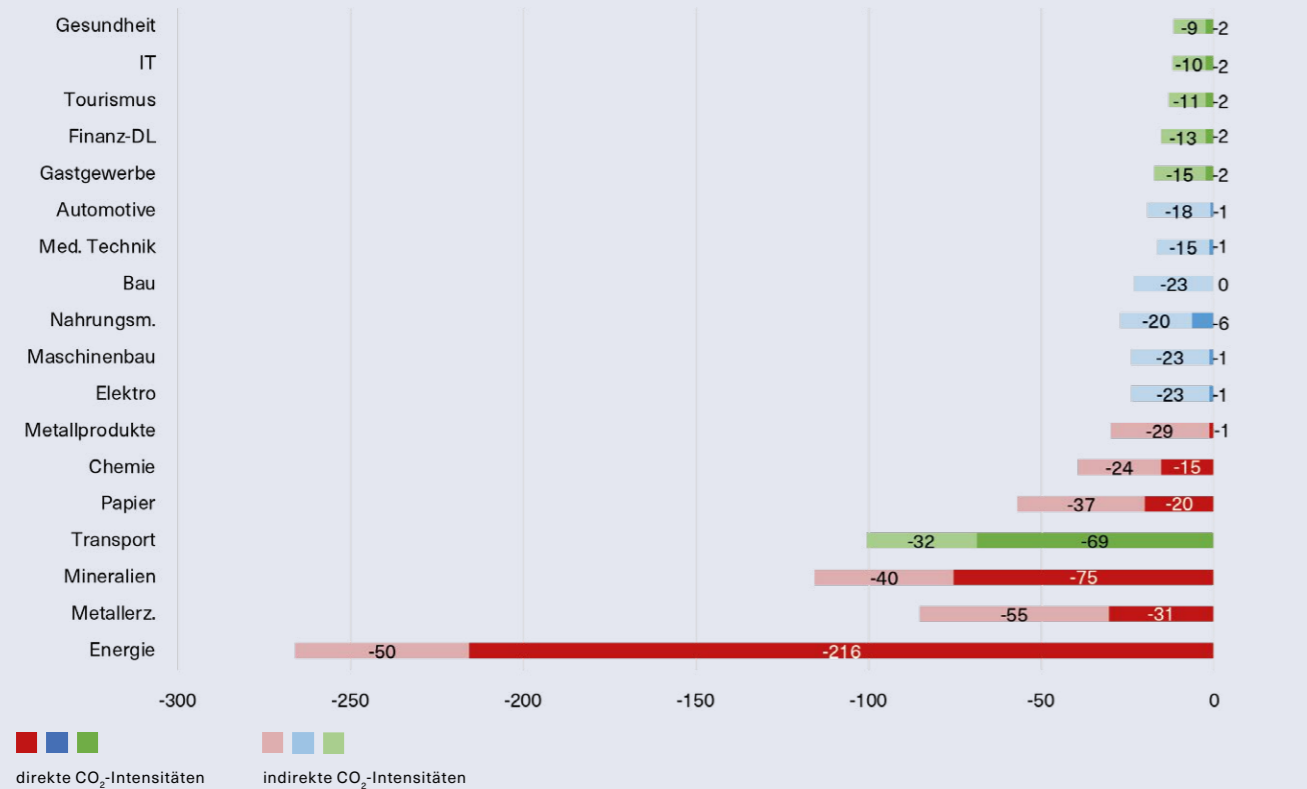
Die Rückgänge bei der CO<sub>2</sub>-Intensität sind im Szenario „Europa geht voran“ weniger stark ausgeprägt als im Szenario „Einheitliches Vorgehen“. Dies ist vor allem auf höhere CO<sub>2</sub>-Intensitäten bei den indirekten Effekten – also bei den Importen – im Szenario „Europa geht voran“ im Vergleich zum Szenario „Einheitliches Vorgehen“ zurückzuführen, da in den anderen wichtigen Handelsregionen der Welt im Szenario „Europa geht voran“ nur geringe Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden.

<sup>302</sup> Im „BaU-Szenario“ 2030 betragen im Cluster „Fokus-Industrien“ die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen (In- und Ausland) 245 Mio. Tonnen, wovon 136 Mio. Tonnen auf das Ausland und somit 109 Mio. Tonnen auf das Inland entfallen. Im Szenario „Europa geht voran“ betragen hier die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen nur noch 197 Mio. Tonnen, wovon 116 Mio. Tonnen auf das Ausland und 81 Mio. Tonnen auf das Inland entfallen. Im Szenariovergleich „Europa geht voran“ mit „BaU 2030“ betragen die Rückgänge bei den indirekten Emissionen aus dem Ausland also 14 Prozent, bei den indirekten Emissionen aus dem Inland dagegen fast 26 Prozent.

Szenario 3

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

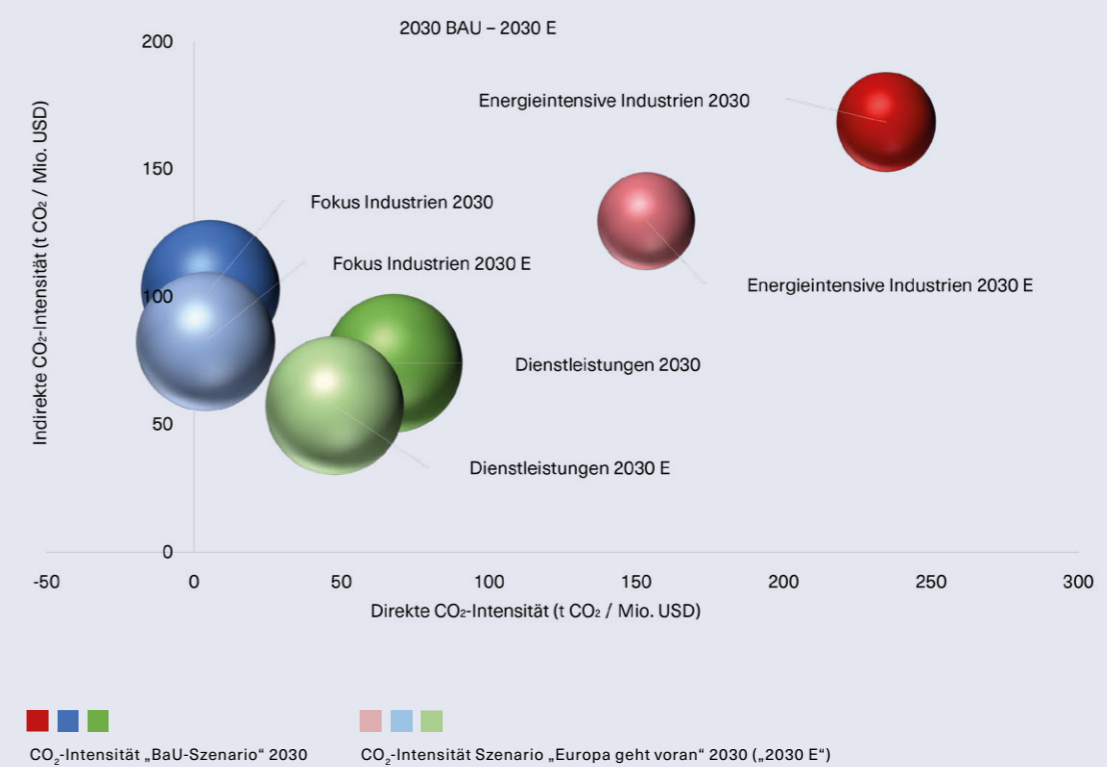
Abbildung 115  
**Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Tonnen CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output**



Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Die nachfolgende Abbildung 116 gibt die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Intensitäten noch einmal gebündelt für die drei Branchencluster wieder.

Abbildung 116  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**



Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio.USD für D im Jahr 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

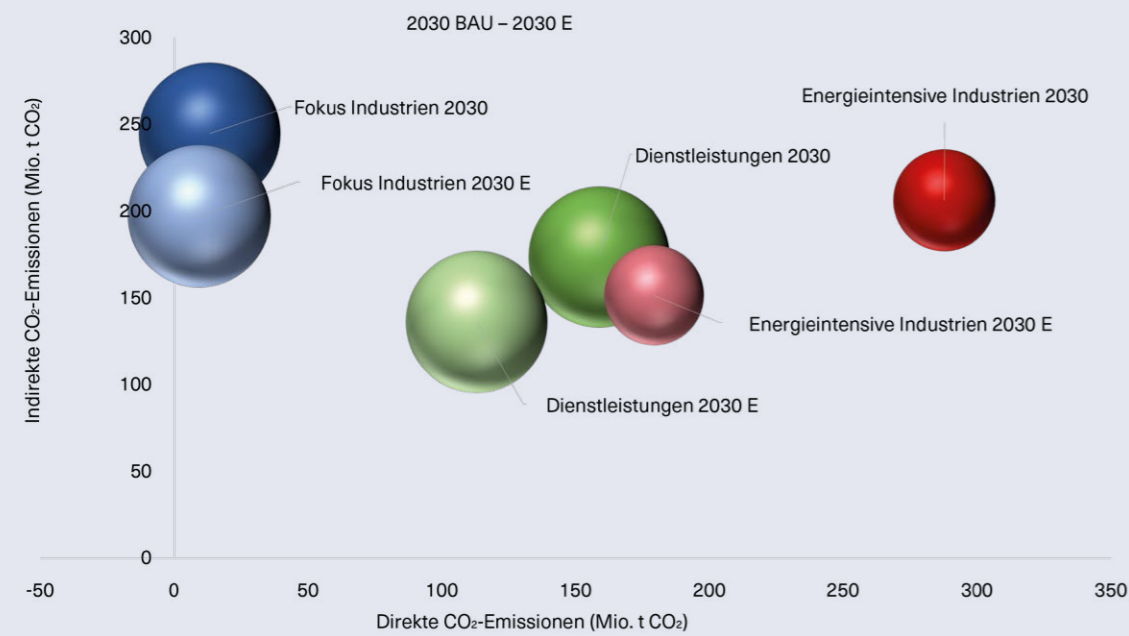
Auch im Szenario „Europa geht voran“ ist der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 in den Branchen bzw. Branchenclustern auf einen absoluten Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen zurückzuführen, und resultiert nicht allein aus einer gestiegenen Produktion. Denn die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken in den drei Branchenclustern gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 deutlich: bei den energieintensiven Industrien um 163 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, bei den Fokus-Industrien um 52 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> und bei den ausgewählten Dienstleistungen um 83 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, wie die nachfolgende Abbildung 117 sowie die Tabelle 17 und die Tabelle 18 zeigen. Im Vergleich zum Szenario „Einheitliches Vorgehen“, in dem auch in anderen Ländern mitunter erhebliche CO<sub>2</sub>-Minderungen erbracht werden, importieren die Branchen im Szenario „Europa geht voran“ höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Ausland.<sup>303</sup>

303 Die Fokus-Industrien importieren beispielsweise im Szenario „Europa geht voran“ 116 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>; im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ sind es lediglich 68 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>.

**Szenario 3**

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 117  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**



■ ■ ■ ■ ■  
 CO<sub>2</sub>-Emissionen „BaU-Szenario“ 2030    CO<sub>2</sub>-Emissionen Szenario „Europa geht voran“ 2030 („2030 E“)

Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio. USD im Jahr 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Tabelle 17  
**Vergleich der CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**

	2030 „BaU“			2030 „Europa geht voran“		
	gesamt	direkt	indirekt	gesamt	direkt	indirekt
<b>CO<sub>2</sub>-Intensitäten (t CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output)</b>						
Energieintensive Industrien	<b>403</b>	235	169	<b>283</b>	153	130
Fokus-Industrien	<b>109</b>	6	103	<b>86</b>	4	83
Ausgewählte Dienstleistungen	<b>142</b>	68	74	<b>105</b>	48	57

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Tabelle 18  
**Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>**

2030		Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Ausgewählte Dienstleistungen
„BaU“	direkt	288	13	159
	indirekt	207	245	174
	davon Ausland	85	136	64
	<b>gesamt</b>	<b>494</b>	<b>258</b>	<b>333</b>
„Europa geht voran“	direkt	179	9	113
	indirekt	152	197	136
	davon Ausland	71	116	56
	<b>gesamt</b>	<b>331</b>	<b>207</b>	<b>249</b>

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

**Effekte in Bayern**

Wie bereits die Darstellung der wirtschaftlichen Effekte eines Szenarios „Europa geht voran“ vermuten lässt, liegen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen in einer mit einem einheitlichen Vorgehen vergleichbaren Größenordnung.

Aus Gründen der Vollständigkeit sollten die entsprechenden Ergebnisse hier sowohl tabellarisch (Tabelle 19) als auch grafisch (Abbildung 118) dargestellt werden.

Szenario 3

Energiesystem

Technologien

Effekte

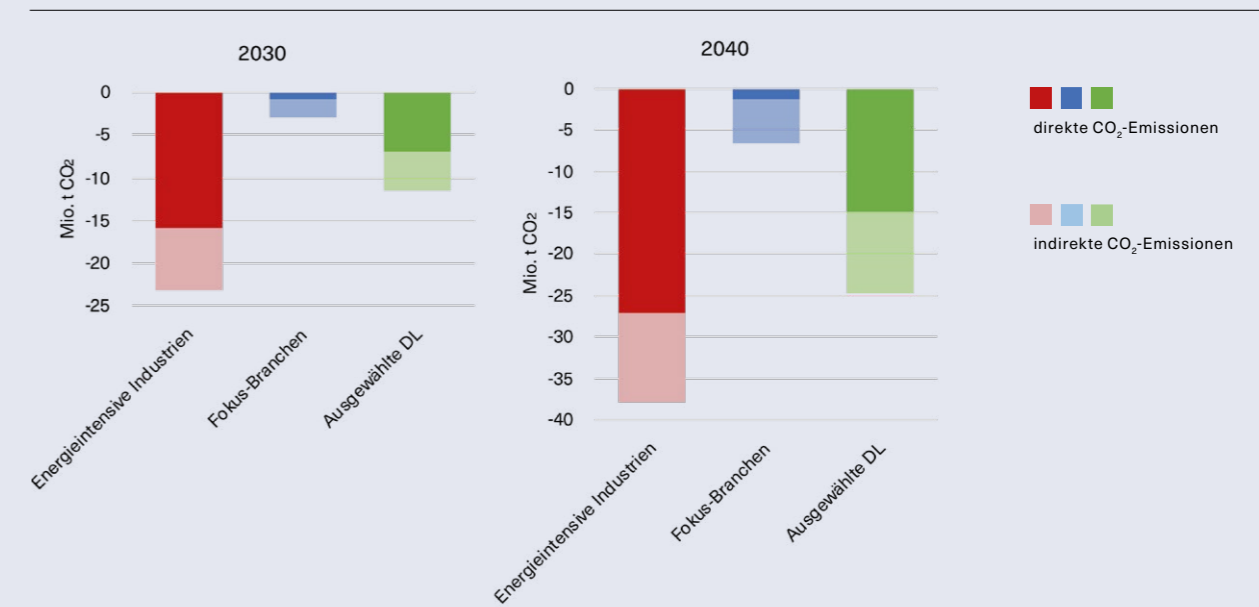
Auswirkungen

Tabelle 19  
**Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (2030 und 2040); in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>**

	Energieintensive Industrien		Fokus-Branchen		Ausgewählte Dienstleistungen	
	Business as Usual	Europa geht voran	Business as Usual	Europa geht voran	Business as Usual	Europa geht voran
2030						
CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	45	29	3	2	24	17
CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	9	10	8	13	8
CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	35	19	7	5	8	5
CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	49	28	25	20	12	8
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>146</b>	<b>86</b>	<b>44</b>	<b>35</b>	<b>57</b>	<b>38</b>
2040						
CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	42	15	3	1	20	5
CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	6	10	5	14	4
CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	37	13	7	4	9	2
CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	53	21	27	13	14	4
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>148</b>	<b>55</b>	<b>48</b>	<b>23</b>	<b>57</b>	<b>14</b>

Quelle: TwinEconomics

Abbildung 118  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ nach Branchenclustern (2030 und 2040)**



Quelle: TwinEconomics

## Szenario 4

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Szenario 4 Deutschland geht voran

**Weltweit deutliche Emissionssteigerungen, in Deutschland eine Reduktion um ca. 80 Prozent bis 2050. Praktisch keine Auswirkungen auf Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland.**

Eine Zusammenfassung finden Sie auf S. 158

### Veränderungen im Energiesystem und bei den Emissionen

#### Veränderungen im Energiesystem: Primärenergieverbrauch

Der weltweite Primärenergieverbrauch steigt um ca. 25 Prozent, also deutlich weniger als das Wirtschaftswachstum (Abbildung 119). Weltweit dominieren 2040 in den Energiesystemen weiterhin fossile Energieträger, die durch einen, im Vergleich zu 2018, moderat ansteigenden Anteil erneuerbarer Energien ergänzt werden (+6 Prozentpunkte). Absolut gesehen erfahren die erneuerbaren Energien ein deutliches Wachstum von geringem Niveau: Die energetische Nutzung von Biomasse nimmt um ca. 35 Prozent zu, die sonstigen erneuerbaren Energien (vor allem Wasserkraft, Wind off- und onshore sowie Photovoltaik) werden insgesamt um ca. 71 Prozent zugebaut.

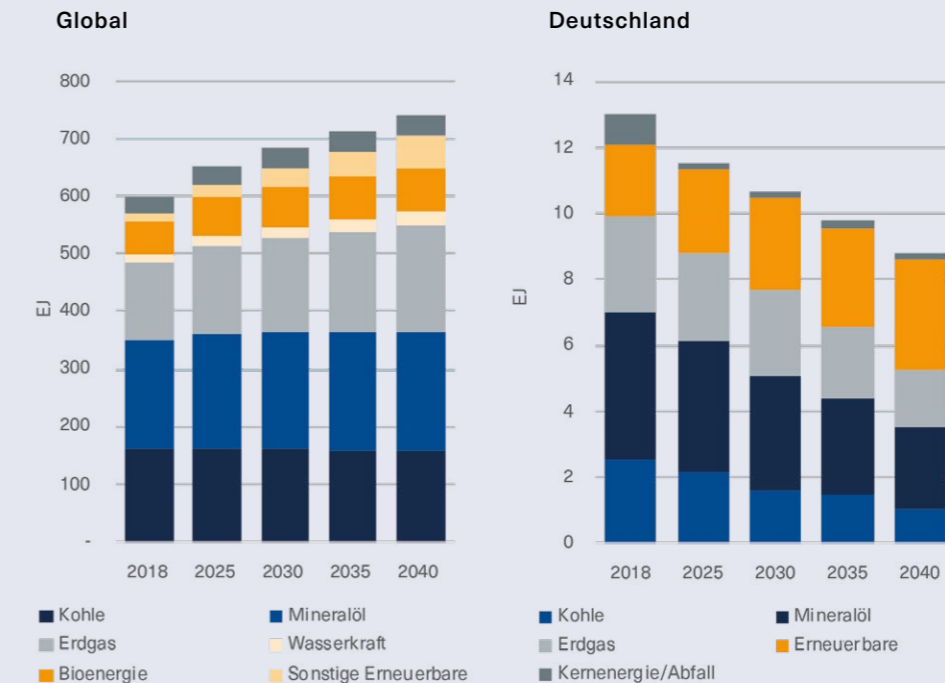
In Europa sinkt der Primärenergieverbrauch um ca. 25 Prozent, der Anteil der fossilen Energieträger im Mix wird um 14 Prozentpunkte reduziert, der Anteil der erneuerbaren Energien steigt um zwölf Prozentpunkte. In Deutschland sinkt der Primärenergieverbrauch von 2018 bis 2040 um gut 30 Prozent, bis 2050 um 44 Prozent. Der Anteil der Erneuerbaren verdoppelt sich bis 2040, bis 2050 vervierfacht er sich fast.

#### Veränderungen im Energiesystem: Stromerzeugung

In der weltweiten Stromerzeugung nimmt die Kohle absolut geringfügig ab, der Anteil sinkt damit um ca. sechs Prozentpunkte. Die Erneuerbaren machen einen deutlichen Anteil an der neuen Stromerzeugung aus und gewinnen ca. sieben Prozentpunkte. Der Zubau von höchsteffizienten Gaskraftwerken trägt zur Flexibilisierung der Stromsysteme mit dem verstärkten Anteil an volatiler Erzeugung bei, der Anteil von gasbasierter Stromproduktion wächst weltweit um ca. zwei Prozentpunkte. Neue Kernkraft wird ebenfalls zugebaut, hält aber damit den Anteil.

In Deutschland steigt der Anteil der Erneuerbaren bis 2050 auf 88 Prozent, im Jahr 2040 macht er gut 70 Prozent aus. Bis 2040 ist keine Kohle mehr im Mix, doch werden für das Backup im Stromsystem flexible Gaskraftwerke noch während weniger Stunden im Jahr eingesetzt.

Abbildung 119  
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Deutschland geht voran“ in EJ



Quelle: WEO 2019, Eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Veränderung der Kosten für fossile Energieträger

In dem Szenario „Deutschland geht voran“ kommt es aufgrund der steigenden Energienachfrage zu einem Anstieg der Energiepreise gegenüber dem heutigen Niveau. Im Jahr 2040 liegen die Großhandelspreise für Rohöl mit 103 USD pro Barrel etwa 50 Prozent über dem Niveau von 2018. Aufgrund des geringeren Nachfraganstiegs gegenüber dem „Business as Usual“-Szenario liegt der Ölpreis im Jahr 2040 jedoch rund 25 Prozent niedriger als im Szenario „Business as Usual“. Die Preise für Erdgas und Steinkohle in Europa liegen aufgrund der moderat sinkenden Nachfrage nach fossilen Energieträgern in Europa rund zehn Prozent (Erdgas) bzw. 13 Prozent (Steinkohle) tiefer als im „BaU-Szenario“ und entsprechen den Preisen des Szenarios „Europa geht voran“ (WEO „Stated Policies Scenario“).

#### Veränderungen bei Investitionen

Die weltweiten kumulierten Investitionen in die Energiesysteme bis 2040 liegen im „Deutschland geht voran“ nur leicht höher als im Szenario „Business as Usual“ (+2 Prozent). Die Investitionen sind jedoch zwischen den einzelnen Bereichen unterschiedlich verteilt. Während die weltweiten Investitionen in fossile Energieträger rund 19 Prozent niedriger ausfallen, liegen sie im Bereich der erneuerbaren Energien rund 38 Prozent, im Bereich der Energieeffizienz 23 Prozent und im Bereich der Stromsysteme rund fünf Prozent höher.



## Szenario 4

Energiesystem

Technologien

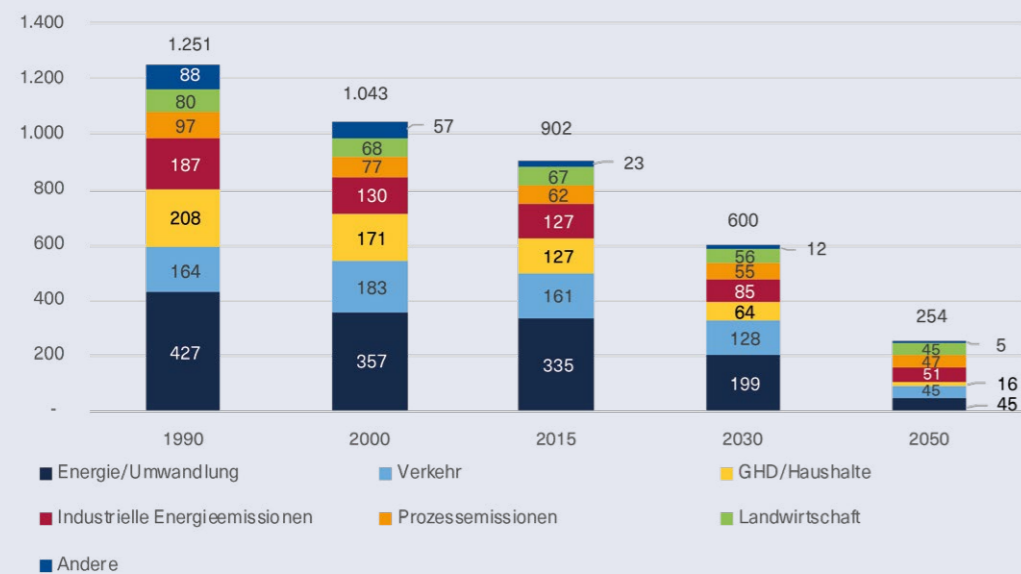
Effekte

Auswirkungen

In Deutschland sind die Mehrinvestitionen bis 2050 fast doppelt so hoch wie im „BaU-Szenario“ (+196 Prozent). Die notwendigen Mehrinvestitionen fallen vor allen Dingen im Verkehr (+129 Mrd. Euro), im Energie- (+48 Mrd. Euro) und dem Gebäudesektor (+102 Mrd. Euro) an. Insgesamt betragen die Mehrinvestitionen gegenüber dem Szenario 1 bis 2050 ca. 1.000 Mrd. Euro, also ca. 31 Mrd. Euro jährlich. Dem stehen die Einsparungen an fossilen Energieträgern gegenüber, die kumuliert bis zum Jahr 2050 ca. 760 Mrd. Euro betragen, sodass sich die direkten volkswirtschaftlichen Mehrkosten auf ca. 240 Mrd. Euro belaufen, durchschnittlich also 7,5 Mrd. Euro jährlich, was zwar mehr als im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ ist, aber bspw. verglichen mit der jährlichen Energierechnung nach wie vor eine kleine Größe ist.

Abbildung 120

**Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq. nach Sektoren im Szenario „Deutschland geht voran“**



Quelle: BDI, 2018, Eigene Darstellung Prognos, 2020

#### Veränderungen bei den Treibhausgas-Emissionen

In dem Szenario werden die Treibhausgas-Emissionen bis 2050 gegenüber 2018 auf globaler Ebene um etwa acht Prozent zunehmen und in Deutschland um 77 Prozent zurückgehen. Abbildung 120 zeigt die Entwicklung in Deutschland nach Sektoren. Dies führt zu einer globalen Erwärmung um 2,8 Grad bis 3,2 Grad C bis 2100 gegenüber vorindustriellen Werten. Dies entspricht etwa der Situation im Szenario „Europa geht voran“ und liegt somit außerhalb des Korridors, der von der Klimaforschung als beherrschbar eingeschätzt wird.

#### Technologische Veränderungen

Weltweit sind die Entwicklungen ähnlich wie im Szenario 3, lediglich in Europa ohne Deutschland verläuft die Entwicklung weniger ambitioniert.

In Deutschland erfolgt im Industriesektor eine Effizienzsteigerung durch konsequente Anwendung von betriebswirtschaftlich sinnvollen Querschnittstechnologien und effizienten Methoden der Prozessorganisation und -steuerung. Der Anteil von biogenen Brennstoffen zur Prozesswärmeerzeugung steigt bis zum Jahr 2050 auf 31 Prozent, bis zum Jahr 2040 auf 22 Prozent. CCS zur Reduktion von Prozessemissionen wird nicht eingesetzt, da davon ausgegangen wird, dass diese Technologie aufgrund der weltweit langsameren Entwicklungen bis 2040 noch nicht konkurrenzfähig einsetzbar ist – insbesondere da keine internationalen Vereinbarungen zum Klimaschutz bestehen.

Im Verkehrssektor (in Deutschland) erfolgt eine starke Elektrifizierung des Personenverkehrs und der leichten Nutzfahrzeuge, jedoch ist diese nicht vollständig, sodass bis 2050 ca. 14 Mio. Pkw mit batterieelektrischen Antrieben im Fahrzeugpark sind. Für den Schwerverkehr werden ca. 4.000 Kilometer der meistbefahrenen Autobahnen mit Oberleitungen ausgestattet, sodass ca. 25 Prozent der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen mit Diesel-Hybridantrieben und Stromabnehmern ausgestattet sein wird. Insgesamt werden etwa 50 Prozent der gefahrenen Leistung mit alternativen Antrieben zurückgelegt, neben dem großen Anteil an Dieselhybriden sind auch Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb sowie sehr wenige (Flotten, Modellprojekte) mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen unterwegs. Es erfolgt jedoch dann ergänzend zum Stromverbrauch auf den elektrifizierten Strecken immer noch ein erheblicher Verbrauch von fossilen Mineralölprodukten, vor allem Diesel. Bei Verbrennungsmotoren, sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr, wird die Effizienz gesteigert.

Im Gebäudesektor (in Deutschland) werden die Neubauten auf höchstem Effizienzstandard gebaut und mit erneuerbaren Energien beheizt. Im Gebäudebestand erfolgt eine Erhöhung der Sanierungsrate von 1,1 Prozent auf

durchschnittlich 1,7 Prozent, sodass ca. 80 Prozent des Bestandes bis 2050 auf hohem energetischen Standard sind. Damit können mit dem jeweils alterungsbedingt fälligen Austausch der Heizungssysteme die meisten Gebäude mit erneuerbaren Energien beheizt werden. Insgesamt werden bis 2050 ca. 14 Mio. Wärmepumpen eingebaut. In Ballungsgebieten werden die Fernwärmenetze verdichtet und zu großen Teilen ebenfalls mit erneuerbaren Energien und Abwärme beheizt. In diesen Netzen finden sich auch mit Power-to-Heat beheizte Saisonalspeicher, die die Integration erneuerbarer Energien in das System zusätzlich erleichtern. Es bleiben jedoch weiterhin wenige z.B. denkmalgeschützte Gebäude, die mit fossilen Energien beheizt werden, im Gebäudepark.

Insgesamt bleibt die Stromnachfrage in Deutschland bis zum Jahr 2050 nahezu konstant, da sich Effizienzentwicklungen bei den konventionellen Anwendungen wie bei Beleuchtung und mechanischer Energie mit den neuen Anwendungen etwa die Waage halten. Die größten Effizienzpotenziale bestehen bei der effizienten Beleuchtung sowie bei dem Ersatz von Stromdirekt- oder Stromspeicherheizungen. Diese werden insbesondere mit alten Gebäuden allmählich aus der Beheizungsstruktur verschwinden – der Bedarf dieser ca. vier Mio. Stromdirektheizungen in energetisch eher unzulänglichen Gebäuden entspricht praktisch dem Bedarf der 14 Mio. Wärmepumpen in energetisch gut ausgestatteten Gebäuden.

Im Stromsystem werden bis 2050 in Deutschland 88 Prozent der Erzeugung erneuerbar sein, bis 2040 ca. 80 Prozent. Der Rest des Elektrizitätsbedarfs wird über hocheffiziente und flexible Gaskraftwerke gedeckt. Die neuen Stromverbraucher wie Wärmepumpen und batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge stellen Flexibilitätspotenziale bereit, die für einen effizienten Betrieb des Stromsystems aktiviert werden müssen. Auch in der Industrie und im Dienstleistungssektor werden mit geeigneten Regelungs- und Geschäftsmodellen Flexibilitätspotenziale erschlossen. In anderen Industrieländern finden ähnliche Entwicklungen statt, da auch diese die erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung stark ausbauen.

## Szenario 4

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

## Effekte bei Handel, Branchenstruktur, Beschäftigung und BIP

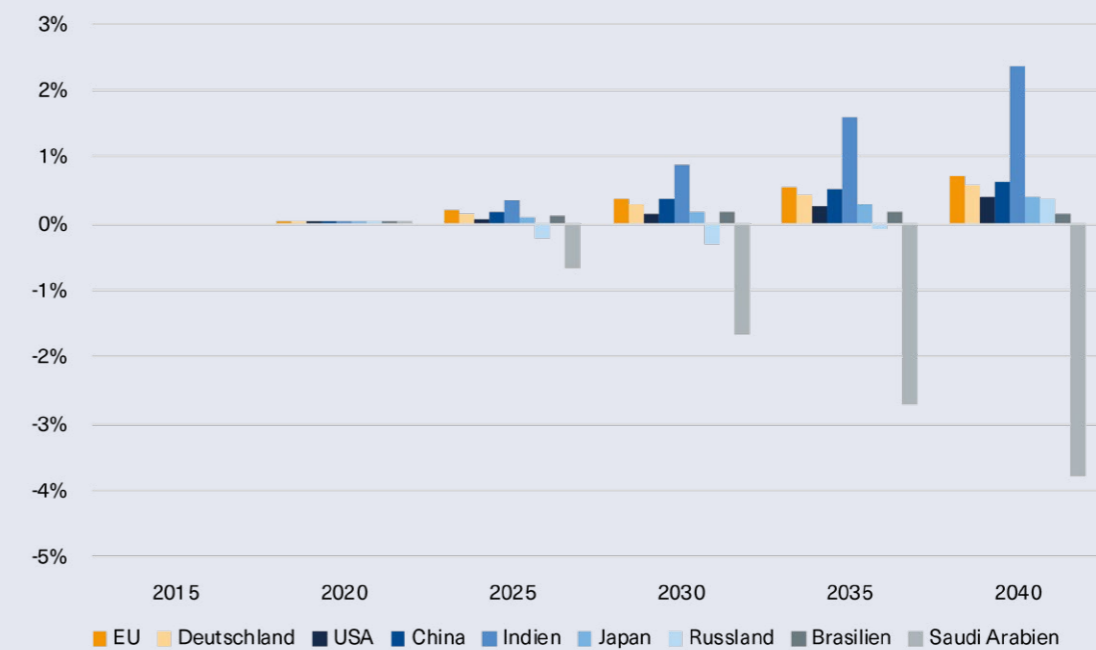
Das Szenario „Deutschland geht voran“ betrachtet einen deutschen Alleingang im Klimaschutz. Der Rest der Welt einschließlich der übrigen EU bleibt dagegen weitgehend bei seinen derzeitigen geringeren Klimaschutzambitionen. Konkret orientieren sich die Vorgaben für den Rest der Welt wie im Szenario „Europa geht voran“ am „Stated Policies Scenario“ der IEA (2019), das leicht ambitionierter ist als das „Current Policies Scenario“, das dem das „BaU-Szenario“ zugrunde liegt. Für die EU bedeutet dies einen CO<sub>2</sub>-Preis von 33 USD pro Tonne im Jahr 2030 und geringe CO<sub>2</sub>-Preise in einigen Ländern wie China und Südafrika, die bereits eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung umgesetzt oder sich fest vorgenommen haben.

Wichtig für das Verständnis der Unterschiede zum Szenario „Europa geht voran“ sind die Annahmen zur Ausgestaltung des Klimaschutzes in Deutschland, die sich vor allem auf den national gestaltbaren Bereich außerhalb des EU-ETS konzentrieren müssen. Es wird in Anlehnung an die BDI-Szenarien ein „80%-Klimapfad“ bis 2050 mit nationalen Politiken angestrebt, weil höhere Minderungen im nationalen Alleingang nicht möglich sind. Zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen sind mit entsprechenden Investitionen hinterlegt. Wirkungen auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Sektoren bleiben begrenzt, weil Mechanismen im EU-ETS für die CO<sub>2</sub>-intensive Industrie weiter gelten. Im Gegensatz zu Szenarien mit höherer internationaler Beteiligung an ambitioniertem Klimaschutz sinken die Kosten von Klimaschutztechnologien in diesem Szenario nur langsam, und die Technologien für die „letzten 20 Prozent“ werden global nicht schnell genug entwickelt. Außerdem fehlen auch hier die zum Einsatz notwendigen internationalen Abstimmungen und Mechanismen, wie z.B. über die Nutzung von CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten. Für den Aufbau großer Anlagen zur Produktion synthetischer Brenn- und Treibstoffe in entsprechend attraktiven Regionen fehlen ebenfalls internationale Abkommen und somit Investitionssicherheit.

## Effekte international

Die Wirkungen auf das BIP bleiben im Vergleich zum „BaU-Szenario“ begrenzt. Den größten Zuwachs weist Indien mit etwas mehr als zwei Prozent im Jahr 2040 auf. In Saudi-Arabien ergibt sich ein negativer Effekt von knapp vier Prozent im Jahr 2040, weniger weil Deutschland seinen Öl- und Gaseinsatz reduziert, sondern vor allem, weil auch in anderen Teilen der Welt etwas mehr Klimaschutz betrieben wird als im „BaU-Szenario“. In den Industrieländern und in China ergeben sich leicht positive Effekte durch etwas mehr Klimaschutz, wobei davon auszugehen ist, dass günstige Vermeidungsmaßnahmen ergriffen werden, die sich ohne höhere CO<sub>2</sub>-Preise rechnen. An den jährlichen durchschnittlichen Wachstumsraten ändert sich in den Ländern kaum etwas (Abbildung 121).

Abbildung 121  
BIP im internationalen Vergleich – Abweichungen im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“



Quelle: GWS, 2020

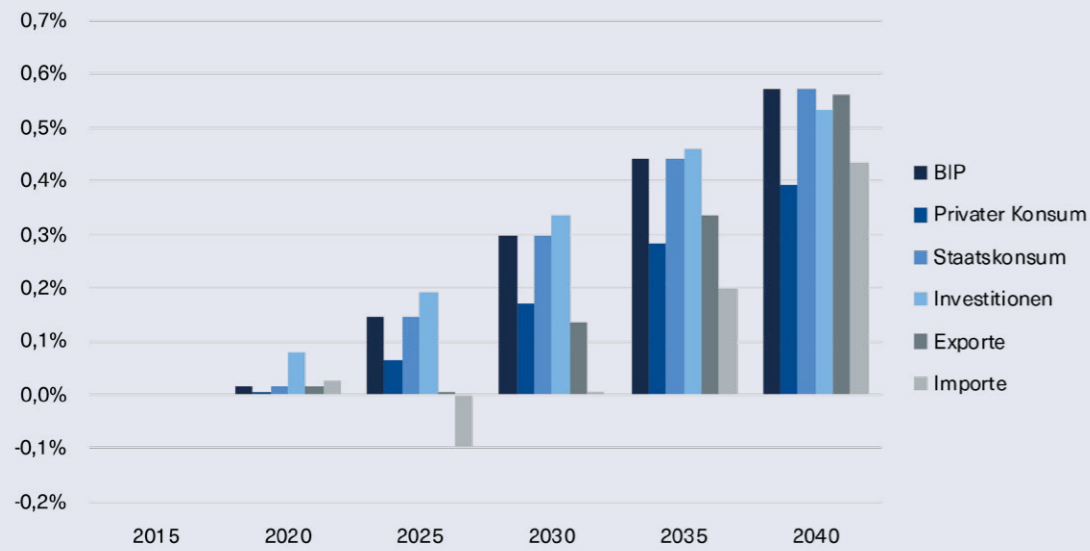
## Effekte in Deutschland

Für Deutschland sind die Effekte des Alleingangs auch wegen der Ausgestaltung der Klimaschutzmaßnahmen nur gering. Das BIP liegt im Jahr 2040 knapp 0,6 Prozent höher als im „BaU-Szenario“, zugleich aber niedriger als in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Einheitliches Vorgehen“. Zusätzliche Klimaschutzinvestitionen etwa im Bereich der Gebäudesanierung und der Stromerzeugung sowie ein leichter Importrückgang, weil weniger fossile Energieträger eingeführt werden müssen, wirken sich leicht positiv auf das BIP aus. Die Exporte entwickeln sich leicht unterdurchschnittlich. Es kommt aber wegen der niedrigen CO<sub>2</sub>-Preise und der Konzentration der Klimaschutzmaßnahmen auf Bereiche, die kaum im internationalen Wettbewerb stehen, nicht zu größeren Belastungen für die Exportwirtschaft (Abbildung 122).

Szenario 4

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 122  
**Abweichungen des BIP und seiner Komponenten in Deutschland im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“**

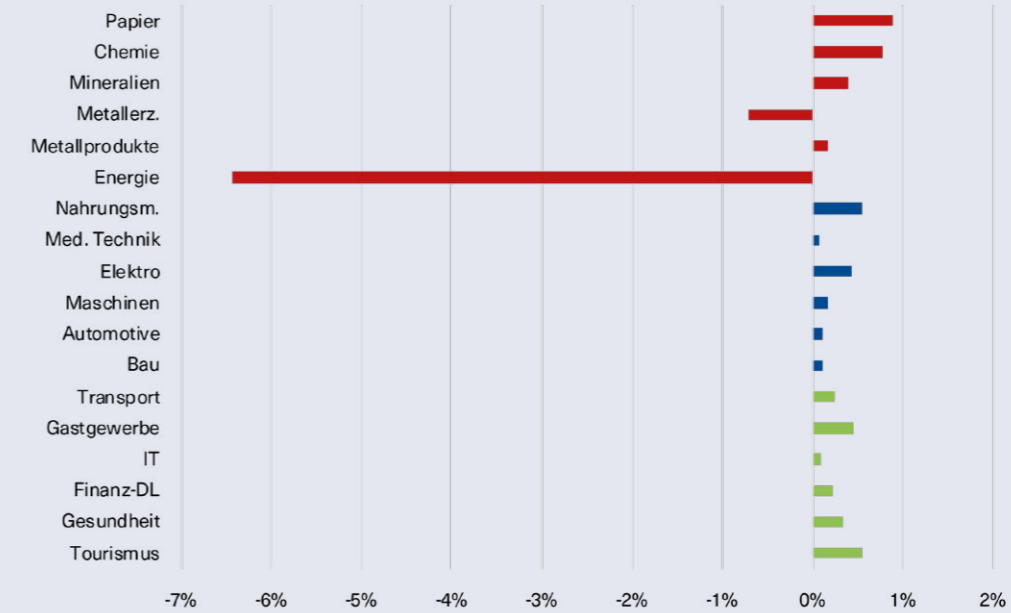


Quelle: GWS, 2020

Auf der Branchenebene ergeben sich im Vergleich zum „BaU-Szenario“ in der Energieversorgung und für die Metallherzeugung negative Effekte im Jahr 2030. Die Fokus-Branche der Industrie und die Dienstleistungen können ihre Wertschöpfung im Vergleich zum „BaU-Szenario“ leicht steigern. Aber auch energieintensive Branchen wie Papier, Chemie und Mineralien können leicht profitieren. Bspw. werden vermehrt Dämmstoffe im Gebäudebereich nachgefragt (Abbildung 123).

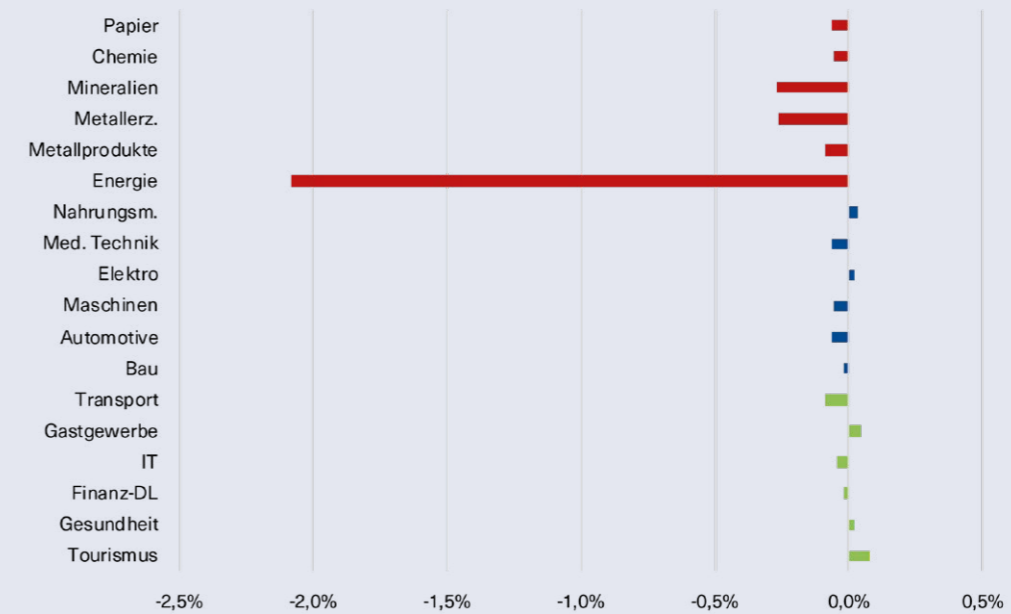
Bei leicht höheren Güterpreisen durch die zusätzlichen Investitionen in Klimaschutz entwickeln sich die Beschäftigungszahlen ein wenig negativer als die Wertschöpfung. Dahinter stehen etwas steigende Löhne, die zu einer höheren Arbeitsproduktivität führen (Abbildung 124).

Abbildung 123  
**Abweichungen im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – reale Bruttowertschöpfung (2030)**



Quelle: GWS, 2020

Abbildung 124  
**Abweichungen im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – Beschäftigung (2030)**



Quelle: GWS, 2020

## Szenario 4

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Insgesamt zeigt der Szenarienvergleich begrenzte Effekte eines deutschen Alleingangs. Wichtige Gründe für die geringen Effekte sind die niedrigen CO<sub>2</sub>-Preise, sodass die Kosten der CO<sub>2</sub>-intensiven Industrie nur wenig steigen. CO<sub>2</sub>-Zertifikate bekommen sie weiterhin kostenlos zugeteilt. Durch die Klimaschutzmaßnahmen produziert die Volkswirtschaft insgesamt effizienter und benötigt weniger Energieimporte. Energieeinsatz wird durch Kapitaleinsatz substituiert. Die gesamtwirtschaftlichen Effekte sind aber weniger positiv als im Fall europäischer und globaler Kooperation. Das Szenario beschreibt ein kostenoptimiertes Szenario mit einem geringen zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Preissignal und zusätzlichen nationalen Klimaschutzmaßnahmen, die sich einzelwirtschaftlich weitgehend rechnen. Sie ermöglichen das Erreichen der reduzierten Minderungsziele („80%-Pfad“) in Deutschland. Mehr ist nicht erreichbar, weil Deutschland in das EU-ETS eingebunden bleibt, die EU aber nur geringe Klimaschutzambitionen hat, und weil internationale Zusammenarbeit und ein internationaler Markthochlauf bei Technologien fehlt. Auf das globale Temperaturniveau hat ein deutscher Alleingang beim Klimaschutz allerdings wenig Einfluss, das globale Temperatur- und Emissionsziel wird nicht erreicht.

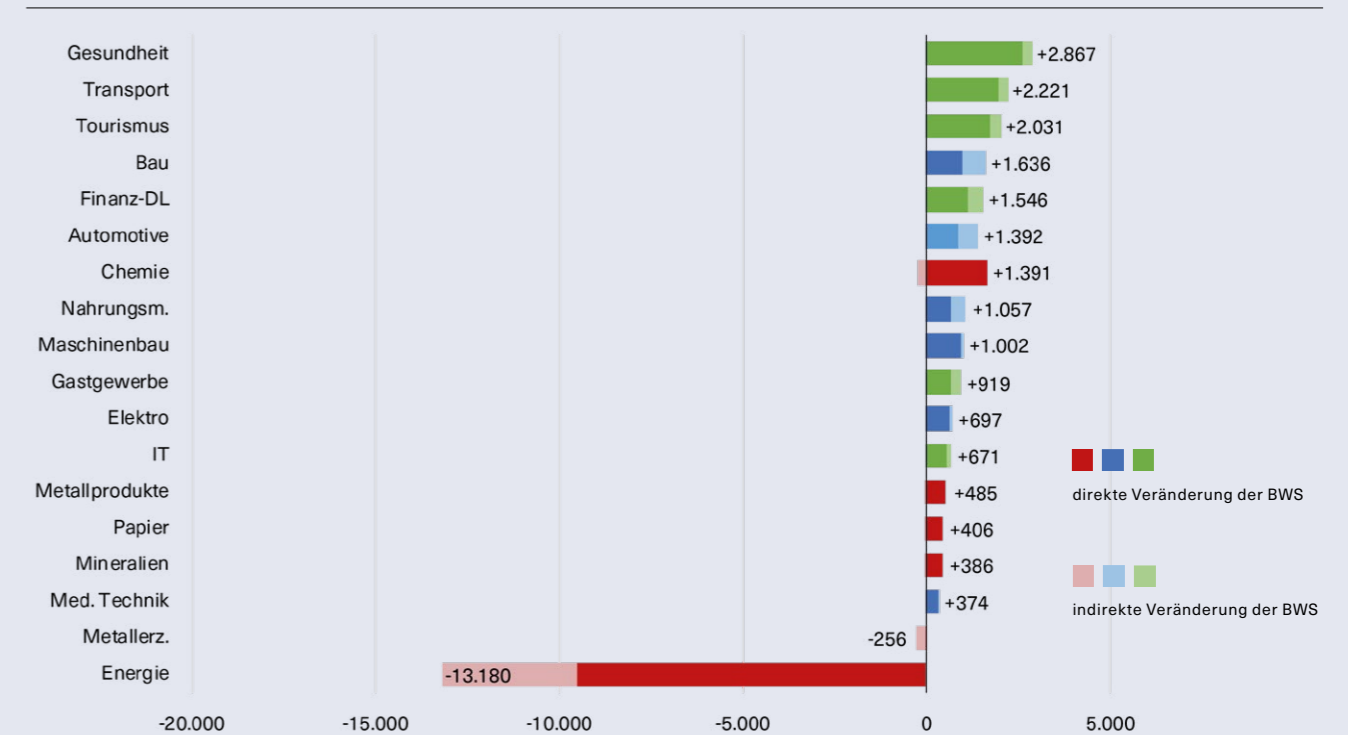
#### Entwicklungslinien der ökonomischen Effekte in der Wertschöpfungskette in Deutschland und in Bayern

##### Deutschland

Das Szenario „Deutschland geht voran“ gleicht im Hinblick auf die Veränderungen der BWS gegenüber dem „BaU-Szenario“ den Szenarien „Europa geht voran“ und „Einheitliches Vorgehen“. Auch in diesem Szenario entwickelt sich im Jahr 2030 die Bruttowertschöpfung in den einzelnen Branchen – mit Ausnahme der Energiewirtschaft – etwas positiver, als dies im „BaU-Szenario“ 2030 der Fall ist. Die Veränderungen fallen jedoch unter Einbeziehung der indirekten Effekte insgesamt deutlich schwächer aus als in den beiden anderen Abweichungsszenarien, was wiederum den erheblichen zusätzlichen Investitionskosten für Klimaschutzmaßnahmen bei einem deutschen Alleingang geschuldet ist (Abbildung 125). Besonders stark fallen die Zuwächse bei der Bruttowertschöpfung in den Dienstleistungsbranchen „Gesundheit“, „Transport“ und „Tourismus“ aus. Die Fokus-Branche erzielen moderate Zuwächse, wohingegen in den energieintensiven Branchen erneut eine Dreiteilung zu beobachten ist: Die Bruttowertschöpfung der Chemieindustrie liegt deutlich über dem Niveau im „BaU-Szenario“ (+1.391 Mio. USD), in den Branchen „Metallprodukte“ (+485 Mio. USD), „Papier“ (+406 Mio. USD), „Mineralien“ (+386 Mio. USD) und „Metallerzeugung“ (-256 Mio. USD) verändert sich die BWS eher moderat, während sie im Energiesektor (-13.180 Mio. USD) sehr stark abnimmt – allerdings weniger drastisch als in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Einheitliches Vorgehen“. Dies liegt daran, dass der in diesem Szenario unterstellte BDI „80%-Klimapfad“ etwas weniger einschneidende Maßnahmen mit den zur Umsetzung erforderlichen Investitionen nach sich zieht als in den beiden anderen Abweichungsszenarien.

Abbildung 125

Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD



Hinweis: Die ausgewiesenen Werte entsprechen jeweils der Gesamtveränderung gegenüber dem „BaU-Szenario“ (2030), d. h. der Summe aus direkter und indirekter Veränderung der BWS.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

##### Bayern

Je kleiner die geografische Abgrenzung, in welcher Klimaschutzmaßnahmen gesetzt werden, desto geringer fallen auch die damit zu generierenden Effekte aus. Das bestätigt auch ein Vergleich des Szenarios „Deutschland geht voran“ mit dem „Business as Usual“-Szenario, aber auch mit den anderen Szenarien.

Demnach würde eine Vorreiterrolle Deutschlands im Klimaschutz für Bayern in Summe zwar zu besseren Effekten im Vergleich zum „Business as Usual“-Szenario führen, die zu erwartenden positiven Effekte auf Produktion und Output würden mit einem Netto-Plus von 18,9 Mrd. USD für die Produktion und 14,7 Mrd. USD für die Wertschöpfung (beides nominal, nicht preisbereinigt) aber nur rund halb so groß ausfallen, als wenn ein global „Einheitliches Vorgehen“ oder jedenfalls ein europaweit „Einheitliches Vorge-

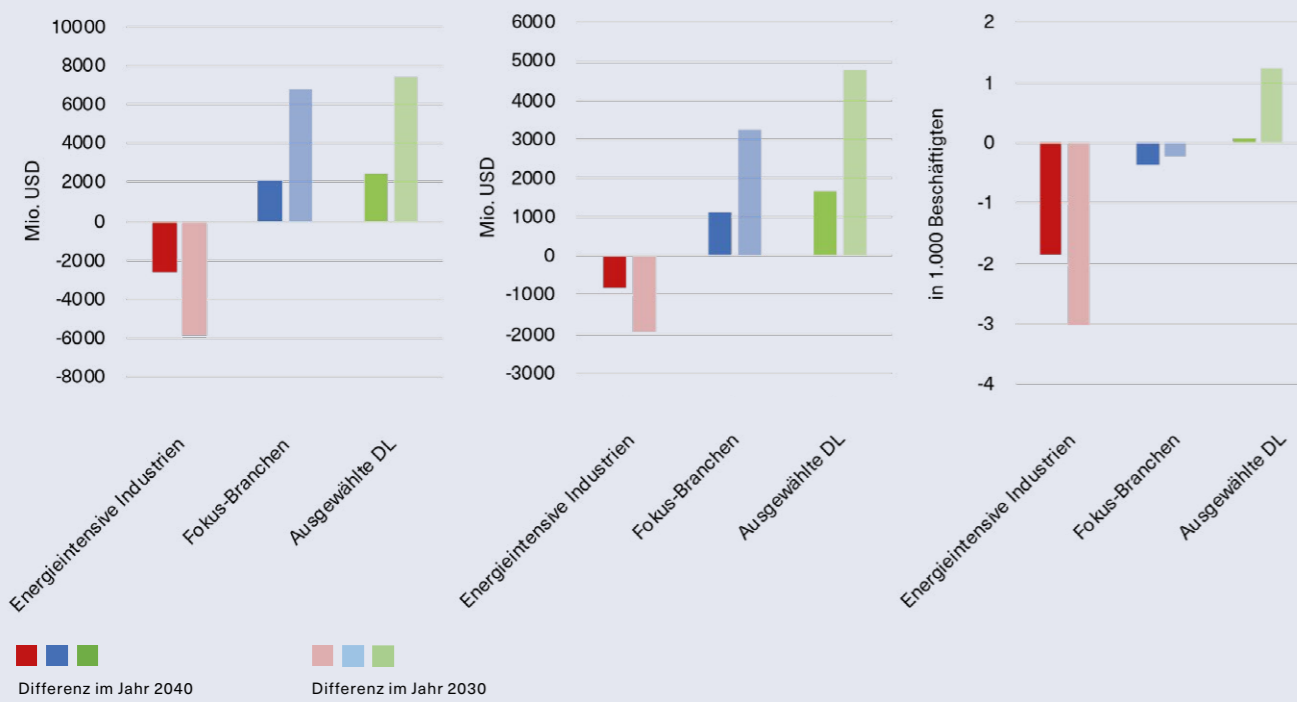
hen“ forciert würde. Rund die Hälfte des maximal zu generierenden Effekts in Bayern (vergleiche hierzu die Ergebnisse aus dem Szenario „Einheitliches Vorgehen“) ist folglich davon abhängig, was europa- bzw. weltweit an Klimaschutzmaßnahmen gesetzt wird.

Während die in diesem Szenario zu erwartenden Effekte im Jahr 2030 noch moderat ausfallen, würde ein merkbarer Effekt erst im Jahr 2040 zu erwarten sein. Auch in diesem Szenario wären in den energieintensiven Industrien deutliche negative Effekte gegenüber dem „Business as Usual“-Szenario zu erwarten, welche durch positive Effekte auf Bruttoproduktionswert und Bruttowertschöpfung sowohl der Fokus-Branche als auch der ausgewählten Dienstleistungen mehr als kompensiert würden.

Szenario 4

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Abbildung 126  
Veränderungen von BPW, BWS und Beschäftigung in Bayern im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (2030 und 2040)

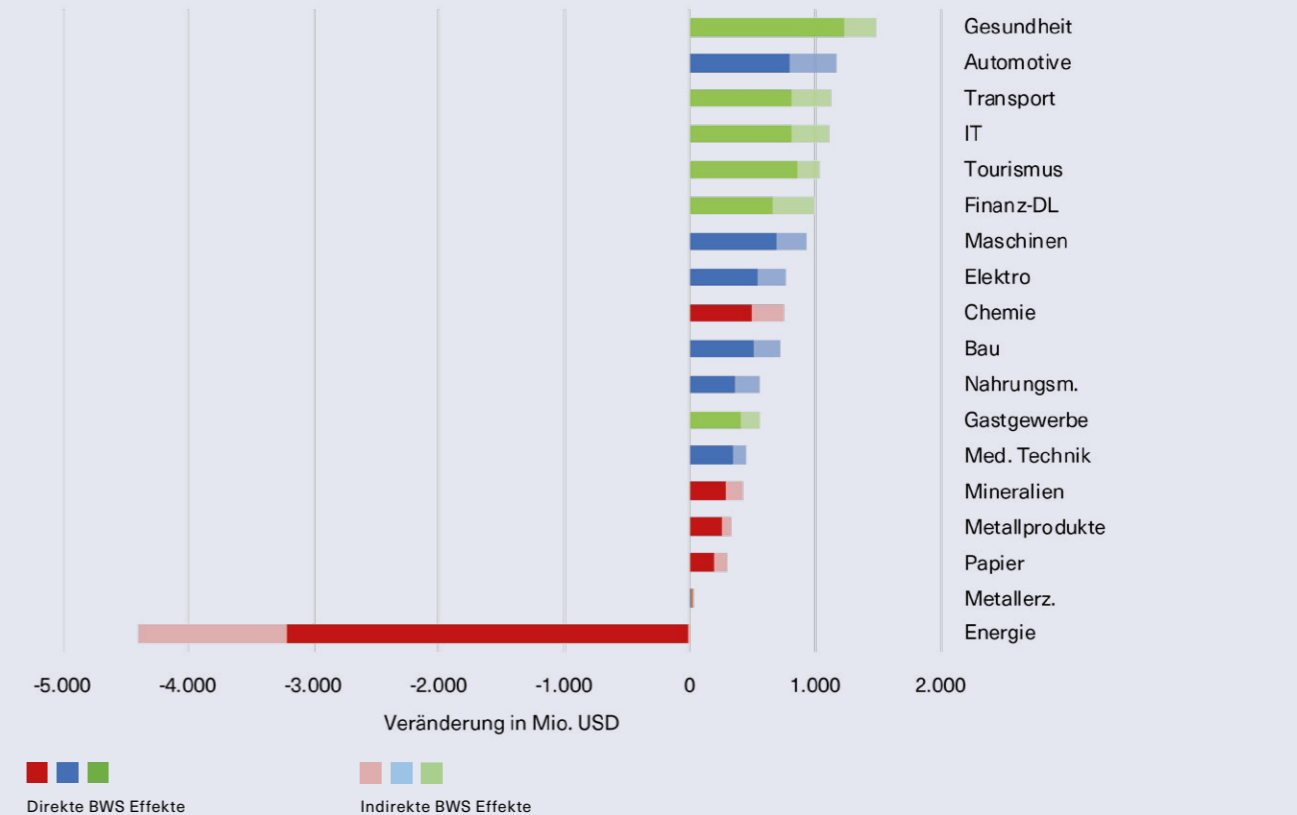


Quelle: TwinEconomics

Hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse für Output und Wertschöpfung ist allerdings Vorsicht geboten, handelt es sich hierbei doch um nominale Werte, welche nicht um Preiseffekte bereinigt sind. Beim Ausweis der Beschäftigungseffekte spielen Preiseffekte hingegen keine Rolle und so zeigt sich, dass energieintensive Industrien (und hier lässt sich der negative Effekt auf den Sektor Energie einschränken) im Szenarienvergleich negativ betroffen sind, wohingegen die ausgewählten Dienstleistungen bis 2040 ein leichtes Plus verzeichnen werden können. Dieses reicht jedoch nicht aus, um einen positiven Nettoeffekt im Bereich der Beschäftigung zu erreichen.

Einen Überblick über die Veränderungen in der gesamten Bruttowertschöpfung, d.h. der Summe aus direkter und indirekter Wertschöpfung, bis 2040 liefert Abbildung 127. Verglichen mit den Effekten aus dem Szenario „Einheitliches Vorgehen“ sind hier die Effekte zwar weniger stark ausgeprägt, im Wesentlichen aber ähnlich in der Aussage, dass Dienstleister tendenziell am stärksten profitieren, wohingegen energieintensive Industrien negative Effekte, wie im Bereich der Energie, oder nur leichte Verbesserungen generieren können.

Abbildung 127  
Veränderungen der direkten und indirekten BWS in Bayern im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2040, in Mio. USD, nominal



Quelle: TwinEconomics

## Szenario 4

Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

### Auswirkungen auf Emissionen entlang der Wertschöpfungsketten in Deutschland und in Bayern

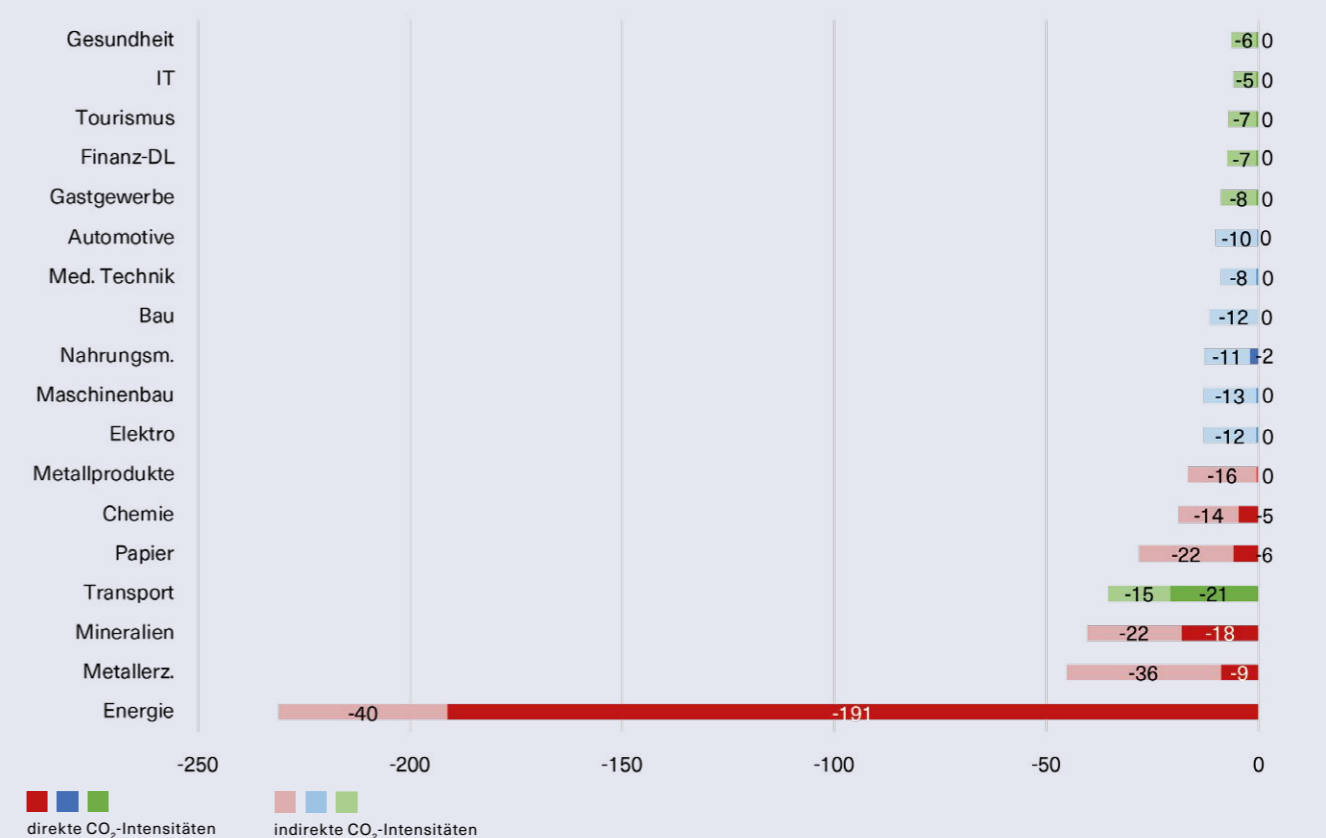
#### Effekte in Deutschland

Nachfolgend werden die direkten und indirekten Emissionseffekte im Szenario „Deutschland geht voran“ im Vergleich zum „BaU-Szenario“ 2030 vorgestellt.

Die Rückgänge der CO<sub>2</sub>-Intensität gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 fallen in diesem Szenario bei allen Branchen deutlich geringer aus als in den Anpassungsszenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Europa geht voran“. Die CO<sub>2</sub>-Intensität sinkt im Branchencluster „Energieintensive Industrien“ am stärksten. Bei den Fokus-Industrien sinkt sie in den Branchen Maschinenbau und Elektro am stärksten, bei ausgewählten Dienstleistungen im Transportsektor (Abbildung 128).

Bei den energieintensiven Branchen wird der Rückgang im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 vor allem in der Energiewirtschaft (-231 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) durch den Rückgang der direkten CO<sub>2</sub>-Intensität (-191 Tonnen CO<sub>2</sub>/1 Mio. USD) bewirkt (vgl. Abbildung 127); dies liegt an der deutlichen Dekarbonisierung der Energiewirtschaft, die auch in diesem Szenario mit erheblichen Klimaschutzinvestitionen verbunden ist. In den übrigen energieintensiven Branchen liegt der Rückgang gegenüber dem „BaU-Szenario“ hingegen im unteren bis mittleren zweistelligen Bereich mit Schwerpunkt in den indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten – also in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen. Bei den Fokus-Industrien und im Dienstleistungsbereich erfolgt der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 nahezu ausschließlich auf der Vorleistungsebene, wie auch Tabelle 20 zeigt. Im Vergleich zum „BaU-Szenario“ 2030 fallen infolge des in diesem Szenario unterstellten „nationalen Alleingangs“ die prozentualen Rückgänge bei den indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die sich im Bereich der inländischen Vorleistungskäufe ereignen, auch um ein Vielfaches höher aus als bei den Vorleistungskäufen aus dem Ausland. Die Fokus-Industrien importieren bspw. im Jahr 2030 im Szenario „Deutschland geht voran“ 126 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> aus dem Ausland; im „BaU-Szenario“ 2030 sind es 136 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> (Tabelle 22), im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ lediglich 100 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> (Tabelle 15). Gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 beträgt der Rückgang der indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Ausland im Szenario „Deutschland geht voran“ also lediglich sieben Prozent, im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ hingegen knapp 27 Prozent; der Rückgang der indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Inland im Szenario „Deutschland geht voran“ beträgt hingegen fast 14 Prozent, im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ knapp 25 Prozent. Relativ betrachtet wird der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Deutschland geht voran“ vor allem durch die inländischen Lieferketten getragen („nationaler Alleingang“!), während diese Rückgänge im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ fast im gleichen Verhältnis durch Rückgänge bei den inländischen und ausländischen Vorleistungen erbracht wurden. Von allen drei Abweichungsszenarien sind die CO<sub>2</sub>-Effekte im Szenario „Deutschland geht voran“ mit Abstand am geringsten.

Abbildung 128  
Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Tonnen CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output



Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Die nachfolgende Abbildung 129 gibt die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Intensität gegenüber dem „BaU-Szenario“ 2030 noch einmal gebündelt für die drei Branchencluster wieder.

Szenario 4

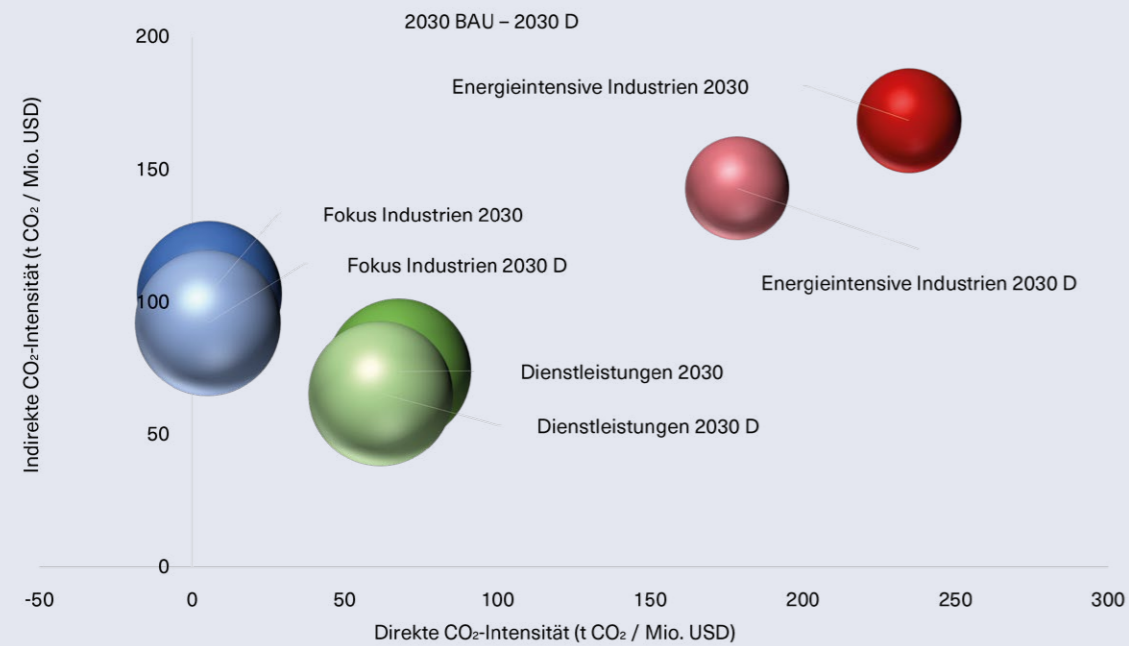
Energiesystem

Technologien

Effekte

Auswirkungen

Abbildung 129  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**



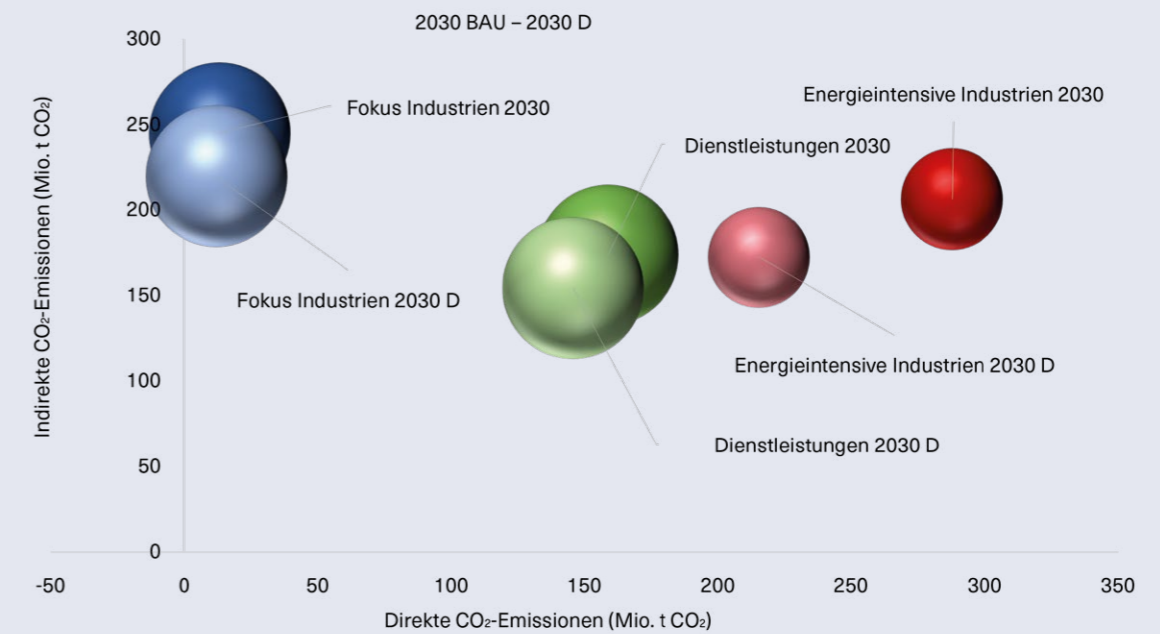
CO<sub>2</sub>-Intensität „BaU-Szenario“ 2030      CO<sub>2</sub>-Intensität Szenario „Deutschland geht voran“ 2030 („2030 D“)

Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio. USD für D im Jahr 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Auch im Szenario „Deutschland geht voran“ sinkt in allen Branchenclustern die CO<sub>2</sub>-Intensität gegenüber dem „BaU-Szenario“ des Jahres 2030. Dieser Rückgang resultiert aus einem absoluten Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen und nicht allein aus einer gestiegenen Produktion, wie die nachfolgende Abbildung 130 sowie die Tabelle 20 und die Tabelle 21 zeigen. Allerdings sind bei einem isolierten deutschen Vorgehen die Rückgänge bei den CO<sub>2</sub>-Intensitäten und den absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen über die Branchen und Branchencluster deutlich weniger stark ausgeprägt als in den beiden anderen Abweichungsszenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Europa geht voran“.

Abbildung 130  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**



CO<sub>2</sub>-Emissionen „BaU-Szenario“ 2030      CO<sub>2</sub>-Emissionen Szenario „Deutschland geht voran“ 2030 („2030 D“)

Hinweis: Die Größe der Kreise gibt den Output der Branchencluster in Mio. USD für D im Jahr 2030 an.

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Tabelle 20  
**Vergleich der CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)**

	2030 „BaU“			2030 „Deutschland geht voran“		
	gesamt	direkt	indirekt	gesamt	direkt	indirekt
<b>CO<sub>2</sub>-Intensitäten (t CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output)</b>						
Energieintensive Industrien	403	235	169	321	179	143
Fokus-Industrien	109	6	103	97	5	92
Ausgewählte Dienstleistungen	142	68	74	127	62	65

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

**Szenario 4**

- Energiesystem
- Technologien
- Effekte
- Auswirkungen

Tabelle 21  
**Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>**

2030		Energieintensive Industrien	Fokus-Branchen	Ausgewählte Dienstleistungen
„BaU“	direkt	288	13	159
	indirekt	207	245	174
	davon Ausland	85	136	64
	<b>gesamt</b>	<b>494</b>	<b>258</b>	<b>333</b>
„Deutschland geht voran“	direkt	215	12	146
	indirekt	172	220	155
	davon Ausland	78	126	60
	<b>gesamt</b>	<b>388</b>	<b>232</b>	<b>300</b>

Quelle: Eigene Berechnungen TwinEconomics (Datenbasis: GWS)

Tabelle 22  
**Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (2030 und 2040); in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>**

	Energieintensive Industrien		Fokus-Branchen		Ausgewählte Dienstleistungen		
	Business as Usual	Deutschland geht voran	Business as Usual	Deutschland geht voran	Business as Usual	Deutschland geht voran	
2030	CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	45	35	3	3	24	22
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	11	10	10	13	11
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	35	24	7	7	8	7
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	49	35	25	26	12	11
	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>146</b>	<b>105</b>	<b>44</b>	<b>46</b>	<b>57</b>	<b>51</b>
2040	CO <sub>2</sub> -Emissionen direkt	42	24	3	2	20	16
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Bayern	17	9	10	9	14	9
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Restdeutschland	37	19	7	6	9	6
	CO <sub>2</sub> -Emissionen indirekt Ausland	53	30	27	23	14	10
	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>148</b>	<b>82</b>	<b>48</b>	<b>40</b>	<b>57</b>	<b>41</b>

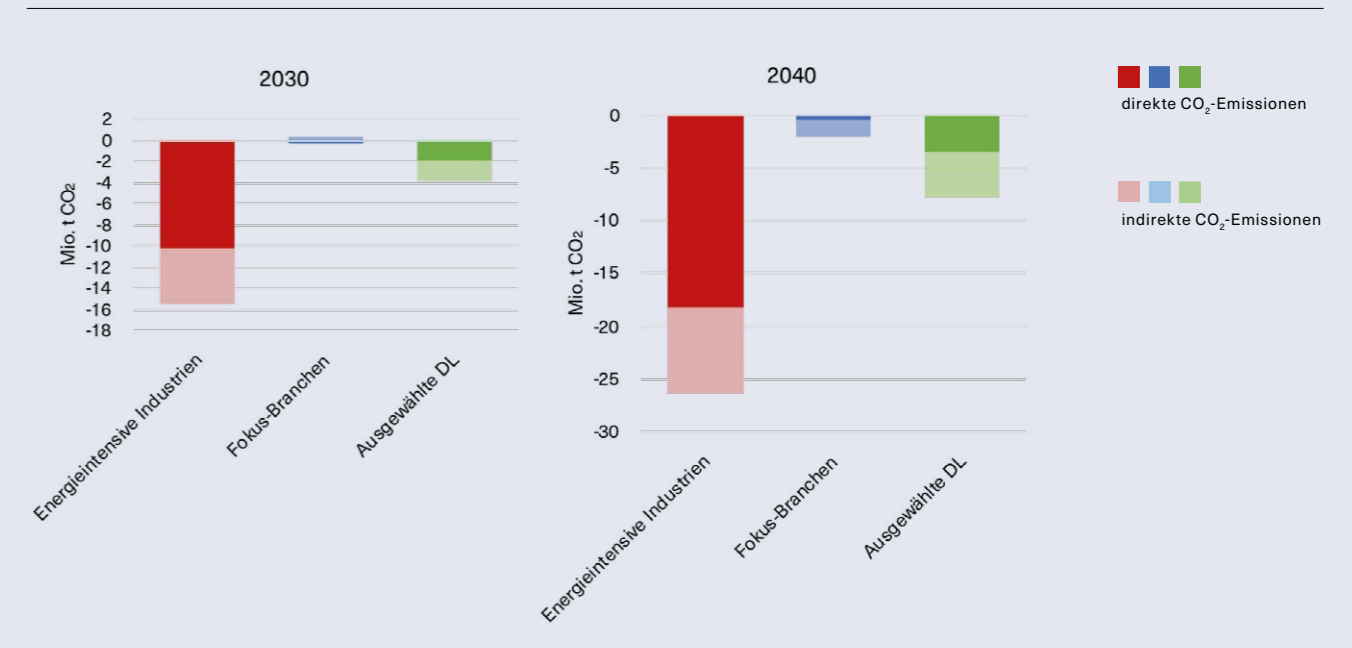
Quelle: TwinEconomics

**Effekte in Bayern**

Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Bayern folgt im Wesentlichen der deutschlandweiten Entwicklung. Auffällig ist, dass Klimaschutzmaßnahmen, wenn sie nur von Deutschland forciert werden, de facto fast ausschließlich in den energieintensiven Industrien ankommen und hier positive Veränderungen zeigen, wohingegen in den Fokus-Branchen und ausgewählten Dienstleistungen kaum ein bzw. kein nennenswerter Effekt zu verzeichnen ist.

Aus Gründen der Vollständigkeit werden die entsprechenden Ergebnisse hier wiederum sowohl tabellarisch (Tabelle 22) als auch grafisch (Abbildung 131) dargestellt.

Abbildung 131  
**Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ nach Branchenclustern (2030 und 2040)**



Quelle: TwinEconomics



# V

## Technologische Positionierung Bayerns sowie Game-Changer-Technologien

Der Studienteil analysiert die Positionierung Bayerns in den zentralen Klimaschutztechnologien. Als Grundlage zur Identifikation der zentralen Klimaschutztechnologien dienen die Erkenntnisse aus den beiden vorangegangenen Studienteilen.

### Kapitel in der Übersicht

01	Positionierung Bayerns	272
01.1	Grundlage für die Analyse	272
01.2	Clusterung der Klima-Technologien	274
01.3	Positionierung Bayern in den klimarelevanten Technologie-Clustern	277
01.4	Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Technologie-Clustern im internationalen Vergleich	287
01.5	Positionierung Bayern in den klimarelevanten Leuchtturmtechnologien	292
01.6	Die Entwicklung der Digitalisierung in den Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien	296
01.7	„Klima-Innovationsbranche“ Bayern	311
02	Game-Changer-Technologien	314
02.1	Sektorübergreifende Game Changer	315
02.2	Sektorspezifische Game Changer	318

# 01 Positionierung Bayerns

**Deutschland und Bayern sind im weltweiten Innovationsrennen der wichtigsten Klimaschutz- und Klimaanpassungstechnologien sehr gut positioniert.**

## Inhalte

01.1	Grundlage für die Analyse	272
01.2	Clusterung der Klima-Technologien	274
01.3	Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Technologie-Clustern	277
01.4	Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Technologie-Clustern im internationalen Vergleich	287
01.5	Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Leuchtturmtechnologien	292
01.6	Die Entwicklung der Digitalisierung in den Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien	296
01.7	„Klima-Innovationsbranche“ Bayern	311

## 01.1 Grundlage für die Analyse

Im Rahmen dieser Studie wurden in einem mehrstufigen Verfahren insgesamt 62 Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien<sup>304</sup> identifiziert, definiert und quantifiziert (Tabelle 23). Ziel ist es, auf Basis einer umfangreichen Patentanalyse Technologien zu identifizieren, die dem Klimawandel und seinen Auswirkungen entgegenwirken können und in denen Bayern einen substantziellen Beitrag leisten kann. Dazu wurde ein neuer Patentanalyseansatz verwendet, der den Fokus auf Stärke und Qualität legt.

### Stärke des Portfolios

Der rechtliche Status der Patente wird berücksichtigt, um alle gültigen Patente und hängigen Anmeldungen identifizieren zu können. Die Summe dieses aktiven Patentportfolios zeigt die Stärke eines Unternehmens, einer Region oder eines Landes in einer Technologie. Klassische Patentanalysen konzentrieren sich auf die Dynamik und verwenden in der Regel nur die Neuanmeldungen pro Jahr. Ob diese Anmeldungen überhaupt weiterverfolgt werden, wie viele Anmeldungen zurückgezogen oder abgelehnt werden, spielt in der klassischen Perspektive keine Rolle.

### Qualität des Portfolios

Während klassische Patentanalysen die Anzahl der Anmeldungen im Blick haben, konzentriert sich der neue EconSight-Ansatz auf die Qualität der Patente (Kasten 29). Nationale Unterschiede in den Patentsystemen führen dazu, dass bspw. in China – politisch motiviert und finanziell subventioniert – massiv patentiert wird. Entsprechend kamen im Jahr 2018 75 Prozent aller Patentanmeldungen weltweit aus China (rund 1,5 Mio. von insgesamt rund zwei Mio. Patentanmeldungen). Der EconSight-Ansatz umgeht die Patentmasse und fokussiert auf die Weltklassepatente (die besten zehn Prozent aller Patente).

Tabelle 23  
**Überblick über die 62 identifizierten Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien, alphabetisch sortiert**

3D-Druck	Intelligente Stromnetze
3D-Druck oder Robotereinsatz im Bau	Intelligentes Glas
Abfallmanagement	Intelligentes, vernetztes Haus
Anpassungstechnologien im Bau und in der Infrastruktur	Kernfusionsreaktoren
Anpassungstechnologien in der Gesundheitsvorsorge	Kondensatorspeicher
Anpassungstechnologien in der Landwirtschaft	Ladeinfrastruktur in und um Fahrzeuge
Bauwerksdatenmodellierung	Lithium-Akkumulatoren
Biopolymere	Meeresenergie
Biotreibstoffe, Biomasse	Micro-LEDs
Brennstoffzelle	Nachhaltige Schiffsantriebe
CO <sub>2</sub> -Filter, -Abscheidung, -Bindung	Nachhaltige Verpackungen
Edge/ Steuerung und Software in Endgeräten	OLEDs
Effiziente Glas- und Keramikproduktion	Organische Solarzellen, Tandem- und Perovskitzellen
Effiziente Industrieproduktion in Chemie, Petrochemie, Textil u. a.	Photovoltaik, AC/DC-Wandler
Effiziente Metallproduktion	Polymerelektrolytbrennstoffzelle
Effizientere Verbrennungsmotoren	Präzisionslandwirtschaft
Elektrisches/hybrides Fliegen	Recycling, Wiederaufbereitung
Elektrofahrzeuge	Reinraumlandwirtschaft
Emissionsreduzierende Tierfutter	Silizium-Photovoltaikzellen
Energieeffiziente Computer-Hardware	Solarthermie
Energieeffiziente Gebäude-, Beleuchtungs- und Büroelektronik	Stickoxidfilter
Energieeffiziente Gebäudetechnik	Supraleiter
Energieeffiziente Haushaltsgeräte	Synthetische Treibstoffe
Energieeffiziente Netzwerktechnologie	Torrefaction, Pyrolyse, Biokohlenstoff
Energiespeicher, Wärme, Mechanisch, Druck	Treibhausgas-Managementsysteme
Feststoffakkumulator	Treibhausgasärmere Zementproduktion
Fleischalternativen	Urbane Logistik und automatisierte Lagerwirtschaft
Geothermie	Verkehrslitsysteme und vernetzter Verkehr
Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	Vernetzte Fabrikation
Hyperloop und Magnetschwebbahnen	Wasserstoff-Herstellung mit erneuerbaren Energien
Industrielle Wasseraufbereitung	Windenergie

Quelle: EconSight, 2020

## Kasten 29

## Messung der Patentqualität

Um die Qualität der einzelnen Patente zu bestimmen, werden die Marktabdeckung und die technologische Relevanz anhand des Patentbewertungsansatzes der PatentSight GmbH ermittelt. Die Marktabdeckung berechnet die weltweite gesetzliche Abdeckung des Patentschutzes. Entscheidend ist, für wie viele Länder Schutzrechte gelten (Größe und Ausdehnung der Patentfamilie). Sie zeigt, wie Unternehmen und staatliche Forschungseinrichtungen die Bedeutung ihrer eigenen Erfindung bewerten. Je größer die Zahl der Länder, in denen das Patent angemeldet wird, desto teurer wird der Patentschutz. Eine breitere internationale Marktabdeckung signalisiert also, dass der Patentanmelder sein Patent für vielversprechend hält (Eigeneinschätzung). Die technologische Relevanz des Patents ergibt sich daraus, wie oft die Prüfer der verschiedenen Patentämter darauf Bezug nehmen und es zitieren. Prüfer der verschiedenen Patentämter prüfen nach verhältnismäßig ähnlichen Methoden, ob eine Patentanmeldung neu und erfinderisch

ist und ziehen dazu andere, bereits publizierte Patente heran. Daraus wird ersichtlich, wie wichtig eine Erfindung im Vergleich zu anderen Patenten in derselben Technologie ist (Fremdeinschätzung). Die Kombination aus Marktabdeckung und technologischer Relevanz („individuelle Patentstärke“) lässt darauf schließen, welche Auswirkung eine Patentfamilie auf den Wettbewerb hat.

Die relative Bewertung der weltweiten Patente anhand der individuellen Patentstärke erlaubt eine quantifizierbare Einteilung in wichtige Patente und weniger wichtige Patente. Dadurch werden die oben beschriebenen Verzerrungen im Patentsystem umgangen. EconSight legt den Schwerpunkt der Analyse auf die sogenannten Weltklassepatente: die besten zehn Prozent aller Patente innerhalb einer definierten Technologie, gemessen an der individuellen Patentstärke. Anschließend können diese Patente Ländern, Regionen und Unternehmen zugeordnet werden.

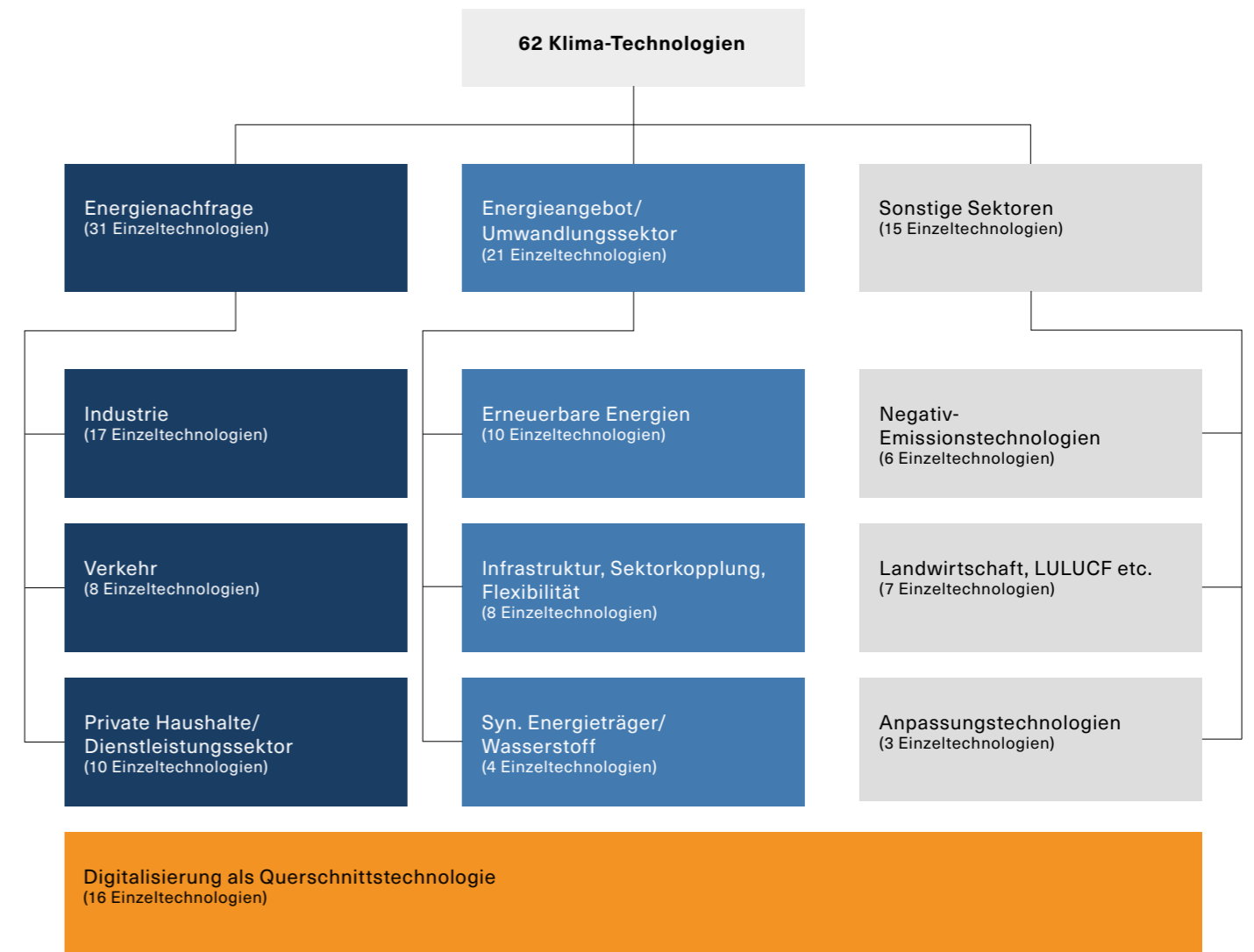
Der wesentliche Indikator für die Einordnung der technologischen Aktivitäten Bayerns und der Referenzländer ist der Anteil der bayerischen Weltklassepatente an der globalen Summe der Weltklassepatente in einer Technologie – der Weltanteil. Die Dynamik wird über die Anteilsveränderung zwischen 2015 und 2019 gemessen. Die Analysen werden für Bayern, Deutschland und weitere ausgewählte Länder für die folgenden 62 Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien durchgeführt.

## 01.2 Clusterung der Klima-Technologien

Bei der Auswertung von Technologien sollte immer in Systemen gedacht werden. Die Chancen einer Technologie, sich erfolgreich auf einem Markt durchzusetzen, hängen von den Eigenschaften der Technologie und der Systemumgebung ab. Das biologische Ökosystem kann hier als Analogie gelten. Bestimmte Tiere und Pflanzen können unter bestimmten Boden-, Klima- und anderen Bedingungen sehr gut gedeihen und unter anderen nicht. Aufgrund der systemischen Vernetzungen ist die Auswertung und Positionsbestimmung von Einzeltechnologien vergleichsweise wenig aussagekräftig. Daher erfolgt eine Clusterung der einzelnen Klima-Technologien angelehnt an die Sektoren der Energie- bzw. Treibhausgas-Bilanz. Dabei ist eine trennscharfe Zuordnung aufgrund der wachsenden Bedeutung von Querschnittstechnologien (v. a. der Digitalisierung) in einigen Fällen nicht möglich, sodass einige Klima-Technologien mehreren Clustern zugeordnet werden (Abbildung 132). Als Querschnitts- bzw. Basistechnologie fungiert allen voran die Digitalisierung, die die Entwicklungen in anderen Sektoren zunehmend prägt und so als zusätzlicher Technologietreiber wirkt (Abbildung 45). Bei der Diskussion der einzelnen Cluster in den folgenden Abschnitten werden auch die in den Clustern enthaltenen Technologien benannt und dargestellt.

Abbildung 132

## Clusterung der Klima-Technologien nach Sektoren der Treibhausgas-Bilanz



Da einige Klima-Technologien mehreren Clustern zugeordnet sind, stimmen die Summen in den Oberkategorien und Clustern nicht überein.

Quelle: Prognos; eigene Darstellung Prognos, 2020

## Hinweis

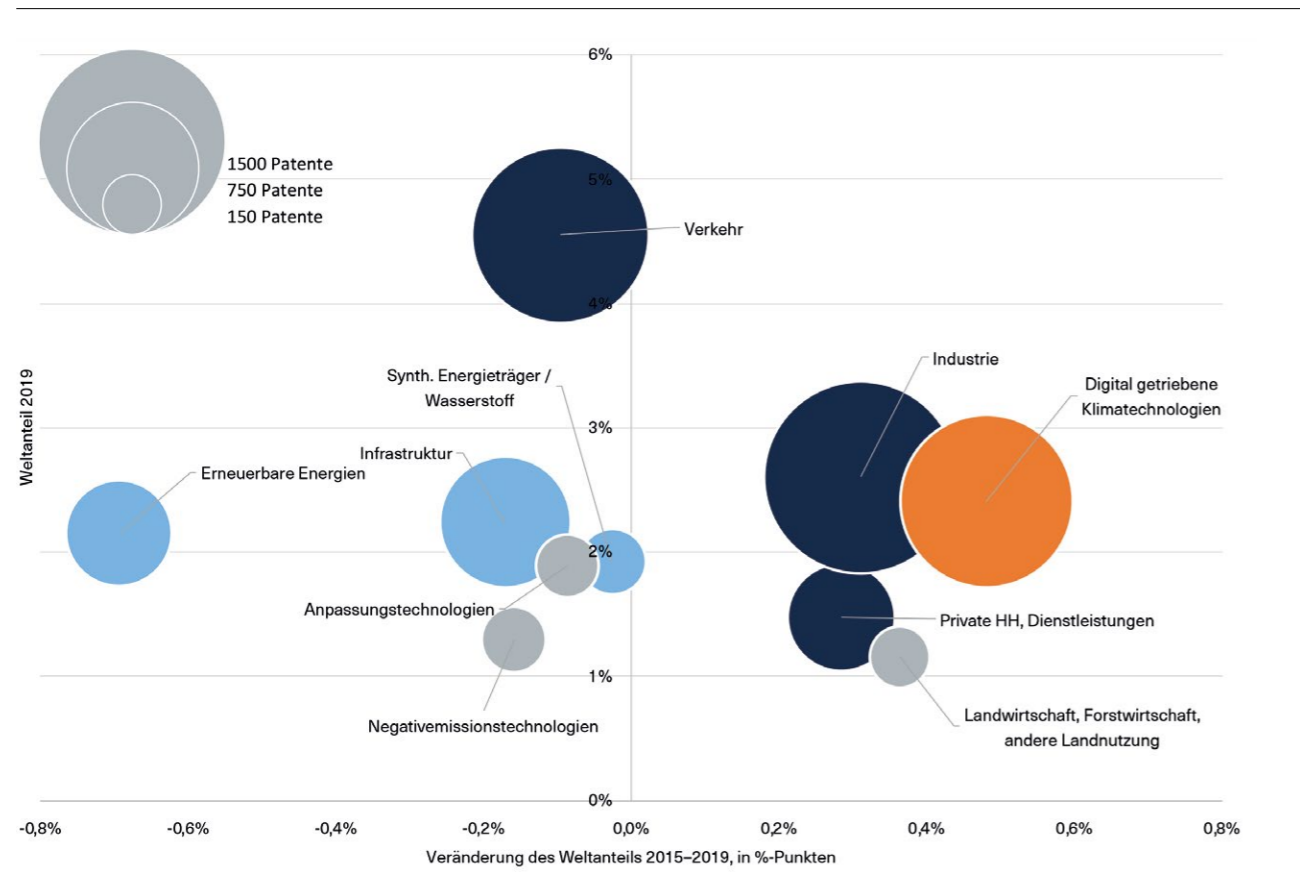
Die farbliche Unterscheidung der Abbildungen 133 bis 158 auf den folgenden Seiten bezieht sich auf Energienachfragetechnologien (dunkelblau), Energieangebotstechnologien (hellblau), sonstige Technologien (grau) und digital getriebene Technologien (orange).

Die Clusterung der Klima-Technologien ergibt umgesetzt in die Patentanalyse mit der gewählten Indikatorik, bestehend aus Weltanteil (Niveau) – d. h. Anteil der bayrischen Patente in einer Technologie oder einem Technologiecluster an der weltweiten Gesamtanzahl der Weltklassepatente in dieser Technologie –, Veränderung des Weltanteils (Dynamik) und absoluter Anzahl der Weltklassepatente (Kugelgröße), ein differenziertes Bild.<sup>305</sup>

Im Folgenden wird die Perspektive Bayerns eingenommen, es werden also die Weltanteile und Veränderungen der Weltanteile der jeweils in Bayern angemeldeten Weltklassepatente in den jeweiligen Technologien bzw. Clustern beschrieben.

Es zeigt sich, dass der bayerische Weltanteil der Cluster im Sektor Energieangebot in den letzten fünf Jahren gesunken ist und aktuell (2019) zwischen 1,9 Prozent und 2,2 Prozent liegt (Abbildung 133). In den Energienachfrageclustern ist in den letzten fünf Jahren eine deutlich positivere Dynamik zu verzeichnen und auch die Weltanteile liegen zum Teil deutlich über dem Anteil der Technologiecluster im Sektor Energieangebot. Die sonstigen Technologien liegen, bezogen auf den Weltanteil, unter zwei Prozent. Im Cluster der digital getriebenen Technologien kann Bayern die stärkste Zunahme des Weltanteils verzeichnen. Neben ihrem Beitrag zum Klimaschutz ist die Digitalisierung auch ein bedeutender Energieverbraucher (Kasten 30).

Abbildung 133 Cluster-Struktur Bayerns



Quelle: EconSight, 2020

305 In der Patentanalyse kann zwischen zwei Perspektiven unterschieden werden: der Erfindersicht und der Eigentümersicht. In der Regel werden Patentanalysen mit der Erfindersicht durchgeführt, um die Kompetenz des Standorts zu zeigen. Auch diese Analyse wird aus Sicht der Erfinder durchgeführt, d. h. sämtliche Patente, die mindestens einen Erfinder mit Wohnsitz in Bayern beinhalten, werden Bayern zugeordnet. Patente, die komplett außerhalb Bayerns erfunden worden sind (ohne Erfinder mit Wohnort in Bayern), werden nicht Bayern zugeordnet.

Im Detail zeigt sich, dass Bayern den absolut höchsten Weltanteil mit 4,6 Prozent im Verkehrcluster erreicht, gefolgt vom Industriecluster mit 2,6 Prozent. Das bedeutet, dass Unternehmen und Forschungsinstitutionen in Bayern 4,6 Prozent aller Weltklassepatente in den klimarelevanten Verkehrstechnologien entwickeln. Der Anteil ist leicht rückläufig, was sich mit der globalen Zunahme dieser Techno-

logien begründen lässt. Eine detaillierte Analyse der Position Bayerns im internationalen Clustervergleich erfolgt im übernächsten Kapitel. Im folgenden Kapitel wird zuerst auf die Cluster in Bayern im Detail eingegangen. Dabei wird u.a. der vergleichsweise niedrige und zudem rückläufige Weltanteil in den erneuerbaren Energien beleuchtet.

### 01.3 Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Technologie-Clustern

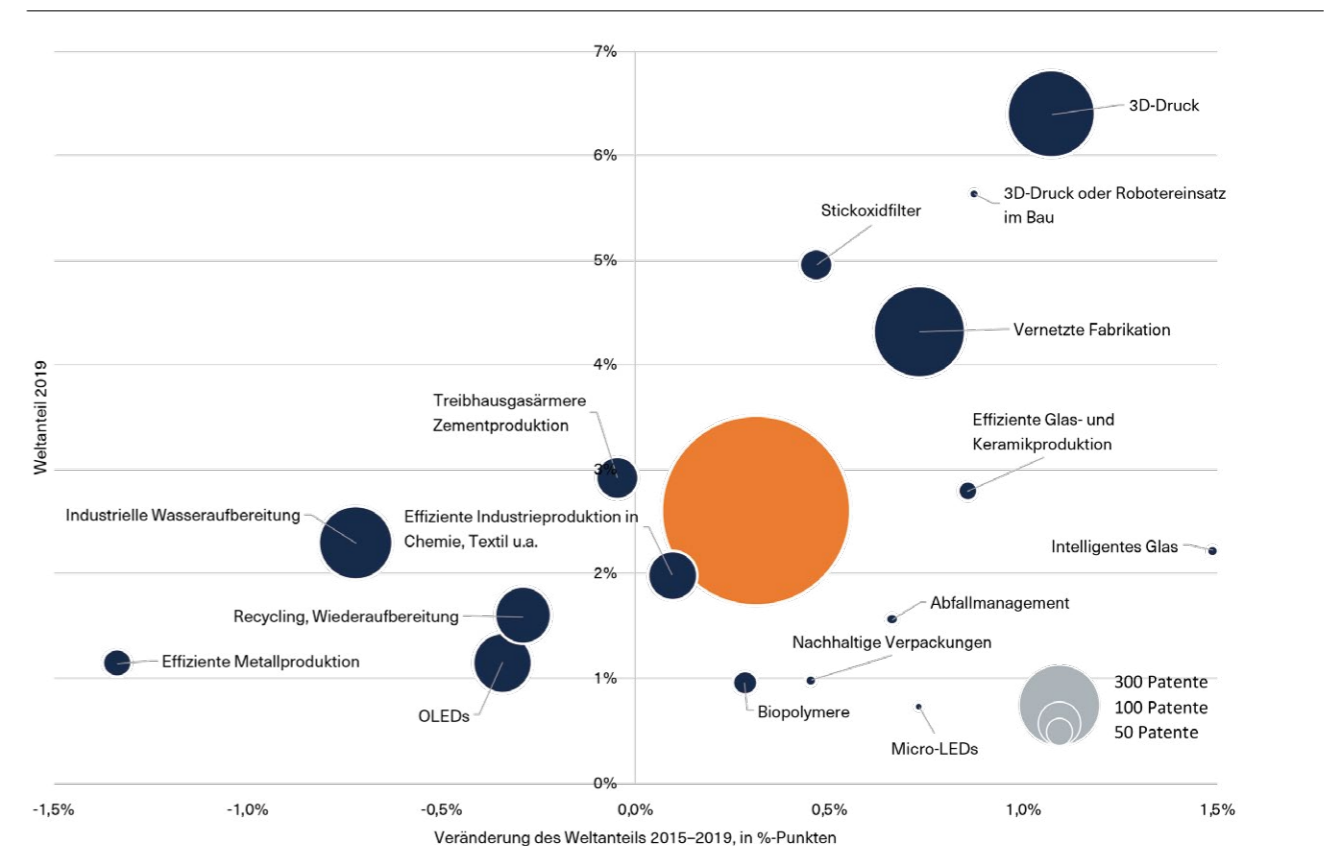
Mittels der bereits eingeführten Systematik, bestehend aus Weltanteil (Niveau), Veränderung des Weltanteils (Dynamik) und absoluter Anzahl der Weltklassepatente (Kugelgröße), werden im Folgenden die einzelnen Cluster (orange) mit den jeweils zugeordneten Einzeltechnologien (blau) dargestellt und analysiert. Zur vereinfachten Orientierung können die Abbildungen gedanklich in Quadranten unterteilt werden, sodass oben rechts in der Regel gut positionierte und wachsende Technologien stehen, während unten links weniger gut positionierte Technologien mit

rückläufiger Dynamik stehen. Auf die wesentlichen Entwicklungen und Technologien wird im folgenden Kapitel eingegangen, grundlegende Informationen wie Beschreibungen zu allen Technologien finden sich zudem im Anhang.

#### Energienachfrage

Im Bereich der Energienachfrage sind drei Cluster gemäß der Struktur der Treibhausgas-Bilanz definiert worden: Industrie, Verkehr und Private Haushalte / Dienstleistungen.

Abbildung 134 Position Bayerns im Cluster Industrie



Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

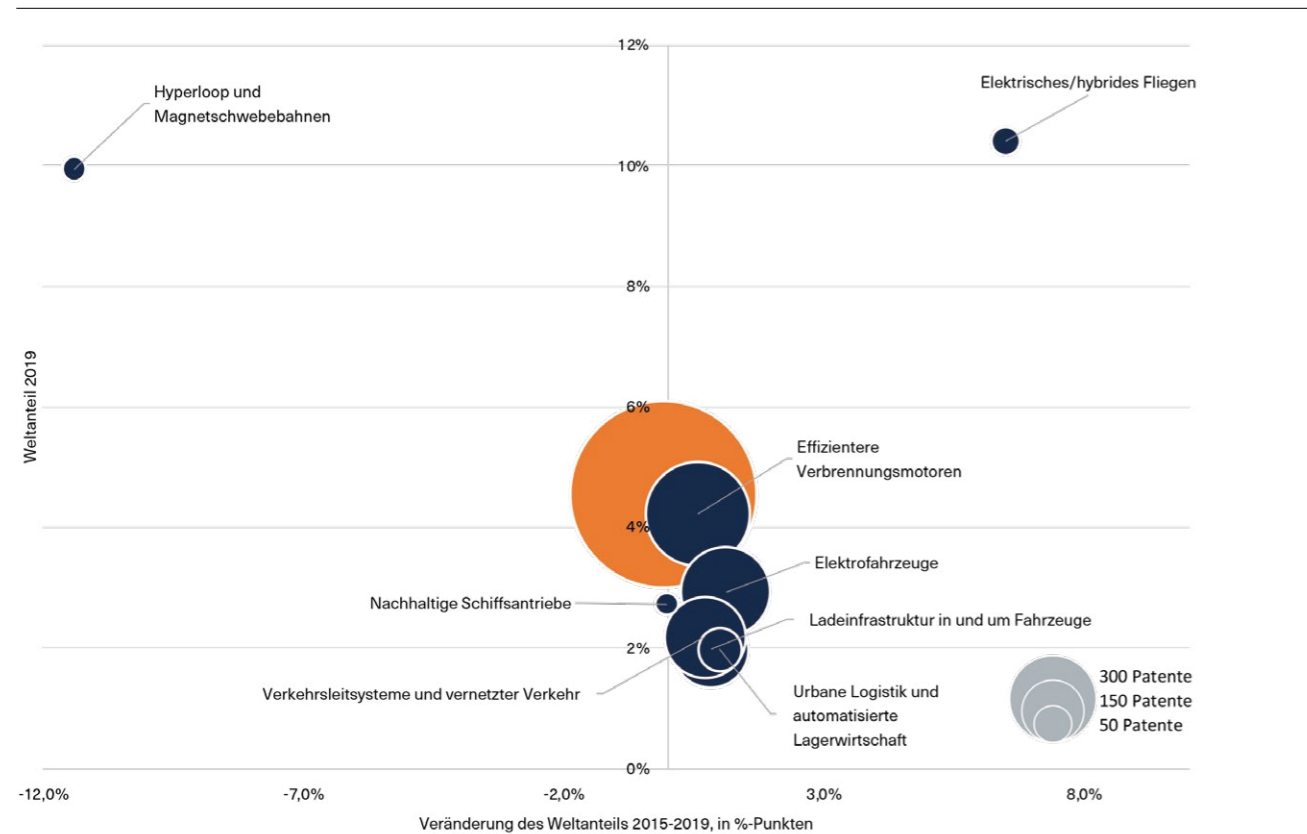
Quelle: EconSight, 2020

Die bereits thematisierte gute Positionierung Bayerns im Clustervergleich in der Industrie basiert auf den Einzeltechnologien 3D-Druck und der Vernetzung der industriellen Fabrikation (Abbildung 134). 3D-Druck ist wesentlich für den Klimaschutz, weil er einerseits ein großes Potenzial beinhaltet, Industrieprozesse aufgrund passgenauer Fertigung effizienter, vor allem ressourceneffizienter, durch weniger Ausschuss und Abfall zu machen. Auch die angehängten Logistik- und Organisationsprozesse werden verschlankt, was zu Einsparungen im Güterverkehr führt. Darüber hinaus ist der 3D-Druck ein wichtiges Verfahren, um Teile wichtiger Klimaschutztechnologien anforderungsgerecht, effizient und kostengünstig zu produzieren. Im 3D-Druck erreicht Bayern einen Weltanteil von 6,4 Prozent und in der vernetzten Fabrikation einen Weltanteil von 4,3 Prozent. Diese Werte sind im Vergleich aller 62 analysierten Technologien Spitzenwerte (Platz 3 und Platz 7) und zeigen die Bedeutung der Industrie sowie der übergreifenden Innovationen im Industriesektor in Bayern. Auch bei

Stickoxidfiltern (verschiedene Technologien zur Reduktion oder Filterung von NOX, N<sub>2</sub>O und anderen höheren Gasen) ist Bayern mit einem wachsenden Weltanteil von gegenwärtig fünf Prozent gut positioniert. Die im Vergleich geringere Patentmenge im Bereich der Stickoxidfilter ist der grundsätzlich geringeren Patentintensität und geringeren Anwendungsbreite der Technologie geschuldet. (Stickoxidfilter sind eine fahrzeug- und verbrennungsbezogene Technologie, im Vergleich zu den digitalorientierten Technologien, die übergreifend bei sehr vielen verschiedenen Produktionsprozessen Anwendung finden können.)

Auffällig ist weiterhin die diverse Positionierung der verschiedenen klimarelevanten Forschungsaktivitäten in den energieintensiven Produktionsbereichen Glas, Keramik, Chemie, Textil, Metall und Zement. Die höchsten Weltanteile erreicht Bayern in der effizienten Glas- und Keramikproduktion sowie in der treibhausgasärmeren Zementproduktion.

Abbildung 135  
Position Bayerns im Cluster Verkehr

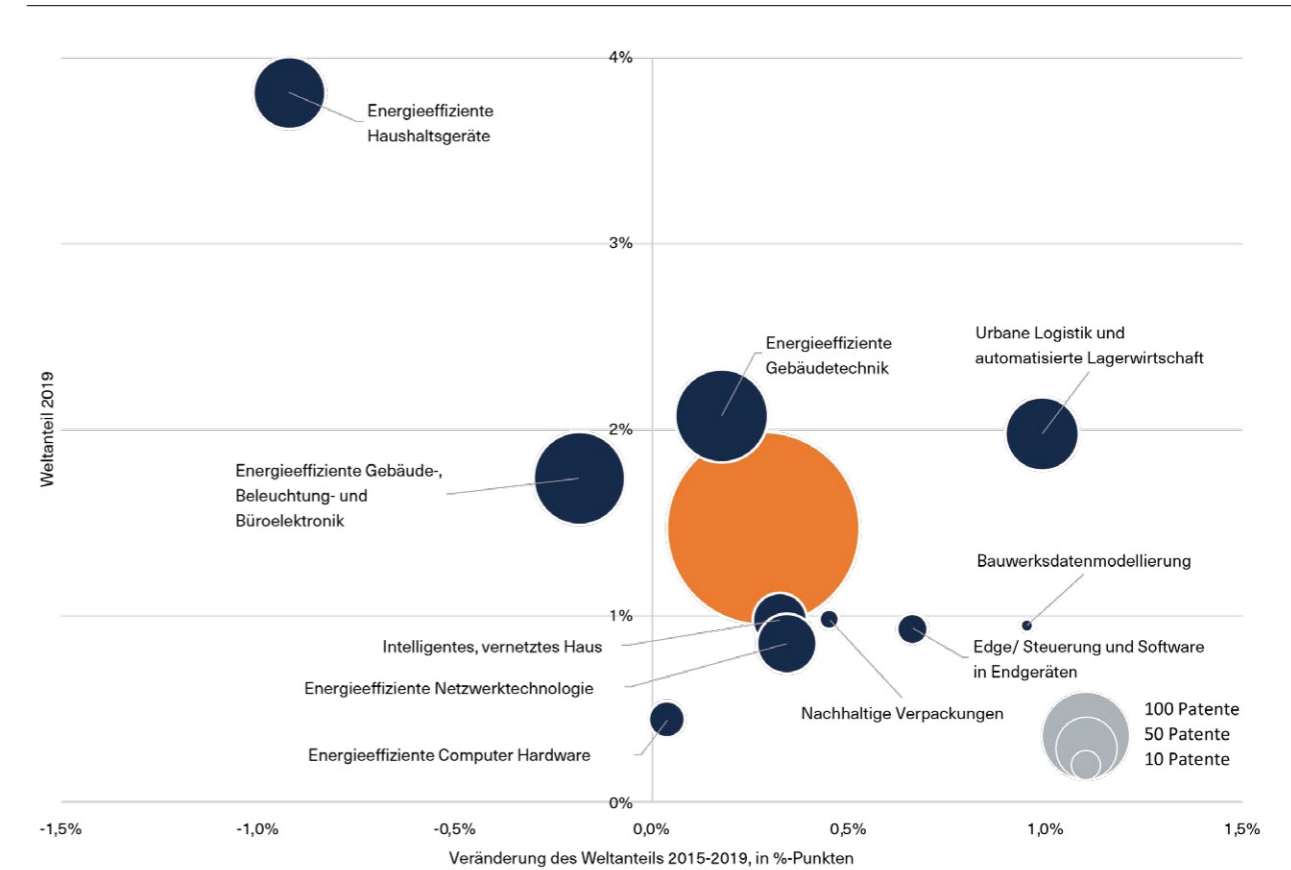


Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

Im Cluster Verkehr dominieren die Fahrzeugtechnologien Elektrofahrzeuge, Ladeinfrastruktur, effizientere Verbrennungsmotoren und vernetzter Verkehr (Abbildung 135). In diesen Technologien kann Bayern steigende Weltanteile verzeichnen. In der Erforschung effizienterer Verbrennungsmotoren hat Bayern den höchsten Weltanteil innerhalb dieser Technologien. Außerdem hat Bayern sehr hohe Weltanteile im elektrischen/hybriden Fliegen und in Hyperloop-Technologien.

Abbildung 136  
Position Bayerns im Cluster Private Haushalte und Dienstleistungssektor



Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

Im Cluster Private Haushalte und Dienstleistungen fällt die energieeffiziente Forschung in den Bereichen Haushaltsgeräte, Gebäudetechnik, -elektronik und -beleuchtung ins Auge (Abbildung 136). In diesen Technologien erreicht Bayern vergleichsweise hohe Weltanteile, wenn auch zum Teil mit nachlassender Dynamik. Insbesondere die effiziente Gebäudetechnik ist unabdingbar für die Wärmewende und die Transformation im Gebäudebereich zu hohen und höchsten Effizienzstandards sowohl im Neubau als auch im Bestand. Hier besteht der künftige Markt aus sämtlichen Gebäuden; das ökonomische Potenzial ist also erheblich.

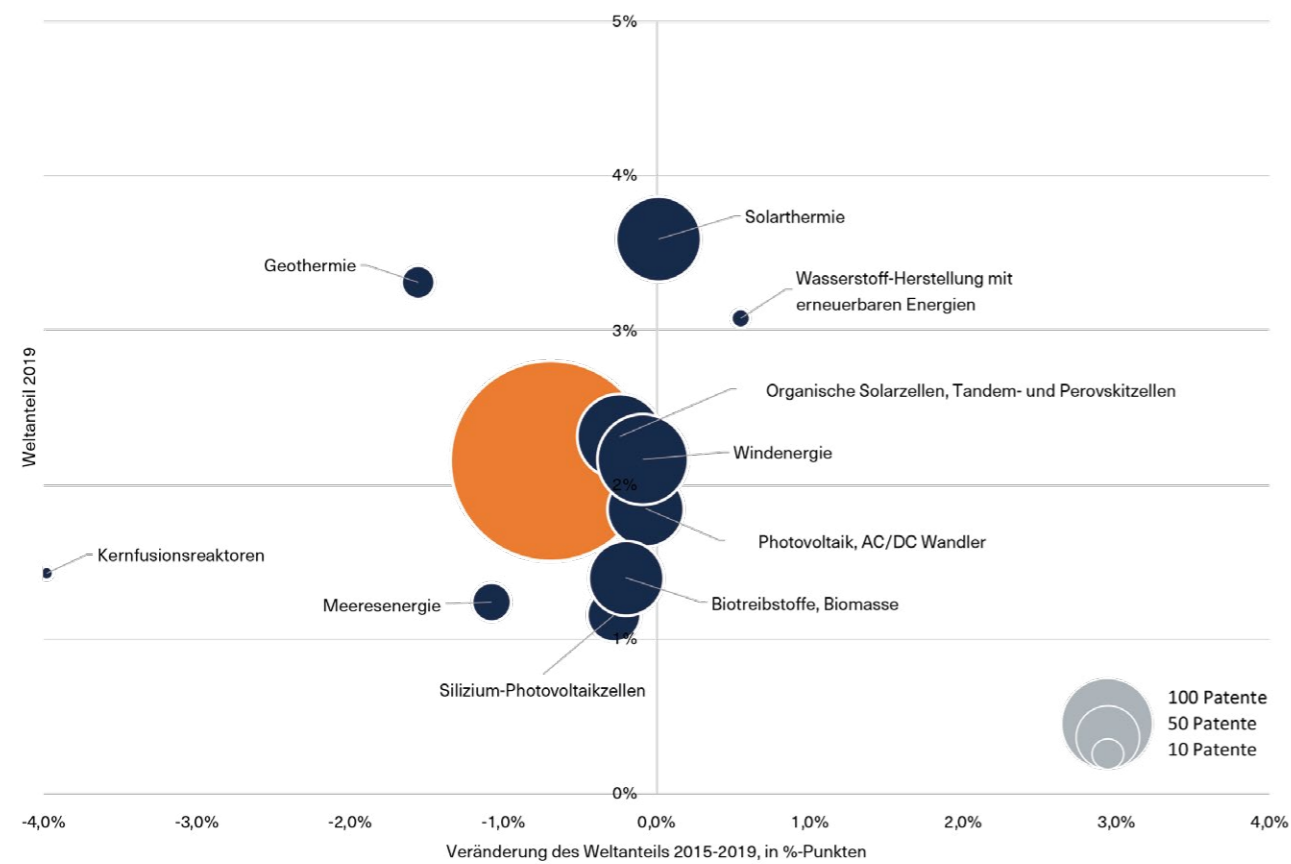
Die bereits im Cluster Verkehr gezeigte urbane Logistik und Lagerwirtschaft weist mit einer Verdopplung des Weltanteils auf zwei Prozent innerhalb der letzten fünf Jahre den größten Sprung auf.

**Energieangebot**

Im Bereich des Energieangebots sind ebenfalls drei Cluster definiert worden, die eine pragmatische Sicht auf den sich verändernden Energie- und Umwandlungssektor widerspiegeln: Erneuerbare Energien, Infrastruktur / Sektorkopplung / Flexibilität und Synthetische Energieträger / Wasserstoff.

Abbildung 137

## Position Bayerns im Cluster Erneuerbare Energien



Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

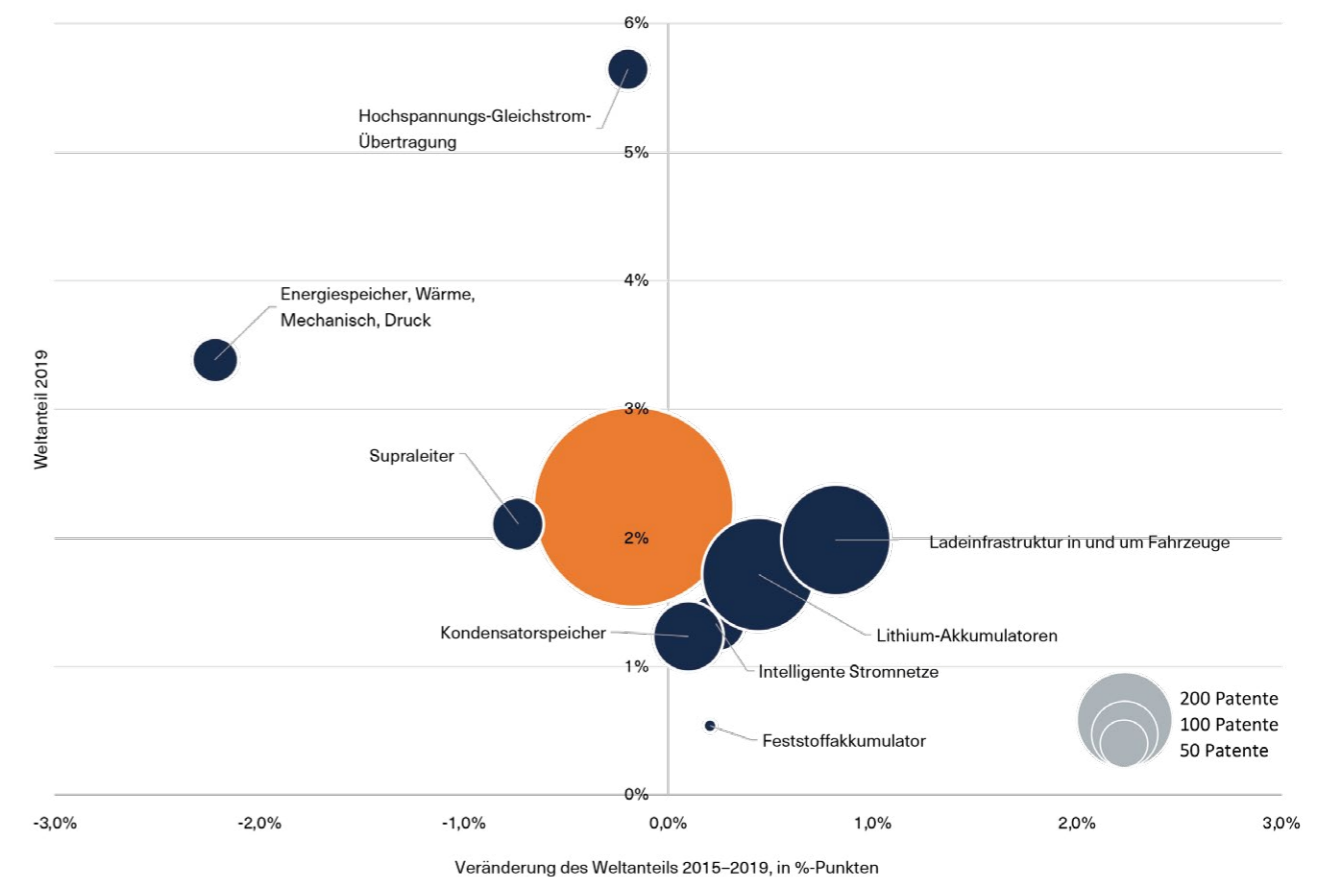
Die bereits in der Einleitung erwähnte rückläufige Entwicklung des Weltanteils in den letzten fünf Jahren zeigt sich in der Mehrzahl der hier eingeordneten Technologien (Abbildung 137). Allerdings ist der deutliche Rückgang des Gesamtclusters der negativen Entwicklung in den Kernfusionsreaktortechnologien geschuldet.<sup>306</sup> Der Rückgang in der Kernfusion selbst ist wiederum den abnehmenden Forschungsaktivitäten einiger weniger Unternehmen geschuldet. Von besonderer Bedeutung ist einerseits die rückläufige Entwicklung in den organischen Solarzellen und in der Windenergie – beides Technologien mit hohen Erwartungen. Zwar haben die Weltklassepatente in der Windenergie in Bayern in den letzten fünf Jahren um knapp 30 Prozent zugenommen, aber die globale Entwicklung war mit 35 Prozent noch dynamischer, was zum abnehmenden Weltanteil führt. In den organischen Solarzellen ist die absolute Patentmenge in Bayern in den letzten Jahren leicht rückläufig in einem seit 2017 stagnierenden globalen Technologieumfeld. Andererseits zeigt sich, dass

<sup>306</sup> Der Weltanteil des Gesamtclusters wird als Durchschnitt der Weltanteile der Einzeltechnologien berechnet. Die Dynamik als Veränderung des Weltanteils in Prozentpunkten. Ein deutlich negativer Ausreisser wie die Kernfusionsreaktortechnologien wirkt sich in diesem Fall stark aus. Allerdings darf diese Einordnung nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Mehrzahl der hier betrachteten Technologien in den letzten fünf Jahren Weltanteile eingebüsst hat, da trotz zunehmender Patentmengen in Bayern die weltweite Dynamik grösser war. Die grundsätzliche Entwicklung der Cluster-Aggregation bestätigt somit die Entwicklungen in den Einzeltechnologien.

Bayern in der gegenwärtig stark diskutierten Wasserstoff-Herstellung mit erneuerbaren Energien bereits einen hohen Weltanteil erreicht hat und diesen in den letzten Jahren noch deutlich ausbauen konnte. Der Anteil bei der Solarthermie ist vergleichsweise hoch und die Position konnte gehalten werden. Solarthermie deckt ein relativ breites Feld an Energieformen ab – mit einfachen Anlagen kann Niedertemperaturwärme erzeugt werden, mit komplexeren Vakuumkollektoren auch Mitteltemperaturwärme bzw. Dampf, mit konzentrierenden Anlagen werden im Sonnengürtel der Erde auch Kraftwerke zur Stromerzeugung möglich. Die jeweils auch in der Peripherie notwendigen Technologien sind vielfältig, was sich in der „Größe“ (also Patentmenge, Anteil an Weltklassepatenten) der Technologie widerspiegelt.

Abbildung 138

## Position Bayerns im Cluster Infrastruktur / Sektorkopplung / Flexibilität



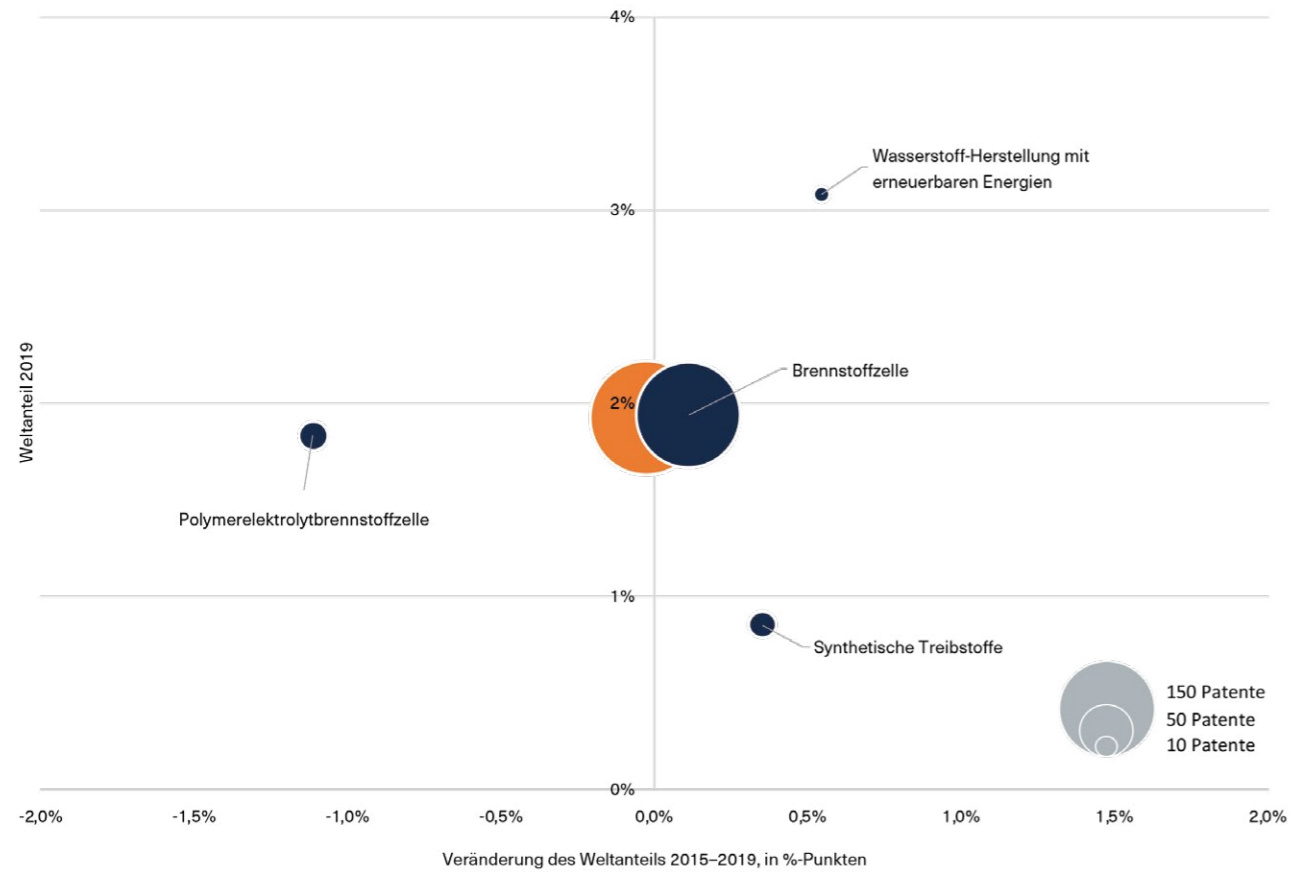
Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

Der Schwerpunkt der hier zugeordneten Einzeltechnologien liegt auf der Infrastruktur zur Übertragung, intelligenten Verteilung und Speicherung von Elektrizität (Abbildung 138). Insgesamt liegen die Weltanteile mehrheitlich unterhalb von zwei Prozent, wobei insbesondere die Lithium-Akkumulatoren und die damit einhergehende Ladeinfrastruktur in den letzten Jahren deutlich positive Dynamiken zu verzeichnen hatten. Damit hat sich die Technologie zur Schaffung der Ladeinfrastruktur in den letzten fünf Jahren verdoppelt.

Abbildung 139

## Position Bayerns im Cluster Synthetische Energieträger / Wasserstoff



Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

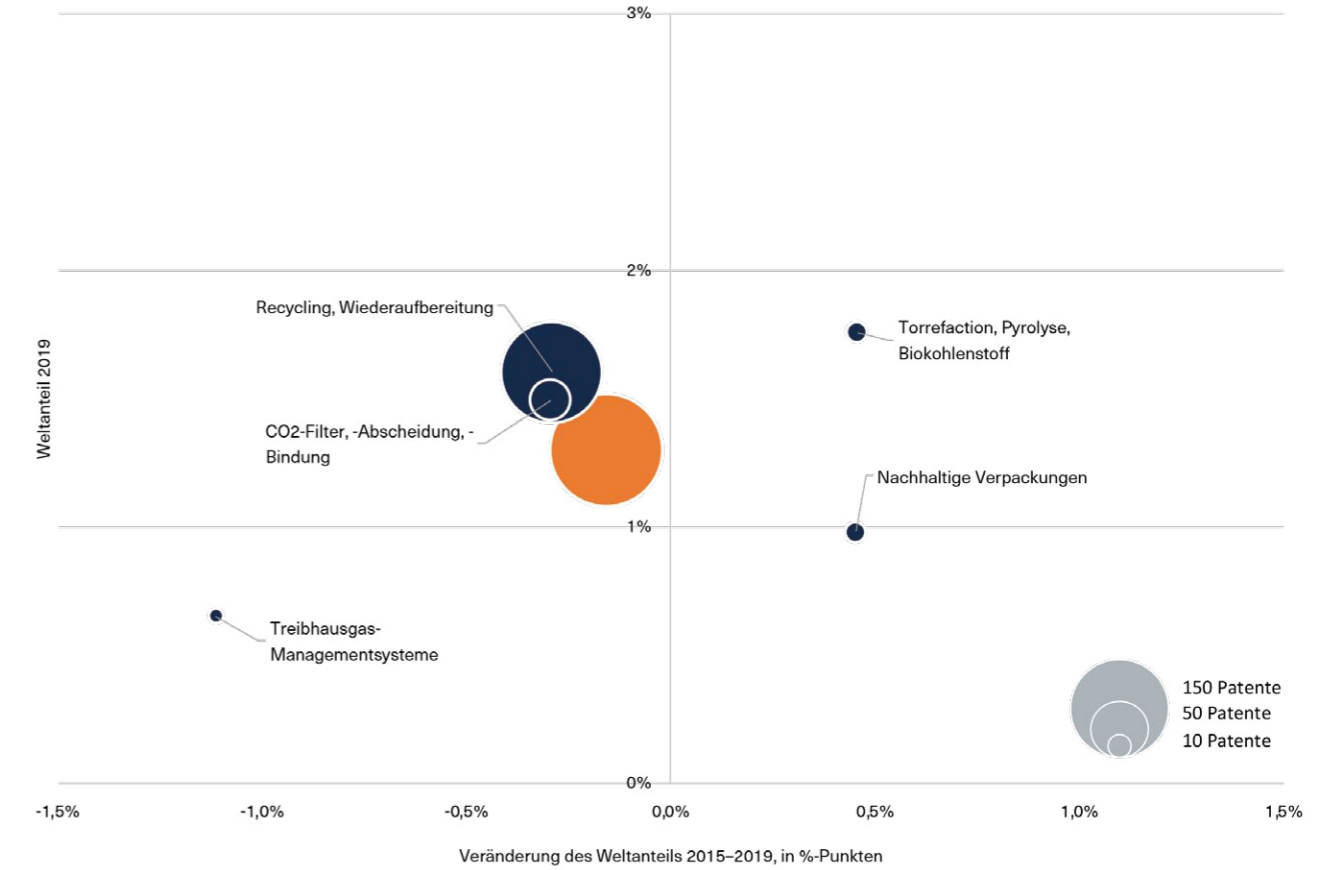
Der Cluster synthetische Energieträger / Wasserstoff besteht aus vier Teiltechnologien und wird dominiert von der Brennstoffzellentechnologie (Abbildung 139). 86 Prozent der Weltklassepatente in diesem Cluster entfallen auf Forschungen im Bereich der Brennstoffzelle. Bayern hat in dieser Technologie einen respektablen Weltanteil von knapp zwei Prozent, wobei die Entwicklung in den letzten fünf Jahren praktisch stagniert. Deutlich dynamischer ist die Wasserstoff-Herstellung mit erneuerbaren Energien, die bereits im Cluster Erneuerbare Energien thematisiert worden ist.

#### Sonstige Sektoren

Neben den dargestellten Technologien zur Energienachfrage und -erzeugung sind eine Reihe von Technologien insgesamt drei Clustern im Bereich Sonstige Sektoren zugeordnet: Negativ-Emissionstechnologien, Landwirtschaft / Landnutzung / Forstwirtschaft und Anpassungstechnologien.

Abbildung 140

## Position Bayerns im Cluster Negativ-Emissionstechnologien

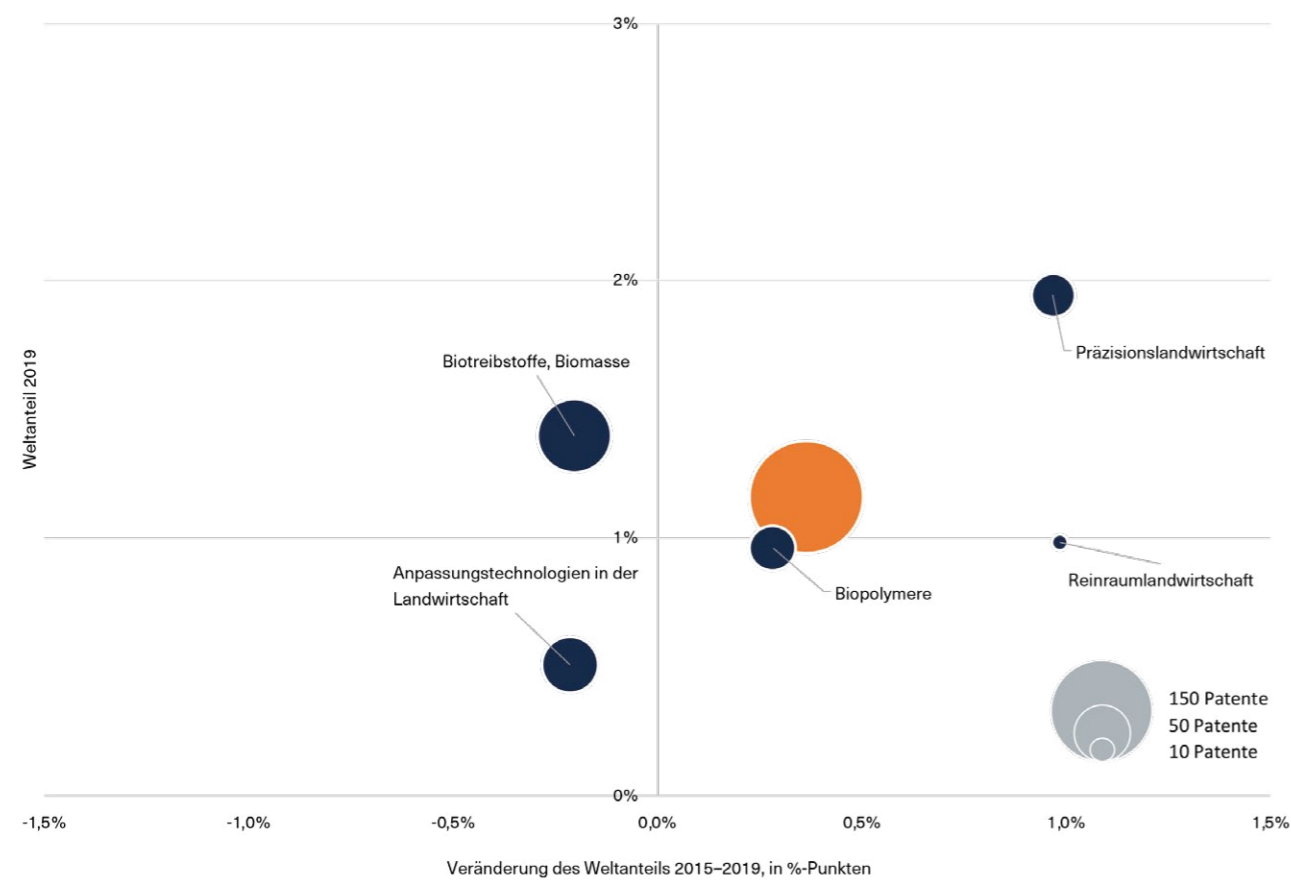


Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

Die Technologie wird dominiert vom Recycling mit einem Weltanteil von 1,6 Prozent, allerdings auch mit einem Weltanteilsverlust von 0,3 Prozentpunkten in den letzten fünf Jahren (Abbildung 140). Dies ist vor allem der besonders dynamischen Entwicklung in China geschuldet, die zu Anteilsverschiebungen in allen Industrieländern führt. Auf ähnlichem Niveau und mit ähnlicher Entwicklung sind die CO<sub>2</sub>-Filtertechnologien angesiedelt. Treibhausgas-Managementsysteme, die im Prinzip reine Softwarelösungen sind, fallen kaum ins Gewicht, während hingegen die Umwandlung von Bio-Kohlenstoff, insbesondere kohlenstoffhaltiger Abfälle zu Kohlenstoff oder Methan (Torrefaction / Pyrolyse) mit dem höchsten Weltanteil (1,8 Prozent) und dem höchsten Wachstum in Bayern sehr gut positioniert ist. Allerdings ist zu beachten, dass die Technologie in Bayern nur sechs Weltklassepatente zu verzeichnen hat. Ähnlich klein sind – noch – die nachhaltigen Verpackungen.

Abbildung 141  
Position Bayerns im Cluster Landwirtschaft / Landnutzung / Forstwirtschaft

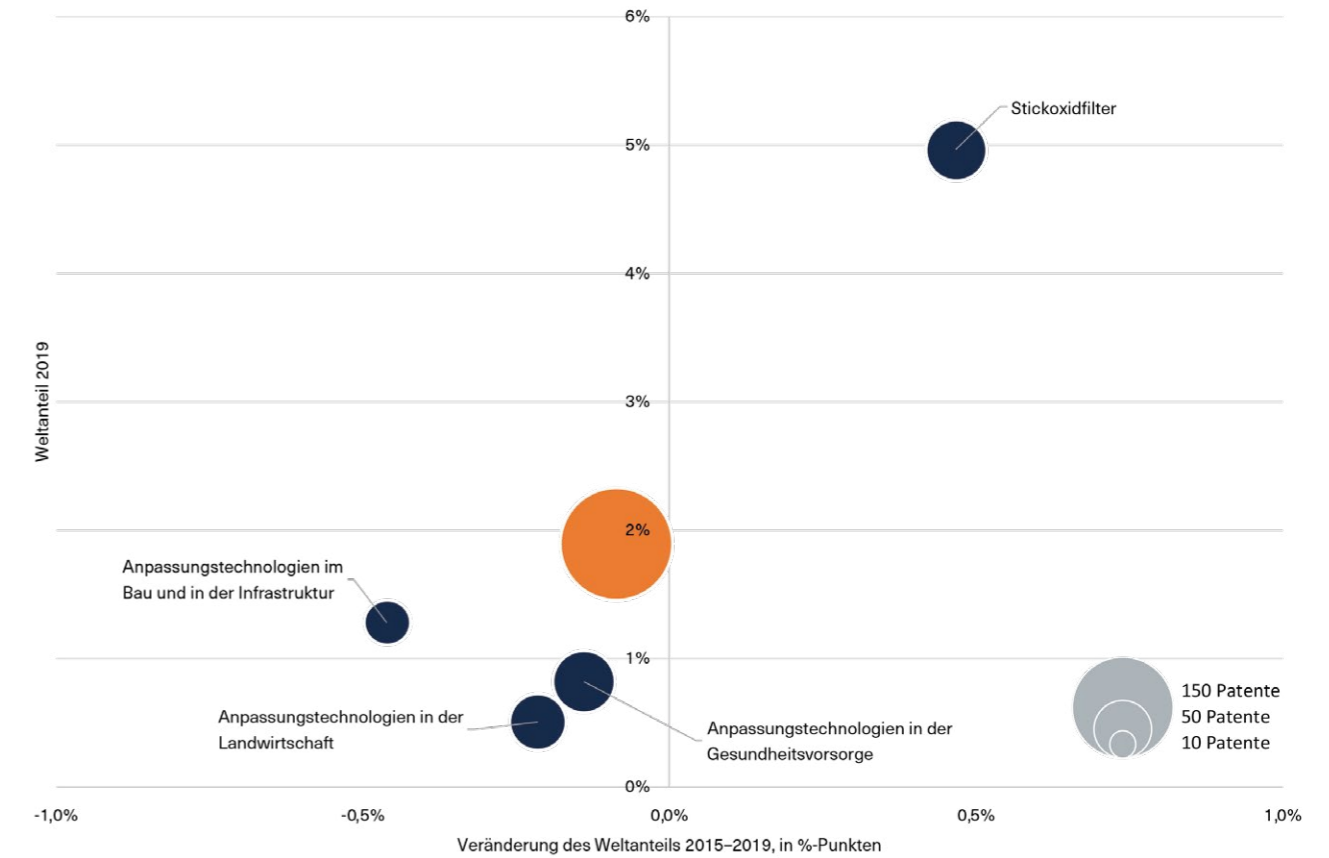


Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

Die herausragende Technologie im Bereich der Landwirtschaft ist die Präzisionslandwirtschaft (Abbildung 141). Darunter sind Unterstützungs- und Optimierungstechnologien in der Landwirtschaft zu verstehen, bspw. der Einsatz von Drohnen oder Satelliten zur ressourcenschonenden Ertragsoptimierung. Hier erreicht Bayern einen Weltanteil von knapp zwei Prozent mit einer Anteilsverdopplung in den letzten fünf Jahren. Auch die Reinraumlandwirtschaft, die bspw. in Städten betrieben wird (Urban Farming), verzeichnet hier ein ähnliches Wachstum, wenn auch mit wenigen Patenten.

Abbildung 142  
Position Bayerns im Cluster Anpassungstechnologien



Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

Quelle: EconSight, 2020

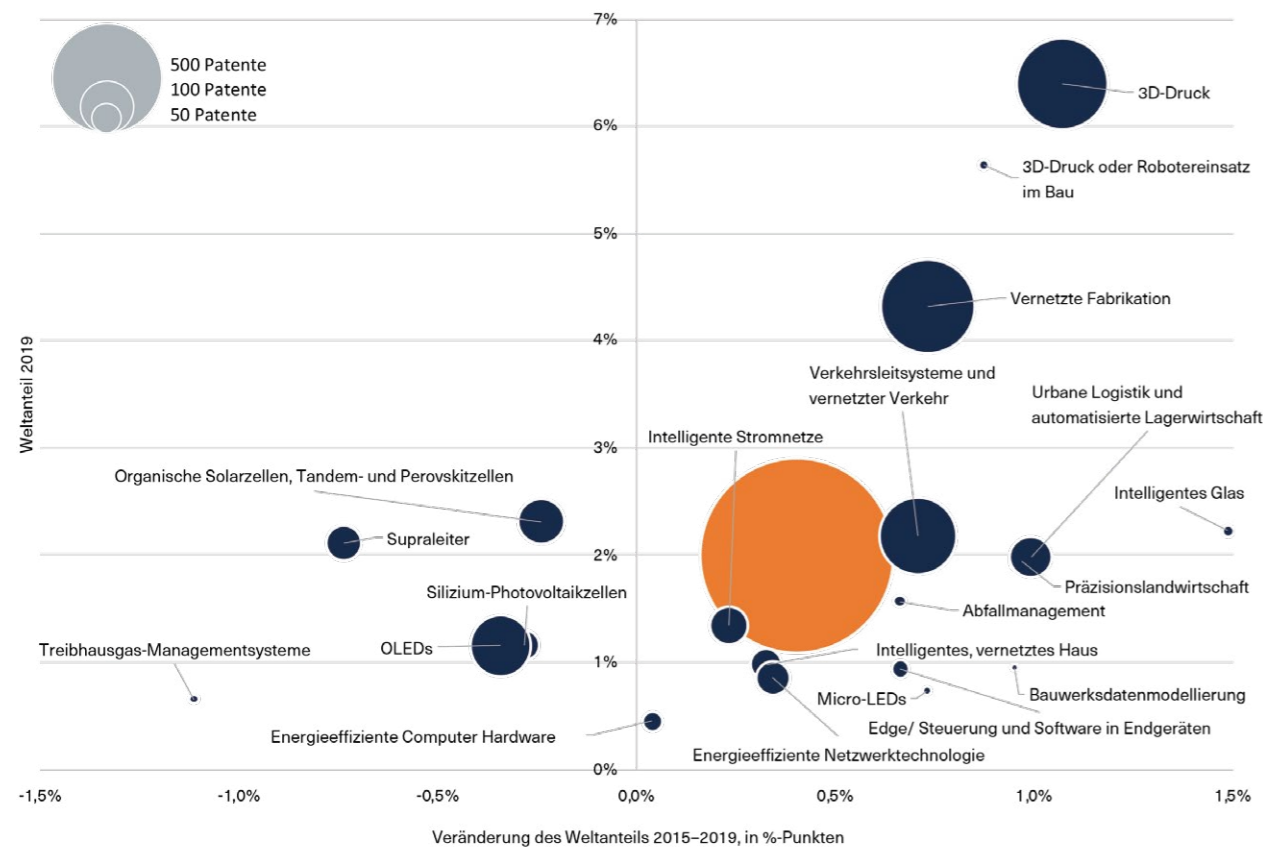
Der Cluster der Anpassungstechnologien besteht aus unterschiedlichen technologischen Ansätzen zur Anpassung an die Konsequenzen des Klimawandels (Abbildung 142). Dazu gehören Entwicklungen zur Gesundheitsvorsorge gegen zunehmende Krankheiten wie Malaria, Zika, Nil-Fieber, sowie Technologien in Bau und Infrastruktur gegen Tsunamis, Überschwemmungen, Wirbelstürme und andere Umweltextreme. In diesen Technologien erreicht Bayern vergleichsweise geringe Weltanteile und musste in den letzten Jahren Anteilsverluste verzeichnen. Die gute Positionierung der diesem Cluster zugeordneten Stickoxidfilter wurde bereits im Cluster Industrie thematisiert.

#### Digital getriebene Technologien

Aufgrund des hohen Stellenwerts der Digitalisierung sind in diesem Cluster Technologien aufgeführt, die besonders stark von der Digitalisierung beeinflusst und getrieben werden. Sämtliche Technologien sind bereits mindestens einem der anderen Cluster zugeordnet.



Abbildung 143  
Position Bayerns im Cluster Digital getriebene Technologien



Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

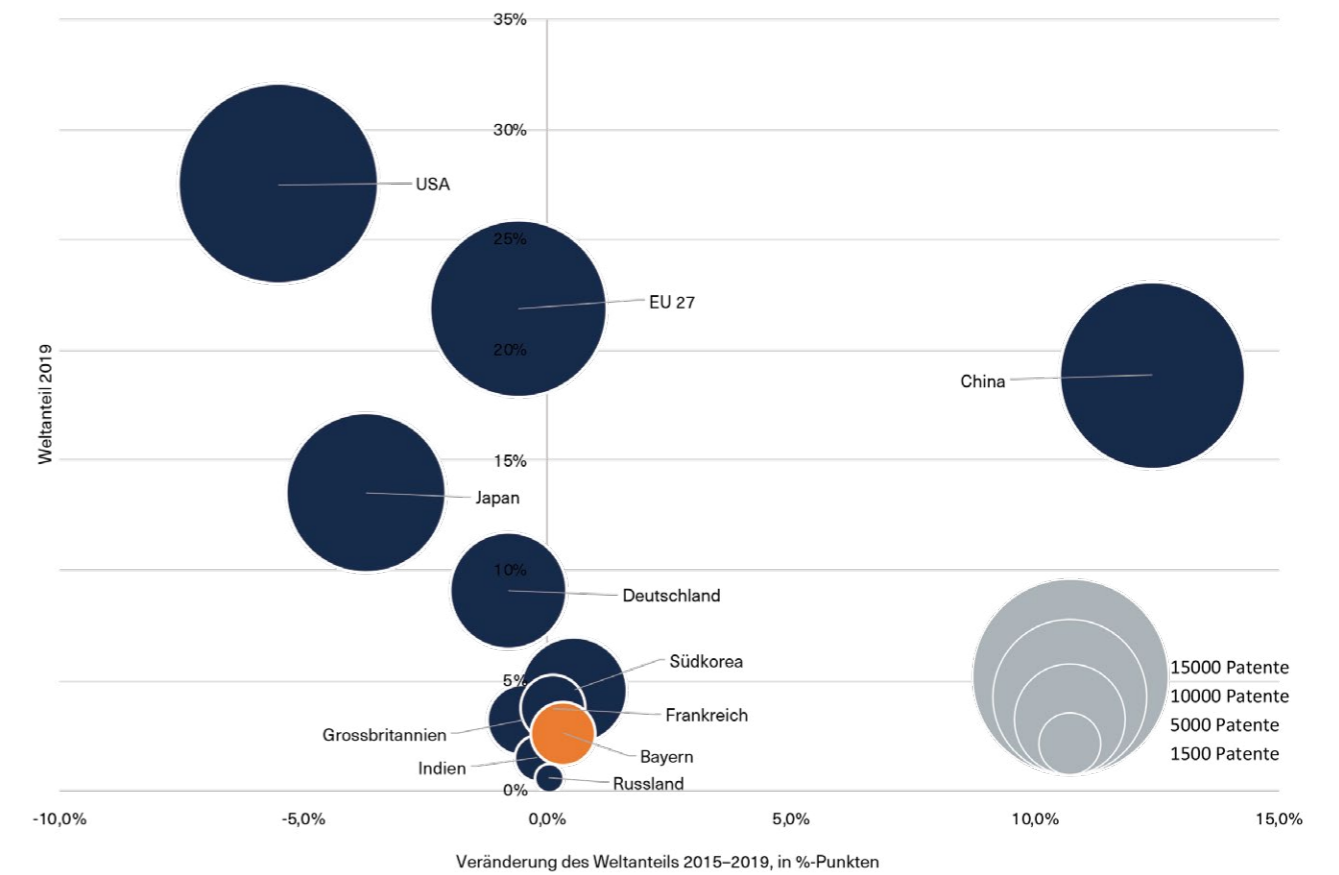
Quelle: EconSight, 2020

Im Clustervergleich verzeichneten die digital getriebene Technologien insgesamt die stärkste Zunahme des Weltanteils für Bayern (Abbildung 143). Diese Dynamik zeigt sich in fast allen Einzeltechnologien, die hier verortet worden sind. Die industriellen und Verkehrstechnologien haben die höchsten Weltanteile und größtenteils auch starkes Wachstum. Zudem konnten die urbane Logistik und die Präzisionslandwirtschaft in den letzten fünf Jahren ihren Weltanteil verdoppeln. Auffällig sind hingegen die vergleichsweise geringen Weltanteile in energieeffizienter Hardware und Netzwerktechnologie.

01.4 Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Technologie-Clustern im internationalen Vergleich

Der Blick auf die einzelnen Technologien innerhalb der Cluster hat die starke Positionierung Bayerns vor allem in den Clustern Industrie und Verkehr zusätzlich unterfüttert. Diese beiden Cluster werden in diesem Kapitel im internationalen Vergleich gezeigt. Entsprechende Darstellungen zu sämtlichen Clustern sind online zu finden. (Kasten 31)

Abbildung 144  
Internationaler Vergleich des Clusters Industrie



Die Kugelgröße des Clusters (orange) ergibt sich aus der Summe der Kugelgrößen der einzelnen Technologien (blau) und zeigt die Anzahl der Weltklassepatente im Cluster.

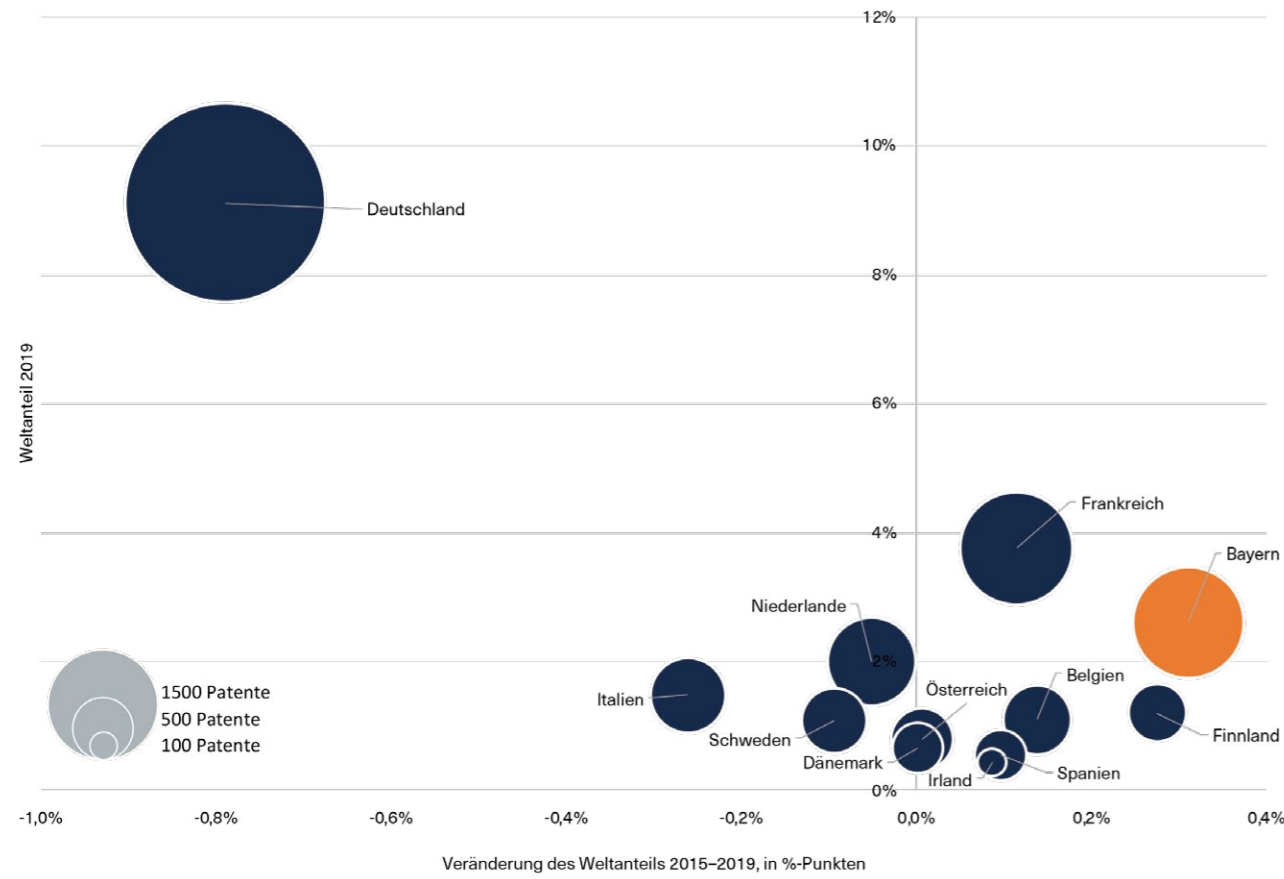
Quelle: EconSight, 2020

Im Vergleich mit den USA, China, Japan, der EU-27 und Südkorea ist Bayern mit dem dritthöchsten Wachstum aller Länder nach China und Südkorea im Industriecluster sehr gut positioniert (Abbildung 144). Bezogen auf den Weltanteil steht Bayern mit 2,6 Prozent nur knapp hinter Großbritannien und Frankreich. Führend sind die USA mit einem Weltanteil von 30 Prozent vor der EU-27 mit 21 Prozent und China mit 16 Prozent. China konnte seinen Weltanteil in den

letzten fünf Jahren von sechs Prozent auf heute 16 Prozent steigern.

Auffällig ist weiterhin, dass Bayerns Forschungsaktivitäten im Industriecluster knapp ein Drittel der deutschen Aktivitäten ausmachen, die wiederum knapp die Hälfte der europäischen Aktivitäten ausmachen. Die folgende Abbildung 145 zeigt die Verhältnisse innerhalb der EU-27 im Detail.

Abbildung 145  
Europäischer Vergleich des Clusters Industrie

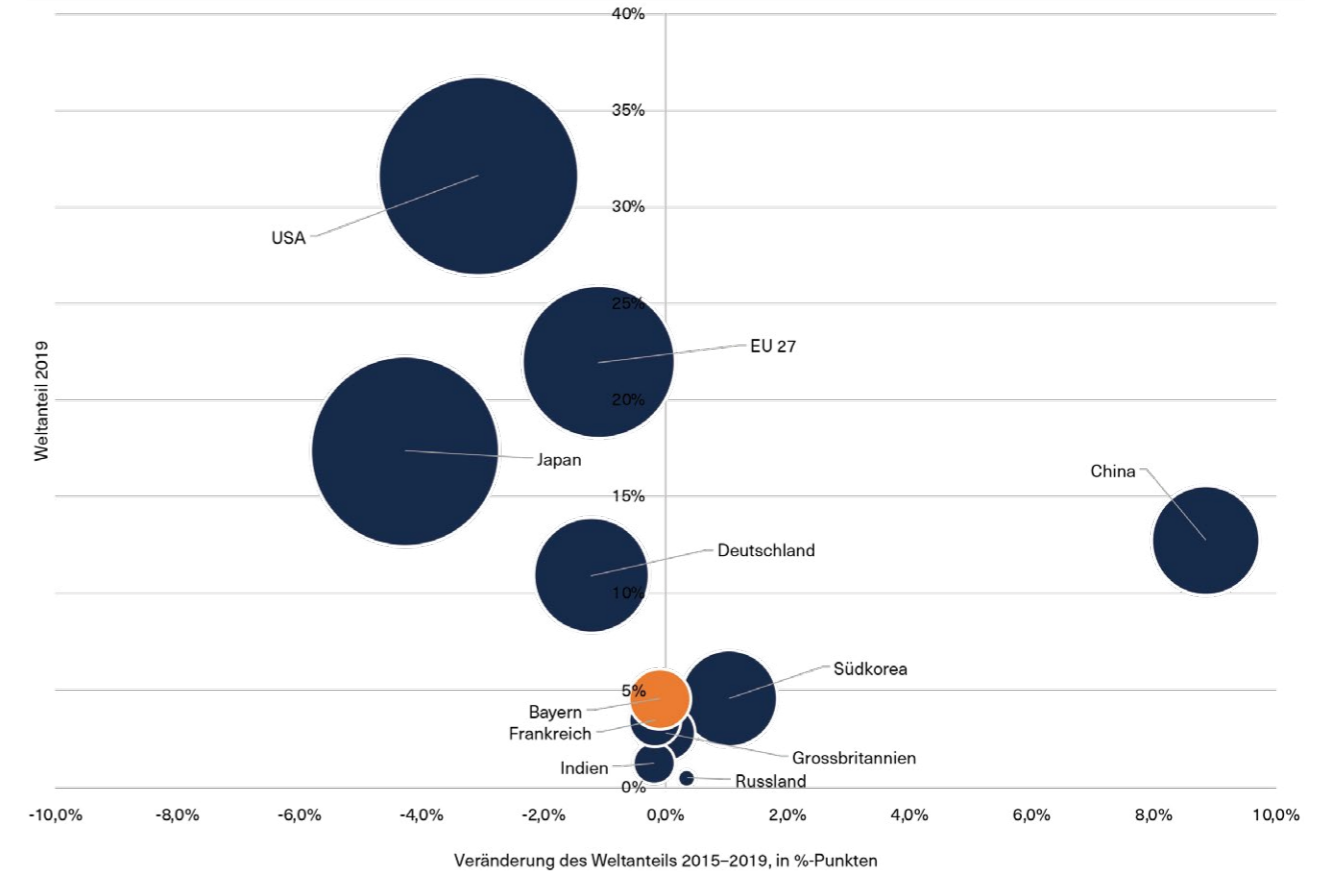


Frankreich hat trotz einer ähnlichen Patentmenge (Kugelgröße) einen höheren Weltanteil als Bayern. In Bayern ist die Streuung der Einzeltechnologien größer. Neben den gut positionierten 3D-Druck-Technologien und der vernetzten Fabrikation sind auch Technologien mit einem geringeren Weltanteil wie Recycling oder effiziente Metallproduktion enthalten. In Frankreich ist die Streuung geringer und der Weltanteil, gemessen als Durchschnittswert aller enthaltenen Technologien, höher.

Quelle: EconSight, 2020

Die obige Abbildung zeigt alle EU-Länder mit einem Weltanteil größer als 0,1 Prozent. Bayern liegt knapp hinter Frankreich und Deutschland (inklusive Bayern) auf dem dritten Platz. Bayern ist zudem die Region mit der größten positiven Veränderung des Weltanteils. Kein anderes Land in der EU ist in den klimarelevanten Industrietechnologien in den vergangenen fünf Jahren so stark gewachsen wie Bayern. Auffällig ist weiterhin, dass Deutschland für insgesamt rund 42 Prozent aller Forschungsaktivitäten in diesem Cluster in der Europäischen Union verantwortlich ist.

Abbildung 146  
Internationaler Vergleich des Clusters Verkehr

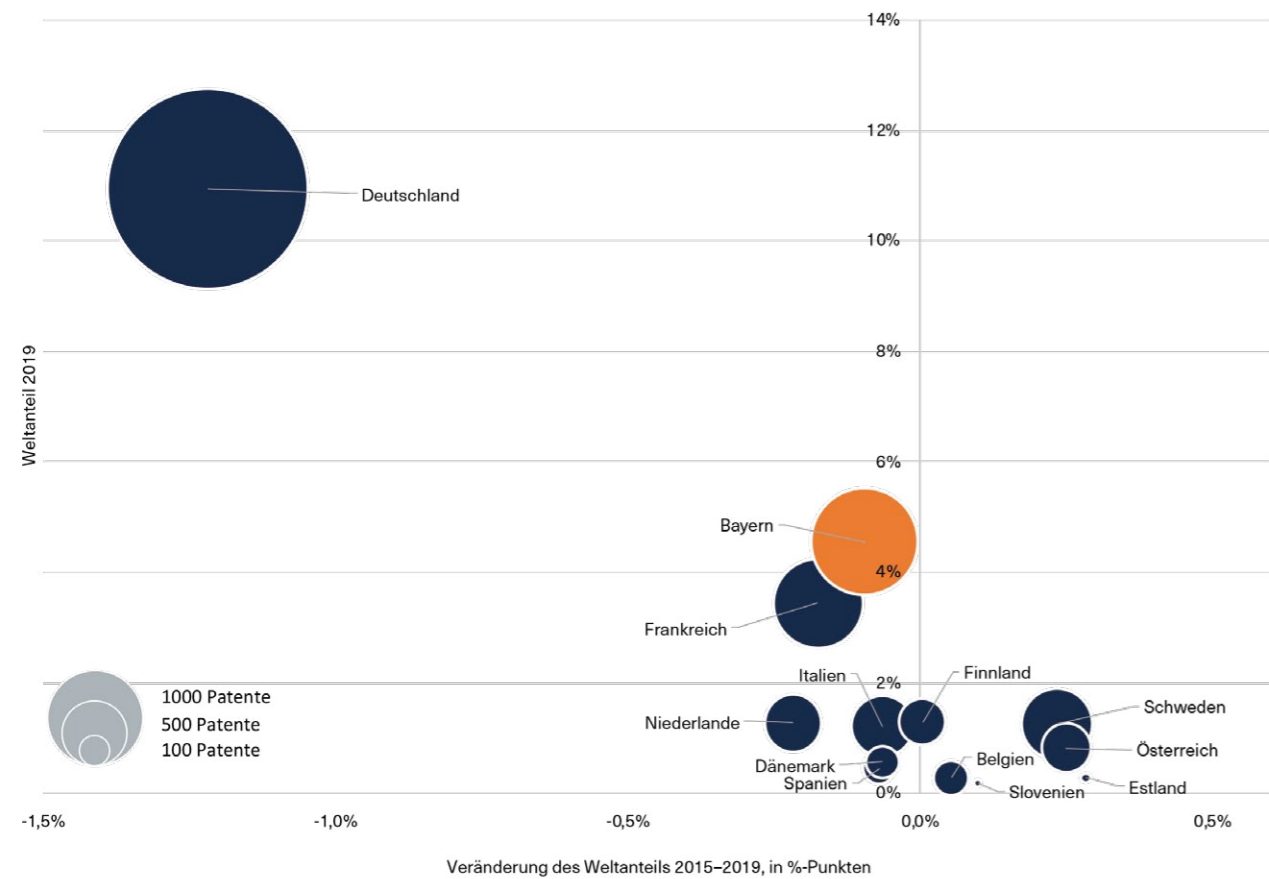


Quelle: EconSight, 2020

Im Cluster Verkehr ist Bayern im internationalen Vergleich besser positioniert als Frankreich und Großbritannien (Abbildung 146). Südkorea ist auf dem gleichen Niveau, aber mit einer deutlich dynamischeren Entwicklung. Auffällig ist, dass sowohl die USA als auch die EU, Japan und Deutschland in den letzten fünf Jahren Weltanteile zulasten von Südkorea und China verloren haben.

Abbildung 147

## Europäischer Vergleich des Clusters Verkehr



Nur EU-Länder mit einem Weltanteil > 0,5 Prozent werden gezeigt

Quelle: EconSight, 2020

Im europäischen Vergleich liegt Bayern mit einem Weltanteil von 4,6 Prozent deutlich vor Frankreich, Schweden, Italien und den Niederlanden (Abbildung 147). Insgesamt wird das Verkehrscluster von Deutschland dominiert. 52 Prozent aller Forschungsaktivitäten finden in Deutschland statt. Allerdings ist der Weltanteil in den letzten fünf Jahren deutlich gesunken. Dies ist ähnlich wie in Bayern mit stark rückläufigen Anteilen einiger Teiltechnologien wie Hyperloops und Verkehrseffizienztechnologien zu begründen. Insgesamt drängt China stark in diese Technologien und konnte in den letzten fünf Jahren seine Patente im gesamten Verkehrscluster vervierfachen.

#### Bayern im Vergleich zu Deutschland, der EU-27 und der Welt

Die folgende Tabelle zeigt neben den Weltanteilen Bayerns auch die Anteile Bayerns an den Forschungsaktivitäten der EU-27 und an Deutschland für alle Cluster. Während die großen Länder wie die USA oder China mit sehr hohen Weltanteilen positioniert sind, zeigt diese Tabelle, wie bedeutend Bayerns Forschungsaktivitäten in den Klimatechnologien für Deutschland und Europa sind.

Bezogen auf die Welt machen Bayerns Weltklasseaktivitäten in den Klimatechnologien im Durchschnitt zwei Prozent aus. Bezogen auf die EU ist Bayern für zehn Prozent der europäischen Weltklasseforschung in Klimatechnologien verantwortlich und innerhalb Deutschlands sind es rund 26 Prozent.

Tabelle 24

#### Bayerns Position in den Clustern als Anteil an Welt, EU und Deutschland, Anteile an den Weltklassepatenten je Cluster, 2019

Cluster / Anteile	Bayern an Welt	Bayern an EU-27	Bayern an Deutschland
<b>Energienachfrage</b>			
Private Haushalte, Dienstleistungen	1,5 %	8,8 %	26,9 %
Industrie	2,6 %	11,9 %	28,5 %
Verkehr	4,6 %	20,7 %	41,6 %
<b>Energieangebot</b>			
Erneuerbare Energien	2,2 %	9,3 %	24,1 %
Infrastruktur	2,2 %	12,6 %	30,7 %
Synthetische Energieträger / Wasserstoff	1,9 %	10,7 %	26,5 %
<b>Sonstige Sektoren</b>			
Landwirtschaft	1,2 %	4,2 %	14,3 %
Negativ-Emissionstechnologien	1,3 %	6,4 %	20,3 %
Anpassungstechnologien	1,9 %	10,4 %	25,3 %
<b>Digitalisierung</b>			
Digital getriebene Technologien	2,0 %	11,6 %	27,9 %
<b>Durchschnitt</b>	<b>2,1 %</b>	<b>10,7 %</b>	<b>26,6 %</b>

Quelle: EconSight, 2020

#### Zusammenfassung

Die Clusteranalyse hat gezeigt, dass Bayern insbesondere in den Energienachfrageclustern Verkehr und Industrie die höchsten Weltanteile und damit die höchste Wettbewerbsfähigkeit in klimarelevanten Forschungsaktivitäten besitzt. Auffällig ist weiterhin, dass die Positionierung Bayerns auf der Energieangebotsseite, insbesondere im Cluster Erneuerbare Energien, weniger stark ausgeprägt ist. Hier fällt vor allem die fehlende Dynamik ins Auge. Obwohl die absoluten Patentmengen in der Mehrzahl der erneuerbaren Energietechnologien in Bayern in den letzten Jahren zugenommen haben, ist die Dynamik insbesondere in Asien deutlich höher. Einen signifikanten Beitrag kann Bayern im Bereich der digital getriebenen Technologien leisten. Insgesamt ist Bayern für rund zehn Prozent der europäischen Forschung in Klimaschutztechnologien verantwortlich und in Deutschland für rund 26 Prozent. Weiterhin zeigt sich, dass innerhalb einiger Cluster starke Schwankungen zwischen den einzelnen zugeordneten Technologien, bezogen auf die Weltanteile, bestehen. Besonders deutlich wird das im Bereich des Energieangebots. Das folgende Kapitel wird deshalb einzelne sogenannte Leuchtturmtechnologien aus den Clustern individuell beleuchten.

01.5 Positionierung Bayerns in den klimarelevanten Leuchtturmtechnologien

Innerhalb der Cluster konnten Technologien identifiziert werden, in denen Bayern einen vergleichsweise hohen Weltanteil und in einigen Fällen zusätzlich ein Wachstum verzeichnen kann. Zusätzlich hat der Zukunftsrat der bayerischen Wirtschaft einige Technologien von besonderem Interesse für Bayern identifiziert. Kriterien sind technologische oder wirtschaftliche Relevanz für die Umsetzung von Klimaschutz, kurzfristige Verfügbarkeit oder der erwartete Lösungsbeitrag. Dahinter stehen die Fragen, ob eine Technologie einen signifikanten Lösungsbeitrag für den Klimaschutz leisten kann, wann eine entsprechende Marktreife zu erwarten ist, ob eine Technologie wesentlich bzw. unverzichtbar ist und ob sich Investitionen in entsprechende Technologien auch wirtschaftlich rentieren – und nicht zuletzt, wie groß die damit erreichbaren Märkte sind. Da in den verschiedenen Technologien die Märkte jedoch extrem unterschiedlich sind – der Weltmarkt für Fahrzeuge ist sehr viel größer als derjenige für Hochspannungsleitungen –, ist dieses kein absolutes Kriterium, sondern muss auch immer in Bezug dazu gesetzt werden, welche Durchdringungsmöglichkeit eine Technologie in ihrem Gesamtmarkt erreichen kann.

Abbildung 148 Globale Positionierung der bayerischen Leuchtturmtechnologien



Die Technologie Elektrisches/hybrides Fliegen hat einen Weltanteil vom 10,4 Prozent und konnte diesen Anteil in den letzten fünf Jahren um 6,5 Prozentpunkte steigern. Zur besseren Lesbarkeit wurde diese Technologie oben rechts mit anderen Koordinaten manuell positioniert.

Quelle: EconSight, 2020

Tabelle 25 Bayerns Position in den Leuchtturmtechnologien als Anteil an den Weltklassepatenten der Welt, EU und Deutschlands, 2019

Technologie / Anteile	Bayern an Welt	Bayern an EU-27	Bayern an Deutschland
Elektrisches / hybrides Fliegen	10,4 %	33,0 %	76,9 %
3D-Druck	6,4 %	23,9 %	43,9 %
Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	5,6 %	17,8 %	65,3 %
Stickoxidfilter	5,0 %	18,1 %	32,4 %
Vernetzte Fabrikation	4,3 %	25,4 %	45,1 %
Effizientere Verbrennungsmotoren	4,2 %	16,9 %	26,7 %
Solarthermie	3,6 %	15,9 %	37,6 %
Energieeffiziente Haushaltsgeräte	3,8 %	18,3 %	40,4 %
Geothermie	3,3 %	17,3 %	68,4 %
Wasserstoff-Herstellung	3,1 %	19,0 %	30,8 %
Elektrofahrzeuge	2,9 %	19,1 %	30,1 %
Vernetzter Verkehr	2,2 %	13,6 %	27,4 %
Organische Solarzellen, Perovskitzellen	2,3 %	9,3 %	15,8 %
Energieeffiziente Gebäudetechnik	2,1 %	9,0 %	24,0 %
Ladeinfrastruktur Fahrzeuge	2,0 %	15,1 %	27,5 %
Urbane Logistik	2,0 %	14,6 %	31,3 %
Präzisionslandwirtschaft	1,9 %	8,0 %	19,7 %
Brennstoffzelle	1,9 %	11,6 %	24,8 %
Recycling	1,6 %	7,4 %	21,6 %
CO <sub>2</sub> -Filter, -Abscheidung	1,5 %	8,2 %	23,4 %
Intelligente Stromnetze	1,3 %	7,2 %	15,8 %
Anpassungstechnologien Bau / Infrastruktur	1,3 %	9,4 %	24,5 %
Nachhaltige Verpackungen	1,0 %	3,0 %	9,6 %
Intelligentes, vernetztes Haus	1,0 %	8,2 %	27,0 %
Synthetische Treibstoffe	0,9 %	3,7 %	17,2 %
Anpassungstechnologien Gesundheit	0,8 %	4,0 %	12,5 %
Treibhausgas-Managementsysteme	0,7 %	7,0 %	27,3 %
Anpassungstechnologien Landwirtschaft	0,5 %	4,5 %	17,7 %
Fleischalternativen	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Quelle: EconSight, 2020

Die Abbildung 148 sowie Tabelle 25 zeigen, dass in jedem der oben beschriebenen Technologiecluster Einzeltechnologien (bzw. kleinere Technologiegruppen) hervorstechen, in denen in Bayern besondere Stärken bestehen. Bei den „nicht-digitalisierten“ Effizienztechnologien liegen eher stetige, z.T. bereits jahrzehntelange Entwicklungen und Erfahrungen vor, ähnlich bei den bereits in den Markt eingeführten erneuerbaren Energien Photovoltaik, Wind onshore und offshore sowie Solarthermie.

Größere Dynamik ist aufgrund der sich aktuell verändernden politischen Rahmenbedingungen bei den Wasserstofftechnologien sowie – vermutlich mit etwas Verzögerung – bei der Produktion synthetischer (strombasierter) kohlenstoffhaltiger Energieträger zu sehen.

Der Umbau des Stromsystems und die Einbindung neuer Verbraucher wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen in großem Stil führen zu einem Handlungsdruck, um die Versorgung sowie das Netz gleichzeitig flexibel, stabil und robust bei großen Mengen fluktuierender Einspeisung erneuerbarer Energien auszugestalten. Hier spielen auch digitalisierte Lösungen zur Nahezu-Echtzeit-Steuerung und zur Kurzfristprognose von Verbrauch und Angebot eine Rolle. Das betrifft zunächst die deutschen und europäischen Teilmärkte, perspektivisch handelt es sich aber um weltweite Märkte mit jeweils „regionalen“ geografischen Spezifika, vor allem durch die jeweils vorherrschenden klimatischen Bedingungen für das Energieangebot.

Der Umbau des Verkehrssystems wird sich voraussichtlich auf ähnlich ambitionierten Zeitskalen abspielen – hierbei handelt es sich bereits jetzt im Prinzip um weltweite Märkte für Personen- und Güterverkehr. Als Herausforderung kommt hinzu, dass hier gleichzeitig der Umbau auf der Energieseite als auch die „digitale Durchdringung“ zu bewältigen sind – Stichwort autonomes Fahren sowie vernetzte Verkehrssysteme. Für ein stark von der Automobilproduktion bestimmtes Wirtschaftssystem wie in Bayern und – in etwas geringerem Maße in Deutschland – ist es existenziell wichtig, dass diese Transformationen nicht nur mitvollzogen, sondern auch mitgestaltet werden. Die ersten tiefgreifenden Veränderungen in der Organisation sowohl der Automobilproduktion (Gewicht der großen digitalen Player in der Entwicklung) als auch in der Verkehrsorganisation, insbesondere im urbanen Verkehr, zeigen sich bereits deutlich. Die hier in Bayern sichtbaren „besten“ Technologien bei Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur, urbaner Logistik, Verkehrseffizienz sind allesamt für die Gestaltung notwendig. Eine Festlegung auf noch stärker eingeschränkte Technologiebereiche würde eine Reduktion der „Risikostreuung“ und ein verstärktes Risiko der Abhängigkeit von anderen großen Technologieplayern erhöhen.

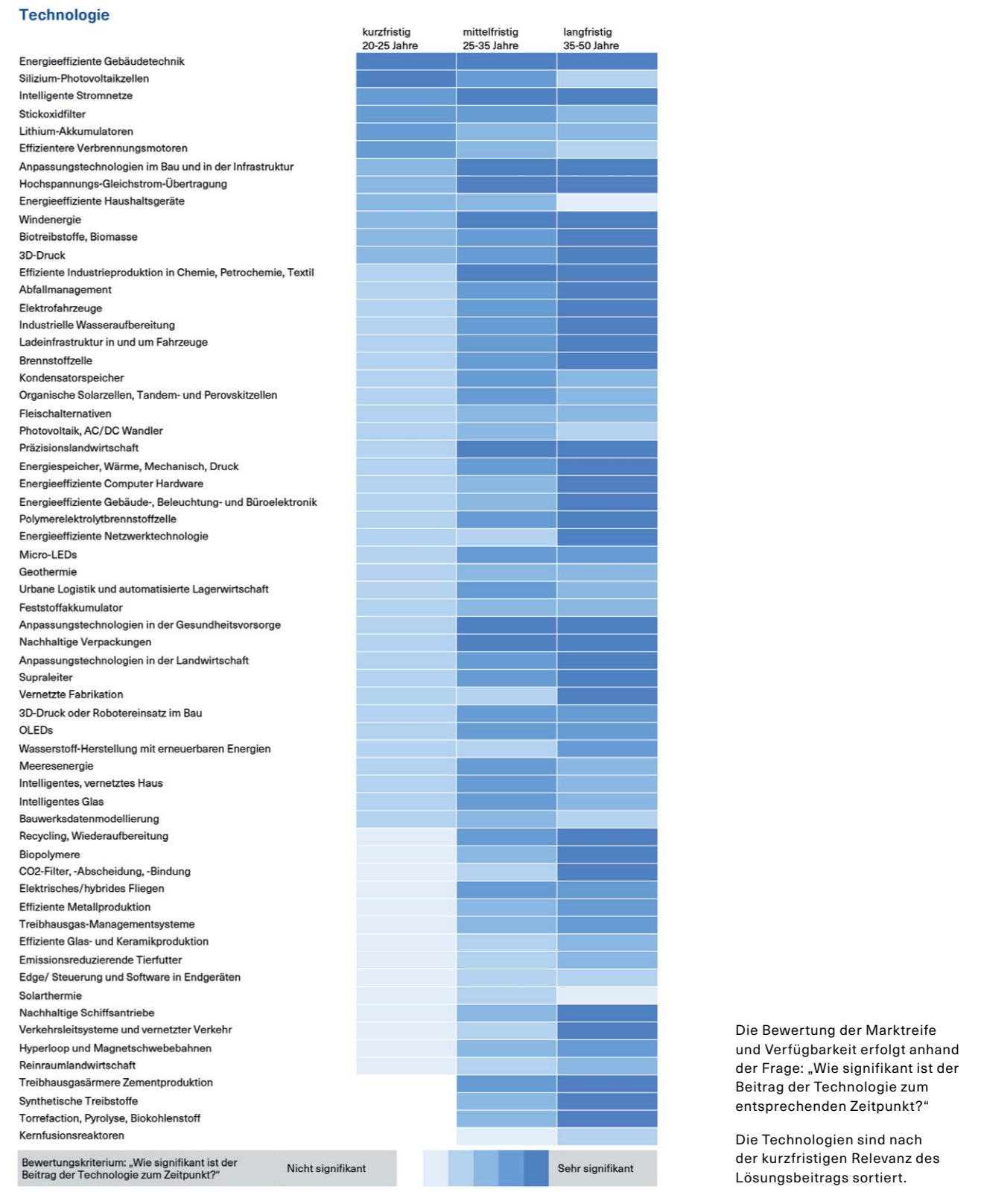
Bei den industriellen Technologien stechen vor allem die digitalen Querschnittstechnologien wie 3D-Druck und vernetzte Fabrikation sowie Recycling heraus, die eher breit über alle Branchen eingesetzt werden. Wenn deren dynamische Position aufrechterhalten werden kann, werden die entsprechenden Player an großen und diversen Weltmärkten partizipieren können. Hier bieten sich Chancen auch über den Klimaschutz hinaus.

Die Anpassungstechnologien sowohl bei Gesundheit als auch bei der Landwirtschaft sind zwar noch „klein“, bilden also wenige Patente ab. Das spiegelt aber u. a. die Tatsache wider, dass diese Technologien eher noch am Anfang der Marktorientierung stehen. Gleichwohl sind die zu erwartenden Märkte und damit die ökonomische Bedeutung groß, daher ist eine Weiterführung dieser Technologieentwicklungen bei begrenztem Risiko durchaus sinnvoll – insbesondere da in Bayern sowohl für Gesundheits- und Medizintechnologien als auch für die Landwirtschaft gute Forschungs- und Entwicklungsvoraussetzungen mit den entsprechenden Clustern und Organisationen bestehen.

Alle diese Technologien werden in einem klimaschonenden Energie- und Wirtschaftssystem an wichtigen Teilmärkten benötigt – die entsprechenden Produzenten haben damit solide Geschäftsaussichten sowohl in spezialisierten als auch z. T. in riesigen Weltmärkten, wenn die Rahmenbedingungen für die entsprechende Transformation bereitgestellt werden (z. B. angemessener CO<sub>2</sub>-Preis). Mit den hohen Anteilen an der deutschen und europäischen Forschung in diesen Bereichen spielen die entsprechenden Technologieentwickler (Unternehmen wie Forschungseinrichtungen) bereits jetzt eine entscheidende Rolle im Konzert der internationalen Veränderungs-Agenten.

Die folgende Abbildung 149 zeigt die Erwartung an die einzelnen Technologien hinsichtlich ihres Lösungsbeitrags vor dem Hintergrund der entsprechenden Marktreife. Es zeigt sich, dass Bayern sowohl kurz- als auch mittel- und langfristig mit den eigenen technologischen Stärken einen signifikanten Lösungsbeitrag leisten kann. Dabei ist zu beachten, dass mittel- und langfristig notwendige Technologien in ihrer Entwicklung bereits kurzfristig vorangetrieben werden müssen, um ihr Potenzial im Zeitverlauf entfalten zu können.

Abbildung 149  
Übersicht der Marktreife und Verfügbarkeit der Technologien



Quelle: EconSight, 2020

## 01.6 Die Entwicklung der Digitalisierung in den Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien

Das bereits thematisierte Cluster der digital getriebenen Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien (Abbildung 143) zeigt die Bedeutung der Digitalisierung für diese Technologien. Allerdings können aus der rein qualitativen Einschätzung keine weiteren Erkenntnisse abgeleitet werden. In diesem Kapitel wird zusätzlich eine umfassende Quantifizierung der Digitalisierung anhand einer vertieften Patentanalyse durchgeführt. Dazu werden digitale und klimarelevante Technologien miteinander verknüpft und multidimensional ausgewertet. Der Analyseansatz beruht auf zwei zentralen Erkenntnissen: Erstens, Digitalisierung ist einer der zentralen technologischen Treiber. Zweitens, die Digitalisierung ist kein Selbstzweck, sondern wirkt auf andere Technologien und führt dort zu neuen Produkten und Prozessen. In diesem Sinn entsteht Neues in der Regel nicht aus neuen Technologien, sondern aus der intelligenten Verknüpfung bestehender Technologien. Diese Verknüpfung wird für alle 62 Klimaschutztechnologien und insgesamt 20 Digitalisierungstechnologien dargestellt. Details zur Methodik finden sich im Kasten 30 und weiterführende Details und Darstellungen online (Kasten 31). Der Beitrag der Digitalisierung zum Klimaschutz wird in Kasten 32 überblicksartig dargestellt.

### Kasten 30

#### Berechnung des Digitalisierungsgrads

Zur Identifikation der digitalen Patente in den klimarelevanten Technologien wird eine Besonderheit des Patentsystems genutzt. Patente können mehreren Patentklassen zugeordnet werden und tragen mehr als eine Technologieinformation. Insbesondere qualitativ hochwertige Patente, die breiter definierte Ansprüche haben, sind oft mehreren Anwendungsfeldern zugeordnet. Dies trifft besonders auf Patente im digitalen Umfeld zu, da zumeist nur angewandte computerimplementierte Erfindungen (CIE) patentiert werden können und daher die Anwendungen explizit beansprucht und damit klassiert werden. Mit diesem Ansatz werden somit alle Patente identifiziert, die sowohl einer Klima- oder Nachhaltigkeitstechnologie als auch einer digitalen Technologie zugeordnet werden können.

In die Analyse sind sämtliche aktuell gültige oder angemeldete Patente der letzten zehn Jahre eingeflossen. In der Regel wird ein Patentschutz für einen Zeitraum von bis zu 20 Jahren gewährt, aber für diese Berechnungen wird davon ausgegangen, dass Digitaltechnologien eine geringere „Halbwertszeit“ haben.

Für alle Technologien wird die Anzahl der digitalen klimarelevanten Patente berechnet. Bereits bekannt ist die

Gesamtzahl der Patente in diesen Technologien. Daraus ergibt sich der Digitalisierungsanteil der einzelnen Technologien als Verhältnis der digitalen klimarelevanten Patente in einer Technologie zu den Gesamtpatenten in einer Technologie. Dieser wird als Digitalisierungsgrad für jede Technologie ausgewiesen und ist der Basisindikator der Analyse.

Die dargestellte Digitalisierung wird sich von Technologie zu Technologie unterscheiden. Einige Technologien sind bereits heute digitaler als andere. D.h., es ist nicht sinnvoll, den Digitalisierungsgrad der einzelnen Technologien in Bayern miteinander zu vergleichen. Stattdessen müssen die Digitalisierungsanteile mit dem jeweiligen globalen Digitalisierungstrend verglichen werden. Dazu wird der globale Anteil digitaler klimarelevanter Patente an den Gesamtpatenten pro Technologie mit dem jeweiligen bayerischen Wert verglichen. Somit kann der Stand der Digitalisierung in Bayern pro Technologie mit dem globalen Digitalisierungsstand in der entsprechenden Technologie verglichen werden. Daraus ergeben sich überdurchschnittlich und unterdurchschnittlich digitalisierte klimarelevante Technologien in Bayern.



Tabelle 26

#### Überblick über die 23 verwendeten Digitalisierungstechnologien und Technologiegruppen, alphabetisch sortiert

Digitalisierung insgesamt (die Summe sämtlicher digitaler Patente)

Fortgeschrittene Digitalisierung als Summe der 20 identifizierten Einzeltechnologien

Basisdigitalisierung als Restgröße (sämtliche Computerhardware, Software und digitale Kommunikation, die nicht der fortgeschrittenen Digitalisierung zugeordnet wird)

Fortgeschrittene Digitalisierung differenziert nach 20 Technologien:

3D Bildanalyse	Künstliche Intelligenz
5G	Machine-to-Machine-Kommunikation
Big Data	Prozessautomatisierung
Blockchain	Quantencomputer
Cloud Computing	Sprachanalysetechnologien
Digital Twin	Streamingtechnologien
Digitale Sensoren	Touch-Technologie
Fintech	Verschlüsselungstechnologien
Gestikanalyse	Virtual Reality / Augmented Reality
Halbleiterproduktion	Wireless Communication Hardware

Quelle: EconSight, 2020

### Kasten 31

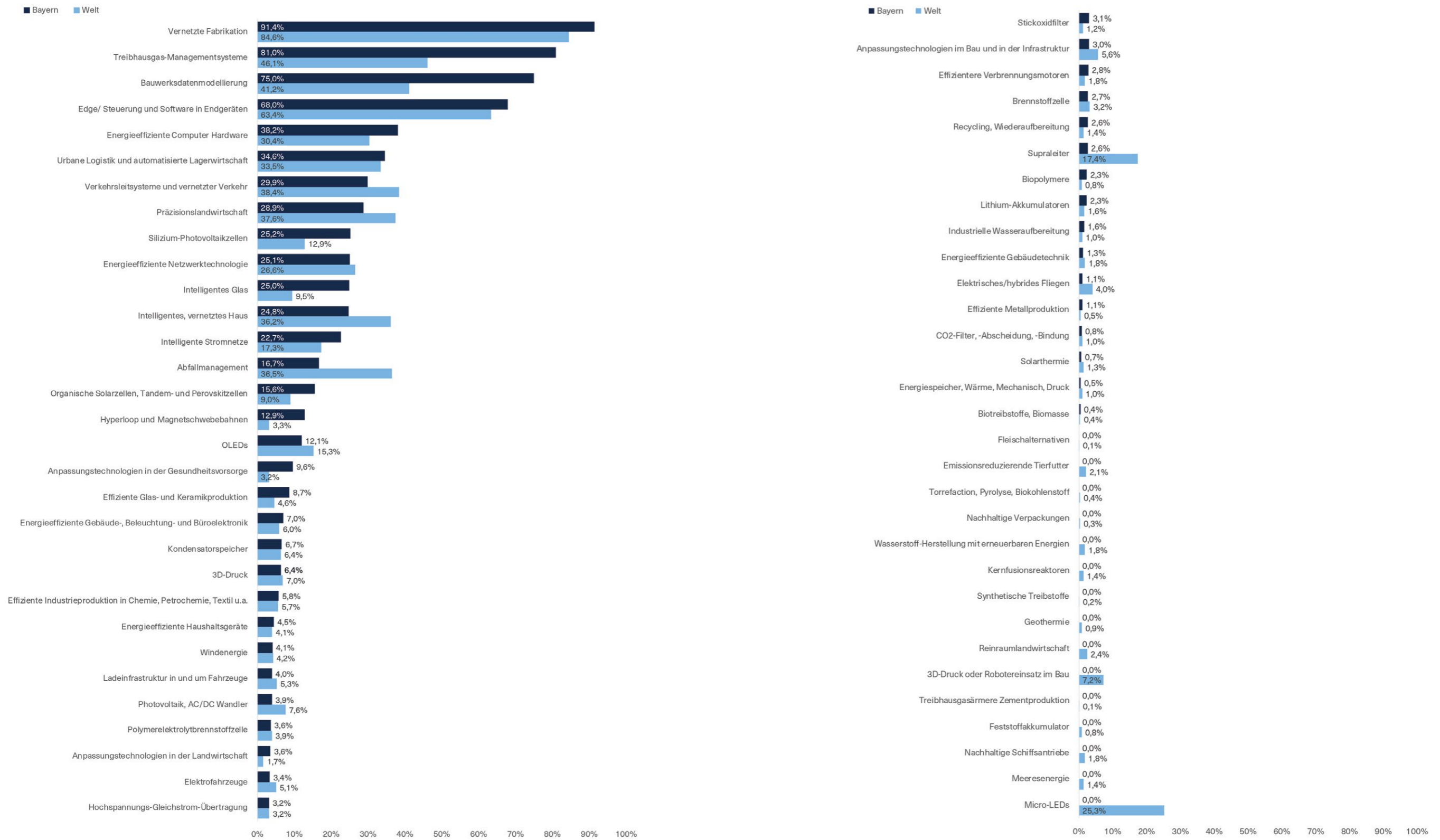
#### Alle Informationen online abrufbar

Aus Platzgründen ist es nicht möglich, die Analyse in allen Details und Dimensionen darzustellen. Der Fokus liegt deshalb auf den zentralen Erkenntnissen. Darüber hinaus sind alle 62 Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien in der Verknüpfung mit den 20 definierten Digitalisierungstechnologien mehrdimensional und interaktiv aufbereitet unter

[www.econsight.ch/vbw](http://www.econsight.ch/vbw)

Die folgende Visualisierung (Abbildung 150) zeigt den Digitalisierungsgrad für alle 62 Technologien im Überblick. Sämtliche digitale Patente einer Technologie in Bayern wurden ins Verhältnis zu allen bayerischen Patenten dieser Technologie gesetzt. Der Digitalisierungsgrad zeigt, wie stark die jeweilige Technologie digital durchdrungen ist. Parallel dazu werden die globalen Digitalisierungsanteile gezeigt. Die Technologien sind sortiert nach der Höhe des Digitalisierungsgrads aus bayerischer Perspektive. Man erkennt, in welchen Klimaschutztechnologien Bayern stärker digitalisiert ist und in welchen Bayern unter dem globalen Anteil liegt.

Abbildung 150  
Digitalisierungsgrad der Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien, in Prozent, 2019



Quelle: EconSight, 2020

Der Digitalisierungsgrad der Technologien unterscheidet sich stark. Einige Technologien, wie beispielsweise die vernetzte Fabrikation, bestehen per Definition aus Automatisierungs- und Kommunikationstechnologien und sind deshalb fast komplett digitalisiert. In diesen Technologien ist Bayern stärker digitalisiert als die Welt im Durchschnitt. Auffällig ist weiterhin, dass Bayern in den effizienten Produktionstechnologien (Glas/Keramik, Metalle, Chemie, Textil) leicht überdurchschnittlich digitalisiert ist.

In einigen Technologien ist die Differenz zwischen dem bayerischen und der globalen Digitalisierungsgrad gering und kann deshalb in der Analyse vernachlässigt werden. Auffällig ist jedoch der vergleichsweise geringe Digitalisierungsgrad im Bereich der intelligenten und vernetzten Häuser, im Abfallmanagement und in den Supraleitern. Auch in den meisten Mobilitätstechnologien ist Bayern unterdurchschnittlich digitalisiert.

Die folgende Abbildung 151 konzentriert sich auf die fortgeschrittene Digitalisierung, also die Summe der 20 definierten fortgeschrittenen Digitalisierungstechnologien, und weist diese für die im vorherigen Kapitel identifizierten 30 Leuchtturmtechnologien für Bayern aus.

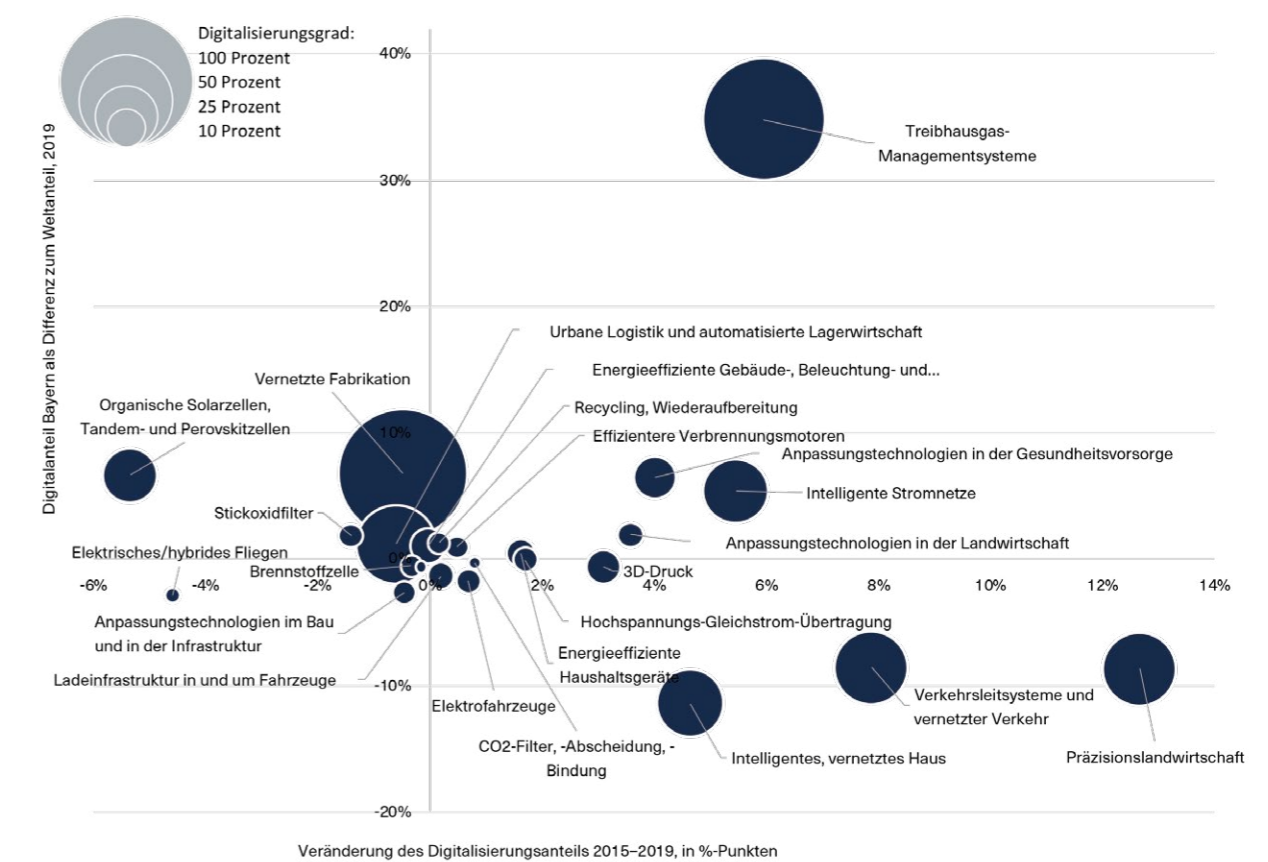
Die vertikale Achse zeigt an, ob der Digitalisierungsanteil in Bayern über oder unter dem globalen Durchschnitt liegt. Alle Technologien oberhalb der Nulllinie sind überdurchschnittlich digitalisiert. Die horizontale Achse zeigt die Veränderung des Digitalisierungsanteils zwischen 2015 und 2019 an. Alle Technologien rechts von der vertikalen Nulllinie haben ihren Digitalisierungsanteil gesteigert. Die Kugelgröße zeigt den Digitalisierungsgrad insgesamt an. Je größer die Kugel, desto höher ist der Digitalisierungsgrad.

Es ergeben sich vier Quadranten: Technologien im Quadranten oben rechts zeigen Technologien mit einem überdurchschnittlichen und zunehmenden Digitalisierungsgrad. Unten links stehen Technologien mit einem unterdurchschnittlichen Digitalisierungsgrad, der zudem in den letzten Jahren abgenommen hat.

Technologien, die vertikal eng an der Nulllinie liegen, unterscheiden sich im Digitalisierungsgrad nicht stark vom globalen Wert. Leichte positive oder negative Abweichungen können vernachlässigt werden. Kleine Kugeln bezeichnen Technologien, die bislang keinen großen Digitalisierungsanteil erreicht haben. Das ist kein Problem, sofern diese Technologien nicht deutlich unterhalb der Nulllinie liegen. In diesen Fällen sind die Technologien grundsätzlich nicht stark digitalisiert.

Technologien, die deutlich oberhalb der Nulllinie liegen, haben in Bayern einen überdurchschnittlich hohen Digitalisierungsanteil. Technologien, die deutlich unterhalb der Nulllinie liegen, sind unterdurchschnittlich digitalisiert.

Abbildung 151  
Fortgeschrittene Digitalisierung in den bayerischen Leuchtturmtechnologien



Quelle: EconSight, 2020

Es zeigt sich, dass Bayern in der fortgeschrittenen Digitalisierung in vielen der Leuchtturmtechnologien gut bis überdurchschnittlich positioniert ist. Neben den Treibhausgas-Managementsystemen haben die Anpassungstechnologien in der Gesundheitsvorsorge und die intelligenten Stromnetze ein überdurchschnittliches digitales Niveau erreicht und in den letzten fünf Jahren zudem stark zugelegt. Ebenfalls überdurchschnittlich digitalisiert ist die vernetzte Fabrikation, wobei der Digitalisierungsgrad in den letzten fünf Jahren leicht abgenommen hat.

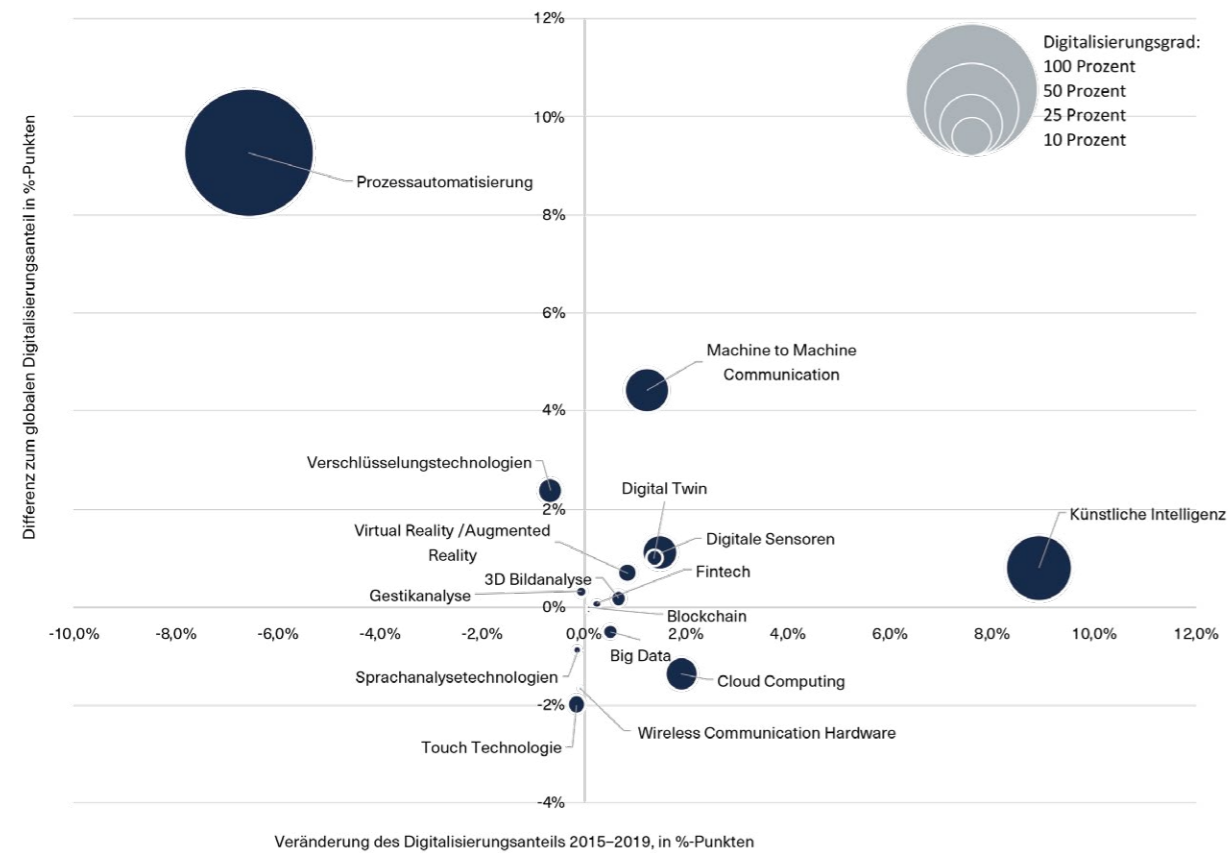
Auffällig sind die Präzisionslandwirtschaft, die Smart-Home-Technologien, die Supraleiter und die Mobilitätstechnologien (Elektrofahrzeuge, elektrisches Fliegen, Ladeinfrastruktur, vernetzter Verkehr). Diese Technologien weisen einen geringeren Digitalisierungsgrad auf, konnten aber, abgesehen von den Supraleitern und dem elektrischen Fliegen, in den letzten fünf Jahren aufholen.

Die über- und unterdurchschnittlich positionierten Technologien können mithilfe einer detaillierten Strukturanalyse hinsichtlich ihres Digitalisierungsgrads im Detail gezeigt werden.

Die folgenden Visualisierungen zeigen den Anteil der einzelnen Digitalisierungstechnologien pro Klimaschutztechnologie im Sinne einer Digitalisierungsstruktur. Die Kugelgröße zeigt den Anteil der jeweiligen Digitaltechnologie an den Gesamtpatenten der ausgewählten Klimatechnologie. Die vertikale und horizontale Positionierung entspricht den vorherigen Abbildungen.

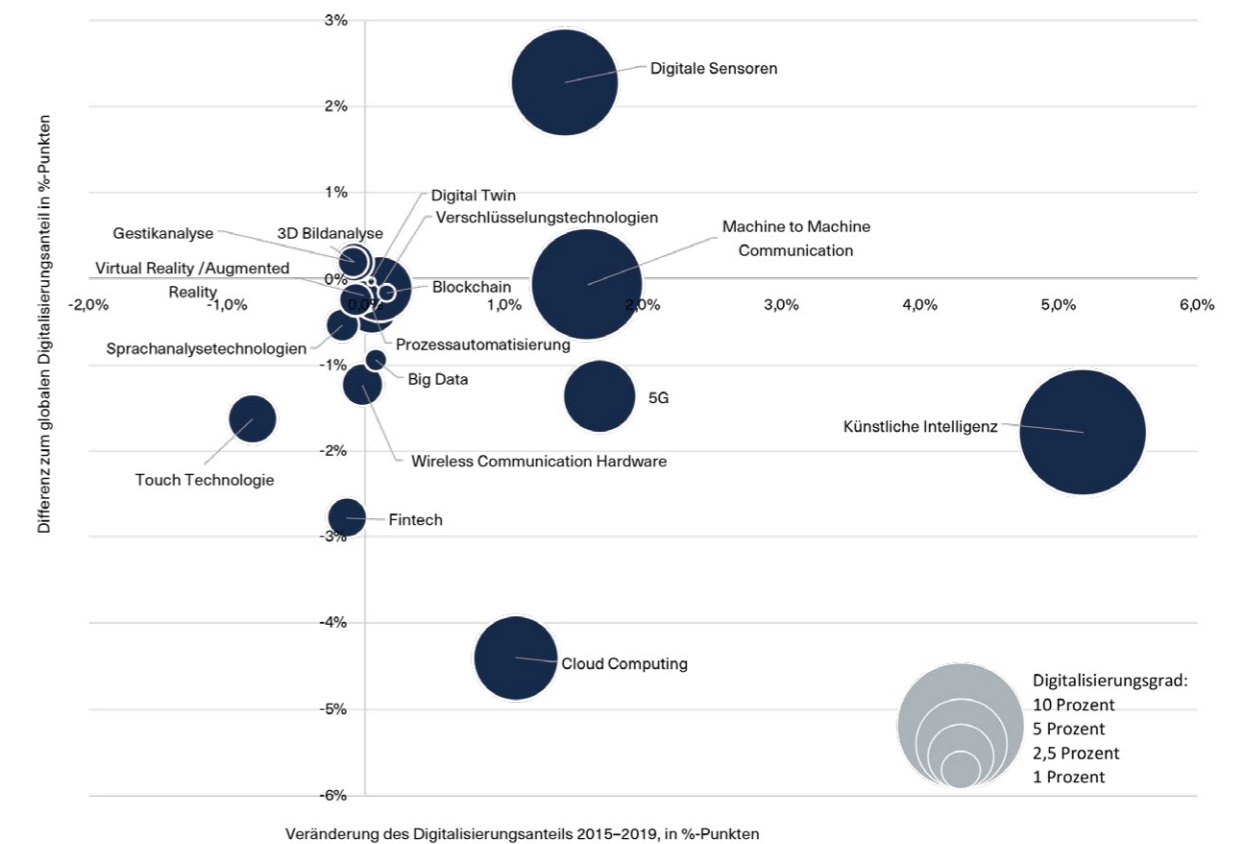
Es ergeben sich vier Quadranten: Technologien im Quadranten oben rechts zeigen Technologien mit einem überdurchschnittlichen und zunehmenden Anteil. Unten links stehen Technologien mit einem unterdurchschnittlichen Anteil, der zudem in den letzten Jahren abgenommen hat. Technologien rund um den Nullpunkt unterscheiden sich nicht wesentlich von der globalen Entwicklung.



Abbildung 152  
Digitalisierungsstruktur in vernetzter Fabrikation

Quelle: EconSight, 2020

In der vernetzten Fabrikation (Abbildung 152) ist die Prozessautomatisierung die wichtigste digitale Technologie. 80 Prozent aller Patente in der vernetzten Fabrikation sind ebenfalls der Prozessautomatisierung zugeordnet. Mit 80 Prozent liegt der Durchdringungsgrad dieser Technologie (Kugelgröße) um neun Prozentpunkte über dem globalen Durchschnitt (vertikale Achse). Allerdings hat der Anteil der Prozessautomatisierung in der vernetzten Fabrikation in den letzten fünf Jahren um 6,6 Prozentpunkte abgenommen. 21 Prozent aller Patente in der vernetzten Fabrikation sind gleichzeitig der künstlichen Intelligenz zuzuordnen. Damit liegt Bayern auch in dieser Technologie über dem globalen Durchschnitt und ist zudem sehr dynamisch. Es folgt die Maschine-zu-Maschine-Kommunikationstechnologie mit knapp zehn Prozent, aber weniger dynamisch. Auffällig ist die unterdurchschnittliche Positionierung des Cloud Computings.

Abbildung 153  
Digitalisierungsstruktur in der Technologie Verkehrsleitsysteme und vernetzter Verkehr

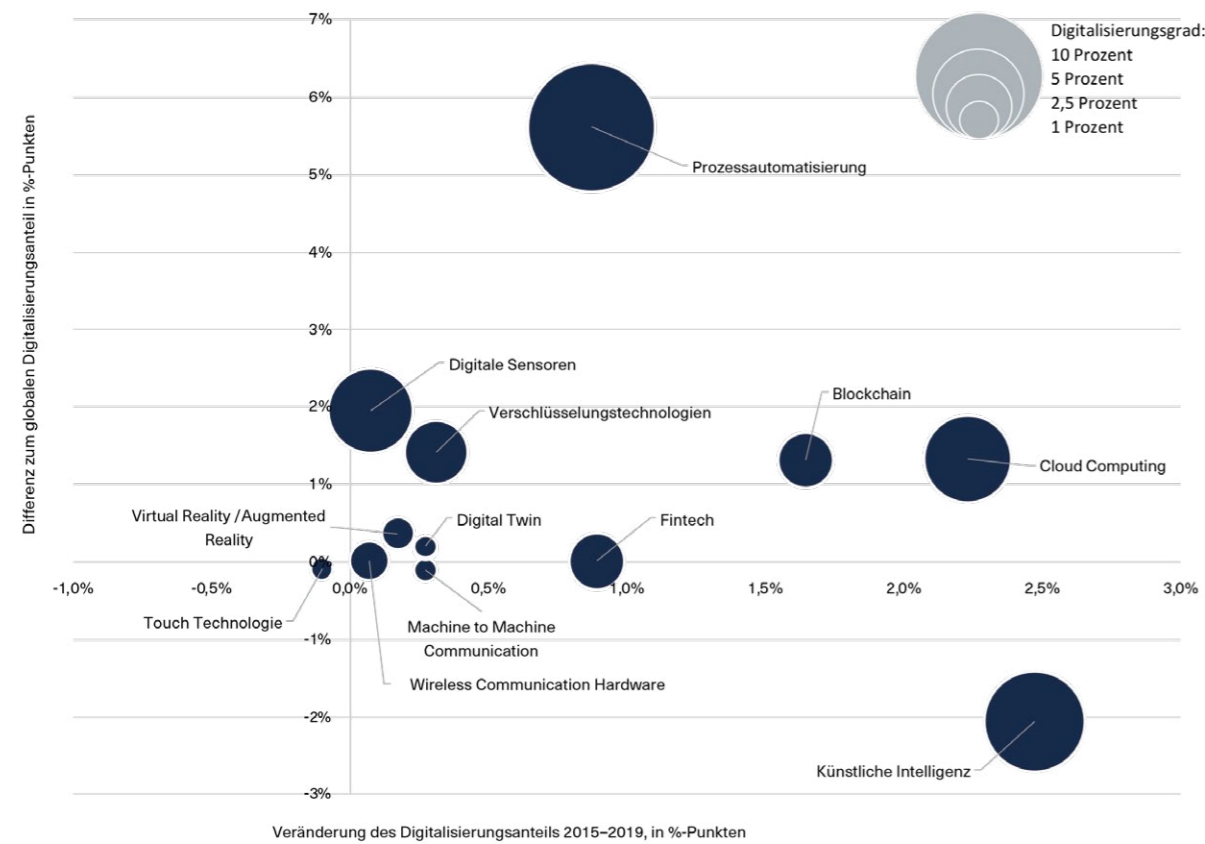
Quelle: EconSight, 2020

Die Technologie Verkehrsleitsysteme und vernetzter Verkehr (Abbildung 153) weist eine umfassendere digitale Struktur auf als die vernetzte Fabrikation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Verkehr sowohl aus der Perspektive des Fahrzeugs als auch übergeordnet aus Sicht des Verkehrsmanagements betrachtet werden kann. Während digitale Sensoren und verschiedenste Mensch-Maschine-Interaktionstechnologien mehrheitlich für die Fahrzeugperspektive verwendet werden, steht insbesondere die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation für die Vernetzung der Fahrzeuge.

Zu berücksichtigen ist außerdem, dass die digitale Durchdringung einer etablierten Technologie aus zwei Richtungen erfolgen kann. Einerseits erweitern klassische Industrieunternehmen ihre digitale Kompetenz zur Verbesserung ihrer Produkte und Prozesse. Andererseits suchen IT-Unternehmen konkrete industrielle Anwendungen für ihr digitales Know-how. Das Beispiel der autonomen Mobilität zeigt den Wettbewerb: Hier kämpfen die klassischen Automobilhersteller mit neuen Marktteilnehmern wie Alphabet und Intel um die Mobilität der Zukunft.

Insgesamt zeigt sich, dass der bayerische Digitalisierungsgrad in vielen Fällen unterdurchschnittlich ist. Auffallend sind vor allem die künstliche Intelligenz und das Cloud Computing. In der grundsätzlichen Struktur der fortgeschrittenen Digitalisierung bestätigt sich der zu Beginn des Kapitels formulierte Befund, dass im Bereich des vernetzten Verkehrs der Digitalisierungsgrad deutlich unterhalb des globalen Niveaus liegt.

Abbildung 154  
Digitalisierungsstruktur in der Technologie Intelligente Stromnetze



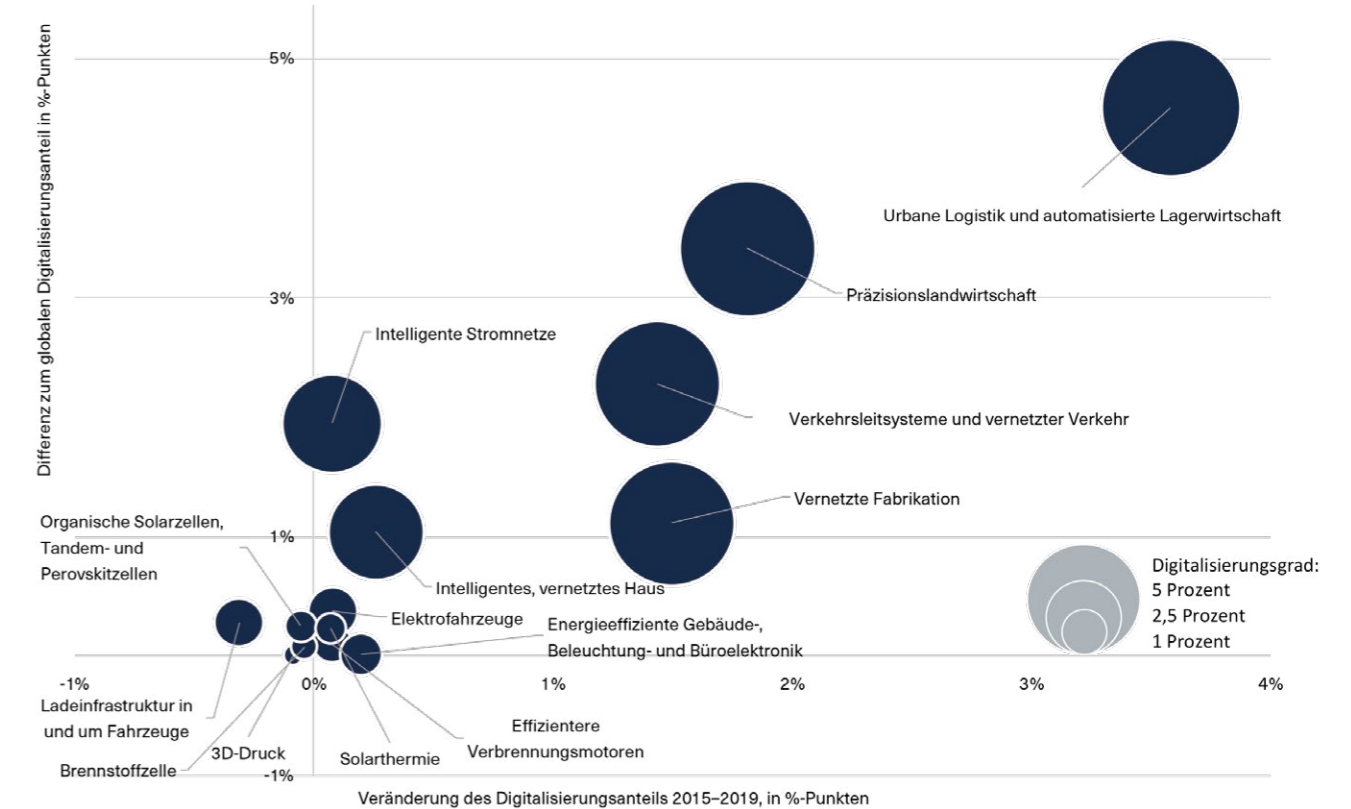
Quelle: EconSight, 2020

Die Technologie intelligente Stromnetze sind eine Schlüsseltechnologie zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen. In intelligenten Stromnetzen werden Stromerzeugung, -verbrauch und -speicherung durch Einsatz von Digitalisierungstechnologien miteinander verknüpft. Dies zeigt sich in der Struktur in der Bedeutung der Prozessautomatisierung, die in Bayern deutlich stärker ausgeprägt ist als im globalen Durchschnitt. Von besonderer Bedeutung ist die Ausfallsicherheit der Stromnetze, die mithilfe von Verschlüsselungstechnologien, u. a. auch mit Blockchain sichergestellt werden kann. Die Cloud-Technologie spielt hier ebenfalls eine wichtige Rolle und ist in Bayern überdurchschnittlich positioniert. Auffällig ist ebenso wie im Verkehr die geringere Ausprägung der künstlichen Intelligenz in Bayern.

Insgesamt zeigt die detaillierte Darstellung der Digitalisierungsstruktur in diesen drei Technologien, dass Bayern grundsätzlich gut aufgestellt ist, vor allem in der Prozessautomatisierung und den digitalen Sensoren. Schwächen zeigen sich insbesondere in der künstlichen Intelligenz und im Cloud Computing.

Um diesen Befund noch weiter zu fundieren, wird im Folgenden ein Perspektivenwechsel vorgenommen. Für jede der vier genannten Digitalisierungstechnologien wird die jeweilige Positionierung innerhalb der 30 Leuchtturmtechnologien gezeigt.

Abbildung 155  
Digitale Sensoren in den bayerischen Leuchtturmtechnologien

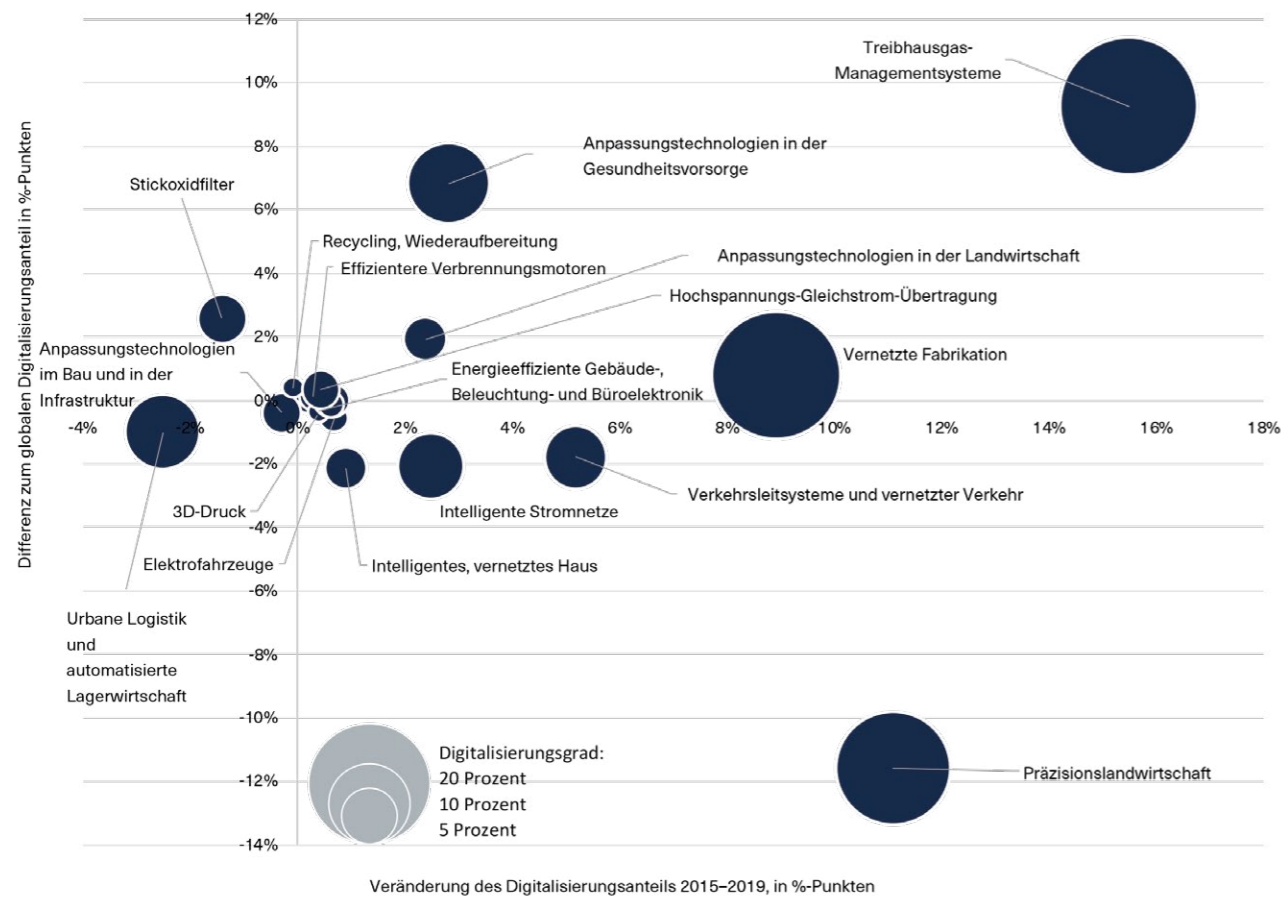


Quelle: EconSight, 2020

Die digitale Sensorik ist von besonderer Bedeutung für die Vernetzung. Abbildung 155 zeigt, dass die Sensorik in Bayern in fast allen Klimaschutztechnologien überdurchschnittlich positioniert ist und in den letzten Jahren zum Teil sehr dynamisch zugelegt hat (alle Technologien befinden sich oberhalb der horizontalen Nulllinie, die den globalen Durchschnitt markiert). Die Bedeutung der digitalen Sensorik zeigt sich auch in dem hohen Niveau in einzelnen Klimaschutztechnologien, wie der urbanen Logistik, der Präzisionslandwirtschaft, dem vernetzten Verkehr, der vernetzten Fabrikation, den intelligenten Stromnetzen und dem intelligenten vernetzten Haus.



Abbildung 158  
Künstliche Intelligenz in den bayerischen Leuchtturmtechnologien



Quelle: EconSight, 2020

Die künstliche Intelligenz spielt in vielen Klimaschutztechnologien eine Rolle. In den meisten Technologien weicht der Digitalisierungsgrad mit künstlicher Intelligenz nicht nennenswert vom globalen Durchschnitt ab. Neben den in absoluten Patenten eher kleinen Treibhausgas-Managementsystemen stechen vor allem die vernetzte Produktion mit einem sehr starken Anstieg des Digitalisierungsgrads in den letzten Jahren und die Anpassungstechnologien in der Gesundheitsvorsorge mit einem überdurchschnittlichen Digitalisierungsgrad hervor. Im vernetzten Verkehr, in den intelligenten Stromnetzen und im intelligenten vernetzten Haus liegt der Digitalisierungsgrad mit künstlicher Intelligenz unter dem globalen Durchschnitt.

Weitere Analysen zur Digitalisierungsstruktur der Klimaschutztechnologien sowie zur Bedeutung einzelner Digitalisierungstechnologien für Bayern finden sich als interaktive Grafiken auf der Webseite [www.econsight.ch/vbw](http://www.econsight.ch/vbw). Kasten 32 diskutiert den Beitrag der Digitalisierung zum Klimaschutz.

Kasten 32  
Digitalisierung und Klimaschutz

#### Wirkung auf den Energieverbrauch

Die Digitalisierung beeinflusst die Treibhaus-Emissionen im Wesentlichen durch ihre Wirkung auf den Energieverbrauch. Die Wirkung ist dabei ambivalent: Zum einen kann die Digitalisierung in allen Sektoren (von Gebäuden über die Energiewirtschaft bis hin zu Verkehr und Industrie) deutliche Energieeinsparungen ermöglichen. Zum anderen ist die Digitalisierung selbst ein bedeutender Energieverbraucher. Zudem fördert die Digitalisierung als Innovationsmotor die Entstehung neuer Produkte und Geschäftsmodelle mit eigenen Energieverbräuchen. Eine sektorübergreifende Netto-Betrachtung der Effekte der Digitalisierung liegt bislang nicht vor.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geht derzeit im Rahmen des Prozesses zur Entwicklung einer Roadmap Energieeffizienz 2050 der Frage nach, wie die Digitalisierung eingesetzt bzw. ausgerichtet werden kann, um einerseits die Erreichung der übergeordneten Klimaschutzziele zu ermöglichen und andererseits die Umweltwirkungen der Digitalisierung zu minimieren. Hierzu wurde ein Input- bzw. Hintergrundpapier erarbeitet, das u.a. Grundlage dieses Kastens bildet.<sup>307</sup>

#### Energiebedarf der Digitalisierung

Der Energiebedarf der Digitalisierung entsteht im Wesentlichen in drei Bereichen: Rechenzentren, Datenübertragung und Endgeräte (inkl. Internet of things, IoT).<sup>308</sup> Dabei ist unklar, inwieweit künftige Effizienzsteigerungen den infolge des erwarteten Anstiegs bei Datenmenge und digitalen (vernetzten) Endgeräten steigenden Energieverbrauch kompensieren können. So könnte bspw. die physikalische Effizienzgrenze bei Transistoren zwischen 2040 und 2060 erreicht werden.<sup>309</sup> Zugleich gehen Prognosen davon aus, dass sich die Anzahl netzverbundener Geräte von 15 Mrd. im Jahr 2018 auf 46 Mrd. im Jahr 2030 verdreifachen wird.<sup>310</sup>

#### Videostreaming

Insgesamt zeigt sich in den letzten Jahren eine Verlagerung des IT-Energiebedarfs von den privaten Haushalten in den GHD-Sektor, was u.a. mit der vermehrten Nutzung von Cloud-Infrastruktur und -Diensten (z.B. Streaming) sowie effizienteren Endgeräten im Zusammenhang steht. Prognosen gehen davon aus, dass Videostreaming bis zu 82 Prozent des gesamten Internetverkehrs im Jahr 2022 ausmacht.<sup>311</sup> Der Anteil könnte sogar noch höher ausfallen, da

die gestiegene Nutzung digitaler Technologien infolge der Corona-Krise bei der Prognose noch nicht berücksichtigt wurde. Im Zuge der Krise ist insbesondere die Nutzung von Videokonferenzen rasant gestiegen. Wie eine repräsentative Umfrage unter bayerischen Unternehmen zeigt, werden Videokonferenzen derzeit von rund 64 Prozent der Unternehmen genutzt, bei 28 Prozent ist der Einsatz in Planung. Ein Jahr zuvor waren es nur 26 und 13 Prozent.<sup>312</sup>

Die rasante Zunahme der Nutzung von Videokonferenzen führt zu einem deutlichen Anstieg des damit zusammenhängenden Energieverbrauchs (v.a. bei Rechenzentren, Infrastruktur und Endgeräten). Dabei sind mögliche Substitutionseffekte zu beachten, die sich bspw. ergeben können, wenn Videostreaming für Online-Meetings genutzt wird und damit Dienstreisen ersetzt werden (wobei Videokonferenzen tendenziell mit relativ hohen Anforderungen an Netz und Infrastruktur und damit Energiebedarfen einhergehen. Diese sind allerdings um Größenordnungen kleiner als die Energiebedarfe für den entsprechenden Pkw- und Flugverkehr, wie sich anhand der Energiebilanz nach Anwendungszwecken abschätzen lässt).

#### Energieverbrauch des gesamten Internets

Während bestimmte Trends (z.B. Zunahme von digitalen Endgeräten, Streaming etc.) beobachtbar sind, lässt sich der Energieverbrauch des gesamten Internets bzw. der Digitalisierung oder auch einzelner Anwendungen oder Dienste kaum allgemeingültig und präzise messen. Zum einen ist der Energieverbrauch u.a. von Anzeigegerät, Auflösung und Art der Netzwerkverbindung abhängig. Zum anderen ist die Abgrenzung digitaler Energieverbräuche unklar. Es stellt sich bspw. die Frage, ob nur der Energieverbrauch beim Laden des Akkus des Smartphones oder auch die Energieverbräuche bei dessen Produktion sowie bei der Datenübertragung und in den Rechenzentren erfasst werden sollten. Zudem führen die zunehmende Vernetzung und Nutzung von Cloud-Anwendungen dazu, dass die Daten international fließen und die Datennutzung somit einen Rucksack an nationalen und internationalen Energieverbräuchen und Emissionen über verschiedene Infrastrukturen erhält. Daher sind entsprechende Schätzungen mit Vorsicht zu interpretieren; zumal wenn sie die Zukunft betreffen, in der auch mit weiteren erheblichen Effizienzfortschritten bei den zugrunde liegenden Hardware-Technologien gerechnet werden darf.

307 Fraunhofer ISI et. al. 2020.

308 Kamiya, 2020.

309 IEA, 2017.

310 Paul et al., 2019.

311 Cisco, 2018.

312 vbw / GMS, 2020.

**Treibhausgas-Emissionen**

Schätzungen des Umweltbundesamtes (UBA)<sup>313</sup> gehen davon aus, dass sich die jährlichen Treibhausgas-Emissionen für Online-Speicher auf 105 bis 153 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äq. pro Terabyte Speicherkapazität belaufen. Die Treibhausgas-Emissionen in Rechenzentren für Videostreaming (in HD-Qualität) werden mit etwa 1,45 Gramm CO<sub>2</sub>-Äq. beziffert (v. a. für Server und Infrastruktur). Der im Rechenzentrum erzeugte Datenstrom muss durch Telekommunikationsnetze auf die Bildschirme zu Hause oder unterwegs geleitet werden. Der damit verbundene Energieverbrauch hängt im Wesentlichen von der Netzwerkverbindung ab. Die beispielhaften Berechnungen des Umweltbundesamtes zeigen, dass die Treibhausgas-Emissionen im Netzwerk von etwa zwei Gramm CO<sub>2</sub>-Äq. pro Stunde Videostreaming (in HD-Qualität) bei Nutzung des Glasfasernetzes über fünf Gramm im modernen 5G-Netz und 13 im derzeit verbreiteten 4G-Netz bis zu 90 Gramm im alten 3G-Netz reichen.

**Trainieren von KI**

Auch das Trainieren von KI geht mit einem hohen Energieverbrauch einher. So kann das Trainieren eines einzigen neuronalen Netzwerks nach einer beispielhaften Berechnung umgerechnet in etwa so viel CO<sub>2</sub> verursachen (etwa 313 Tonnen CO<sub>2</sub>) wie fünf Autos während ihres gesamten Lebenszyklus (inklusive Kraftstoff).<sup>314</sup> Allerdings hängt der Verbrauch, der v. a. auf die erforderliche Rechenleistung zurückzuführen ist, stark vom Einzelfall und die CO<sub>2</sub>-Emissionen v. a. vom Energiemix des Cloud-Anbieters ab. Hier wurde zur Umrechnung der Verbrauchs- in Emissionswerte ungefähr der Energiemix von Amazon Web Services zugrunde gelegt. Zudem ist zu beachten, dass die trainierten Netze anschließend Dienstleistungen für sehr viele Nutzer erbringen können, sodass die Energieverbräuche pro Nutzer

bzw. Anwendungsfall in der Regel gering ausfallen. Wenn KI bspw. eingesetzt wird, um den Energieverbrauch von Autos zu reduzieren, besteht durchaus die Möglichkeit, dass die damit verbundenen Einsparungen die trainingsbedingten Energieverbräuche (über-)kompensieren.<sup>315</sup>

Insgesamt gehen Schätzungen davon aus, dass die Digitalisierung derzeit für 1,7 bis 3,7 Prozent der weltweiten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich ist.<sup>316</sup>

**Einsparpotenzial durch Digitalisierung**

Die Digitalisierung birgt große Potenziale zur Reduktion des Energiebedarfs und damit der Treibhausgas-Emissionen, bspw.:

**– Vernetzte Systeme**

(Smart Home, Smart City, Smart Factory, etc.), die mit bedarfsorientierter Bereitstellung effizientere Energieverbräuche realisieren

**– Autonomer Verkehr und autonome Logistik**

Diese reduzieren Emissionen durch vorausschauendes Fahren

**– Effizientere Elektronik**

Diese senkt Verbräuche (zumindest sofern sie ineffiziente Technologien ersetzt und keinen überproportionalen Mehrverbrauch erzeugt)

**– Neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle**

können die Anzahl der genutzten Geräte bzw. Objekte (z. B. Pkw) senken bzw. die Nutzungseffizienz und Flexibilität steigern

**– Völlig neue „virtuelle“ Anwendungen**

können „Realwelt“-Dienstleistungen überflüssig machen – z. B. könnte nach der Videokonferenz die „Holo-Konferenz“ nochmals zu weniger Reiseaufwand führen

**01.7 „Klima-Innovationsbranche“ Bayern****Vorgehensweise zur Identifikation einer Klimabranche Bayern**

In diesem Kapitel wird anhand der in den vorangegangenen Kapiteln behandelten klimarelevanten Technologien eine sogenannte „Klima-Innovationsbranche“ Bayern mithilfe eines Matching-Verfahrens modelliert. Ziel ist es, eine näherungsweise Abschätzung für den Beitrag zu Wertschöpfung und Beschäftigung zu erarbeiten, den diejenigen Unternehmen leisten, die heute Aktivitäten in innovativen Klimaschutztechnologien aufweisen, welche in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich diskutiert wurden. Auf Basis der in den vorherigen Kapiteln verwendeten Patentanalyse hat EconSight sämtliche Unternehmen mit Sitz in Bayern identifiziert, die mindestens ein Patent in den klimarelevanten Technologien besitzen (Technologieüberblick und Definition siehe Teil V Kapitel 01.1). Diese Firmen bilden die Grundlage für die „Klima-Innovationsbranche“ Bayern.

Während Unternehmen in der klassischen Wirtschaftszweigsystematik anhand ihres primären Geschäftszwecks vollumfänglich genau einer Branche eingeordnet werden, sollen der „Klima-Innovationsbranche“ nur die innovativen klimarelevanten Aktivitäten der Unternehmen zugeordnet werden. Dazu wird der Anteil der klimarelevanten Patente an den Gesamtpatenten für jedes Unternehmen berechnet. Statt auf Patentanmeldungen wird auch hier der Fokus auf den rechtlichen Status der Patente gelegt, d.h. es werden nur gültige Patente und anhängige Patentanmeldungen zum Zeitpunkt der Studiererstellung (Juli 2020) gezählt. Patente, deren Schutz abgelaufen ist, oder Anmeldungen, die nicht erteilt worden sind, werden nicht gezählt.

**Strukturdaten**

Anschließend werden diese Firmen in der IW-Consult-Unternehmensdatenbank über einen Abgleich der Klarnamen sowie des Unternehmensstandortes identifiziert. Für die IW-Consult-Unternehmensdatenbank werden Strukturdaten von beDirect, einem Tochterunternehmen der Creditreform, genutzt. Die Datenbank enthält für alle Unternehmen in Deutschland Angaben zu Umsatz und Beschäftigtenzahlen, Wirtschaftszweigen und vielen weiteren Strukturmerkmalen. Auf diese Weise ist es möglich, die Größe der „Klima-Innovationsbranche“ Bayern sowie ihren Beitrag zu Wertschöpfung und Beschäftigung als einer Querschnittsbranche zu bestimmen. Abbildung 159 gibt die Vorgehensweise wieder.

**Bestimmung der volkswirtschaftlichen Kennzahlen**

Zur Bestimmung der volkswirtschaftlichen Kennzahlen wurden die Strukturdaten der identifizierten Unternehmen mit den Kennzahlen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung des Bundes und der Länder kombiniert. Während die Daten zur Beschäftigung aus den Strukturdaten eindeutig bestimmt werden konnten, wurden die Zahlen zur Wertschöpfung der Unternehmen der „Klima-Innovationsbranche“ aus den vorhandenen Daten zu Umsatz und Beschäftigtenzahl sowie dem Wirtschaftszweig hergeleitet, hier wird also mit Durchschnittsbranchen gearbeitet, denen die Unternehmen in der Wirtschaftszweigklassifikation zugeordnet sind. Der „Klima-Innovationsbranche“ wird pro Unternehmen jeweils der anteilige Umsatz- und Beschäftigungsteil zugeordnet, der zuvor anhand der Patentstruktur berechnet worden ist.

Damit unterscheidet sich das hier gewählte, forschungs- und patentorientierte Vorgehen von anderen Methoden, die zur Erfassung der Klima- bzw. Umweltbranche auf güter- oder produktionsbezogene Abgrenzungen anhand bestimmter Zuordnungskriterien im Rahmen der bestehenden Klassifikationssysteme zurückgreifen.

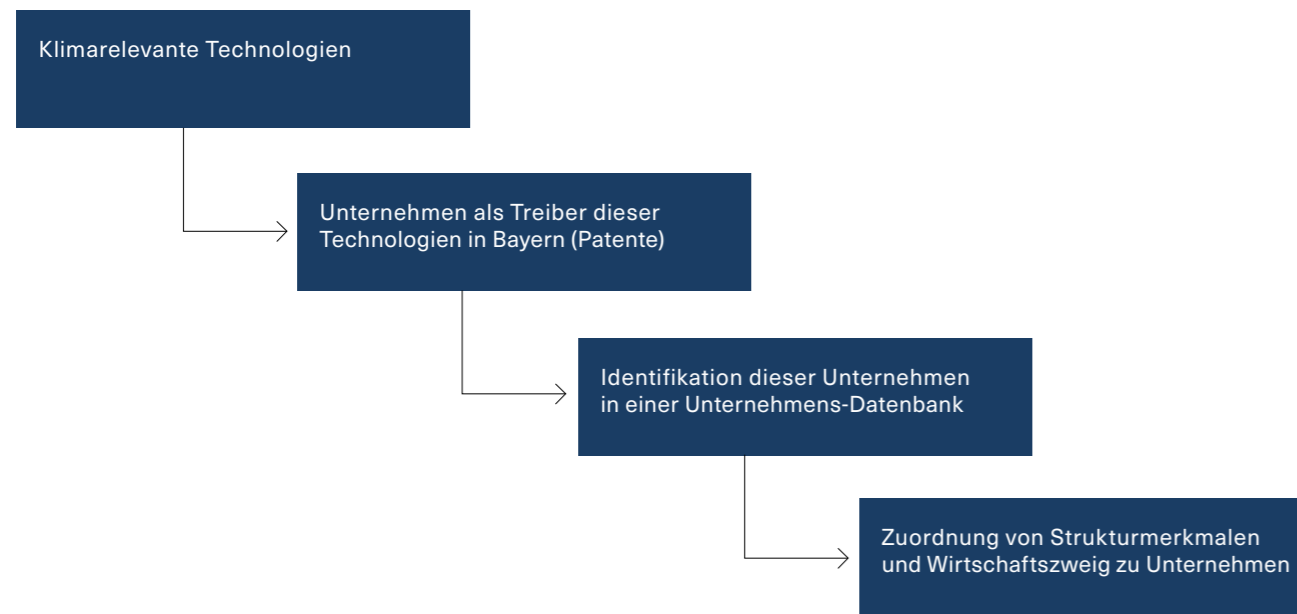
313 UBA, 2020h.

314 Strubell et al., 2019.

315 Spektrum, 2019b.

316 Spektrum, 2019a.

Abbildung 159

**Vorgehensweise bei der Zuordnung von Technologien zu Branchen, Wertschöpfung und Beschäftigung**

Quelle: Eigene Darstellung TwinEconomics, 2020

**Die „Klima-Innovationsbranche“ Bayern**

Die so definierte und ermittelte „Klima-Innovationsbranche“ Bayern ist wie folgt charakterisiert:

- Insgesamt sind 750 Unternehmen mit klimarelevanten Patentaktivitäten in Bayern identifiziert worden.
- Die „Klima-Innovationsbranche“ Bayern kommt auf rund 129.000 Beschäftigte und einen direkten wirtschaftlichen Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt Bayerns von rund 17,4 Mrd. Euro.
- Das entspricht rund 1,7 Prozent der Erwerbstätigen in Bayern und 3,0 Prozent der Wertschöpfung im Jahr 2019.
- 87 Prozent der Beschäftigten und rund die Hälfte der insgesamt identifizierten Unternehmen sind dem Industriesektor zugeordnet. Zugeordnete Dienstleistungsunternehmen haben in der Regel deutlich weniger Beschäftigte.
- Die „Klima-Innovationsbranche“ wäre hinter dem Maschinenbau und der Automobilindustrie der drittgrößte industrielle Wirtschaftszweig in Bayern, bezogen auf die Erwerbstätigen.
- Die bayerische „Klima-Innovationsbranche“ hätte hinsichtlich Bruttowertschöpfung und Erwerbstätige eine ähnliche wirtschaftliche Bedeutung wie die gesamte deutsche Pharmaindustrie.
- In der „Klima-Innovationsbranche“ befinden sich vor allem Unternehmen mit überdurchschnittlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben und hoher Innovationsaktivität.
- Daraus ergibt sich eine Produktivität von durchschnittlich 135.000 Euro Wertschöpfung je Erwerbstätigen. Das ist fast doppelt so hoch wie in der bayerischen Wirtschaft im Durchschnitt (rund 74.000 Euro Wertschöpfung je Erwerbstätigen) und rund 50 Prozent höher als im Durchschnitt des Verarbeitenden Gewerbes in Bayern (rund 90.000 Euro Wertschöpfung je Erwerbstätigen).

Selbstverständlich ist die Berechnung mit Annahmen und Einschränkungen behaftet. Es werden nur Unternehmen identifiziert, die in klimarelevanten Technologien patentieren, d.h. reine Anwendungsunternehmen ohne geistiges Eigentum werden nicht gezählt. In diesem Sinne wird die Größe der Branche unterschätzt, und ihre Produktivität überschätzt. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Unternehmen ihr geistiges Eigentum auch nutzen und in den klimarelevanten Technologien aktiv sind. In der Praxis dürfte das nicht der Fall sein und die klimarelevanten Aktivitäten wären überschätzt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass jedes Patent die gleiche Wertigkeit besitzt, d.h. aus dem Verhältnis der klimarelevanten Patente zu den Gesamtpatenten ergibt sich der Anteil der klimarelevanten Aktivitäten der Unternehmen. Allerdings unterscheiden sich die Patentintensitäten je nach Technologie. Beispielsweise ist die Elektrotechnik deutlich patentintensiver als Metalltechnologien. Ob dieser Effekt zu einer Überschätzung oder Unterschätzung der Ergebnisse führt, ist unklar.

Die besonders detaillierte und differenzierte Patentdatenlage erlaubt es, die relevanten Unternehmen direkt zu identifizieren und bottom-up zu einer „Klima-Innovationsbranche“ zu aggregieren. Klassische Branchenanalysen starten in der Regel top-down (ohne Bezug auf einzelne Unternehmen) und nähern sich dieser Fragestellung mit der anteiligen Zuordnung von Bruttowertschöpfung und Beschäftigung mit Hilfe von Exportstrukturen, Input-Output Tabellen, Güterklassifikationen oder Selbstdeklarationen. Auch dahinter stehen Annahmen, die beispielsweise davon ausgehen, dass die Produktions-, Beschäftigungs- und Exportstrukturen auch in den Branchenteilen, die der Querschnittsbranche zugeordnet werden, ceteris paribus jeweils dem gesamten Branchendurchschnitt entsprechen.

Die Ergebnisse der Analysen sind trotz der unterschiedlichen Herangehensweisen ähnlich und unterscheiden sich primär aufgrund der unterschiedlichen Definition klimarelevanter Aktivitäten. In dieser Studie ist eine breite und differenzierte Definition verwendet worden ist, die entsprechend viele Unternehmensaktivitäten einbezieht.

## 02

Game-Changer-Technologien<sup>317</sup>

**Game-Changer können die Transformation deutlich vereinfachen und die Systemorganisation verändern. Dies ist allerdings von deutlichen technologischen „Durchbrüchen“ im Gegensatz zu stetigen Entwicklungen abhängig. Ob und wann sie den Durchbruch schaffen, ist sehr viel unbestimmter als bei den vorher diskutierten Technologiefeldern.**

## Inhalte

02.1	Sektorübergreifende Game Changer	315
02.2	Sektorenspezifische Game Changer	318

In Klimaschutzszenarien werden vor allem Technologien angenommen, deren Wirkungsweisen, Einbindung ins Energiesystem sowie deren Entwicklungsmöglichkeiten mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit eingeschätzt werden können. Das betrifft heute den im vorherigen Kapitel dargestellten und im Detail analysierten Strauß von i.w.S. Erneuerbaren-Energie- und Effizienztechnologien sowie Infrastrukturtechnologien (z. B. Wasserstoffproduktion, NET). Bei dieser Betrachtung gibt es grundsätzlich einen „konservativen Bias“, da hiermit Bekanntes und als höher wahrscheinlich eingeschätztes eingesetzt wird, um die Umsetzungsfähigkeit innerhalb des betrachteten Zeithorizonts als möglich und wahrscheinlich (und nicht „Science-Fiction“) einzuschätzen und kommunizierbar zu machen.

In den Labors der Technologieentwicklung finden sich jedoch auch weitere Optionen, die zwar (noch) nicht in Szenarienbetrachtungen und politische Strategien einbezogen werden, jedoch trotzdem erhebliche Lösungsbeiträge zu den Herausforderungen des Klimawandels leisten könnten. Solche Technologien werden häufig als „Game Changer“ bezeichnet. Sie zeichnen sich durch zwei relativ abstrakte Eigenschaften aus:

- Ihre Entwicklung ist sehr unsicher, es lässt sich keine Wahrscheinlichkeit zuordnen. Die technologischen Ausprägungen können aus heutiger Sicht noch in verschiedene Richtungen erfolgen. Die Möglichkeiten, Lernkurven zu durchlaufen und in „Märkte“ zu diffundieren, hängen von zahlreichen externen Einflussfaktoren (z. B. Konkurrenztechnologien, Konsumentenpräferenzen oder politischen Rahmenbedingungen) ab und lassen sich nicht abschätzen. Aufgrund dieser Unsicherheiten können sie nicht in normale quantitative Szenarienfelder aufgenommen werden.
- Falls solche Technologien konkurrenzfähig werden und ein Durchbruch ermöglicht wird, haben sie das Potenzial, das gesamte System sehr stark zu verändern, neue Märkte und Strukturen zu schaffen – und den Klimaschutz oder Klimaanpassung oder beides leichter zu machen.

„Game-Changer-Szenarien“ können entworfen werden, haben aber hochspekulativen Charakter und können i. A. nur qualitativ und illustrativ entwickelt werden, da sich dadurch wesentliche Wechselwirkungen im Energie- oder Ernährungssystem ändern können. Um das Gesamtbild abzurunden, werden hier einige der bekanntesten Kandidaten für „Game Changer“ kurz beschrieben und eingeordnet, da sie in der klimapolitischen Diskussion gelegentlich benannt und ihnen Lösungspotenziale (s. o.) zugeschrieben werden.

## 02.1 Sektorübergreifende Game Changer

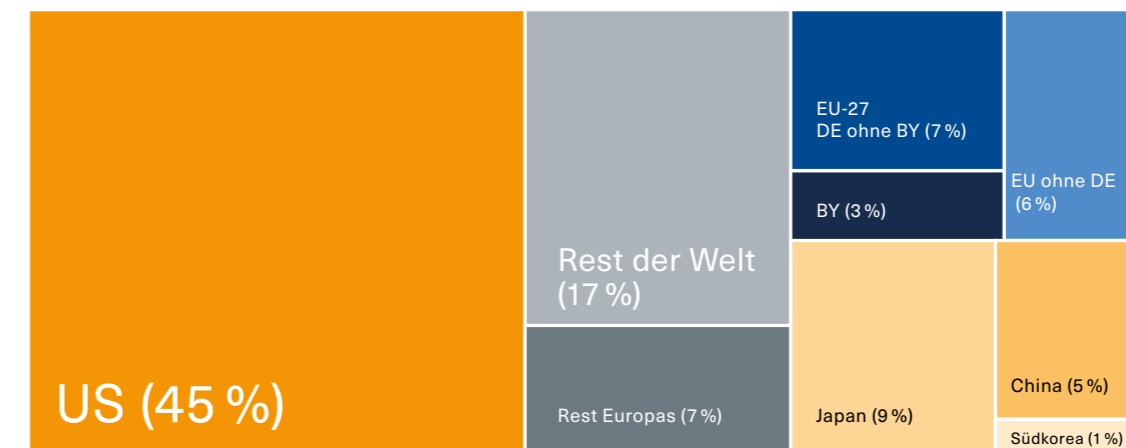
## Wasserstoff-Direktproduktion

Anstatt den Wasserstoff per Elektrolyse mit erneuerbarem Strom herzustellen oder Methanreformation mit CCS zu betreiben, kann bei der Direktproduktion Wasserstoff CO<sub>2</sub>-frei und mit geringeren Verlusten an technischer Energie mithilfe von Sonnenenergie erzeugt werden. Vielversprechende Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Direktproduktion von Wasserstoff unter Direkteinsatz von Sonnenenergie in entsprechenden dafür konstruierten „Wasserstoff-Solarzellen“ ohne die Nutzung teurer oder seltener Materialien umgesetzt werden kann. Als zugrunde liegende Technologien werden vor allem die Wege der künstlichen Photosynthese auf Basis von Algen sowie katalytische anorganische Verfahren verfolgt. Könnten diese Zellen wirtschaftlich in der Breite oder auch zentral in sehr großen „Farmen“ installiert werden, ergäben sich weitere Potenziale für eine umfassende Wasserstoffwirtschaft. Diese würden die Organisation des Energiesystems deutlich verändern, sowohl bezüglich des Einsatzes erneuerbarer Energien, die dann nicht mehr für die Wasserstoffproduktion eingesetzt würden, als auch bezüglich der Infrastruktur und der Organisation von Flexibilität. Diese möglichen Veränderungen sind in ihren Ausprägungen sehr stark von der Kostenentwicklung der Technologie abhängig, da sich entsprechend die Konkurrenzbeziehungen zur erneuerbaren Stromerzeugung verändern.

In der folgenden Abbildung wird der Anteil der wichtigsten Länder an den Weltklassepatenten in dieser Technologie dargestellt. Es zeigt sich, dass die USA für fast die Hälfte aller Weltklassepatente verantwortlich sind (45 Prozent). Bayern hält rund 3,1 Prozent der Weltklassepatente und damit knapp ein Drittel der deutschen Patente.

Abbildung 160

## Wasserstoff-Direktproduktion – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019



Quelle: EconSight, 2020

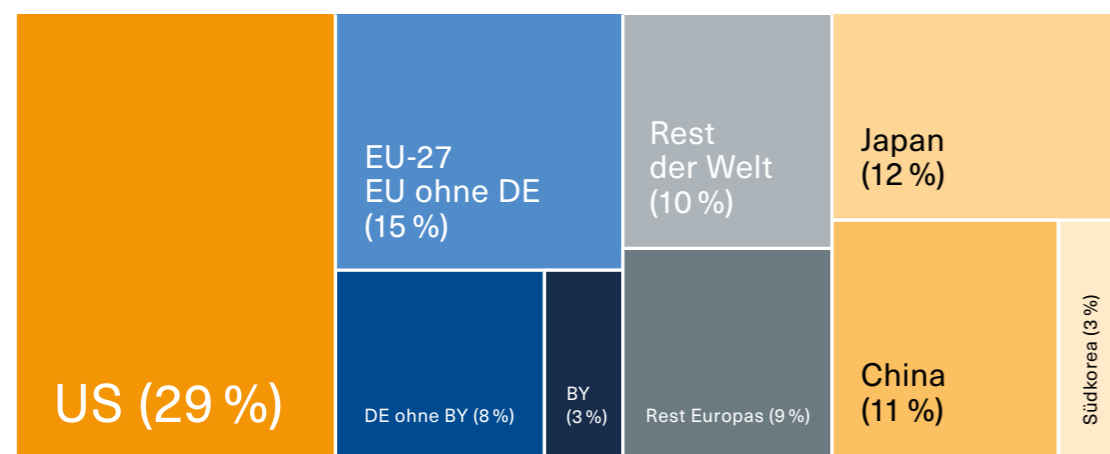
**Neuartige und verbesserte Energiespeicher**

Die Entwicklung neuartiger und verbesserter Stromspeicher könnten, insbesondere bei sinkenden Preisen und erhöhtem Wirkungsgrad der Speicherung, die Fluktuationen von Stromerzeugung und Stromverbrauch besser ausgleichen und so einen Nachteil bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen kompensieren. Zudem könnten sie einen höheren Autarkiegrad des Systems und vom Stromnetz unabhängige Verbraucher ermöglichen und so die Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs vorantreiben und verstärken. Darüber hinaus könnten verbesserte Energiespeicher zu einer schnelleren Durchdringung von Elektromobilität (ggf. auch im Schwerlastverkehr) sowie zu neuen Anwendungen in der Luft-, Raum- und Schifffahrt führen. Die Notwendigkeit und die Kosten des Ausbaus der Stromnetze könnten durch neuartige bzw. verbesserte Speicher ebenfalls reduziert werden.

Batteriespeicher können auch als virtuelle Übertragungskapazität im Stromnetz eingesetzt werden, indem zwei Batteriespeicher an den Endpunkten einer Übertragungsleitung installiert werden. Wenn die Leitung voll ausgelastet ist, kann auf der Überschussseite Strom gespeichert werden und auf der Gegenseite kann die Batterie Strom einspeisen. Sobald die Leitung nicht mehr voll ausgelastet ist, kann der zwischengespeicherte Strom von der Überschussseite auf die Batterie am anderen Ende der Leitung übertragen werden. Neben Batteriespeichern sind auch andere Energiespeicher potenzielle Game Changer. So sind für sehr hohe Leistungen Superkondensatoren als kurzzeitige Energiepuffer geeignet. Speichersysteme mit komprimierter Luft können in unterirdischen Kavernen als saisonale Energiespeicher analog zu Pumpspeicherkraftwerken genutzt werden. Diese Speicher würden in direkte Konkurrenz zum Wasserstoff treten und damit das Energie-, Verkehrs- und Rohstoffsystem gegenüber den bisher gedachten Organisationsformen deutlich verändern.

Die EU liegt mit 26 Prozent aller Weltklassepatente nur knapp hinter den USA (29 Prozent). Bayern hält 3,4 Prozent der Weltklassepatente in Energiespeichertechnologien.

Abbildung 161  
**Neuartige und verbesserte Energiespeicher – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019**



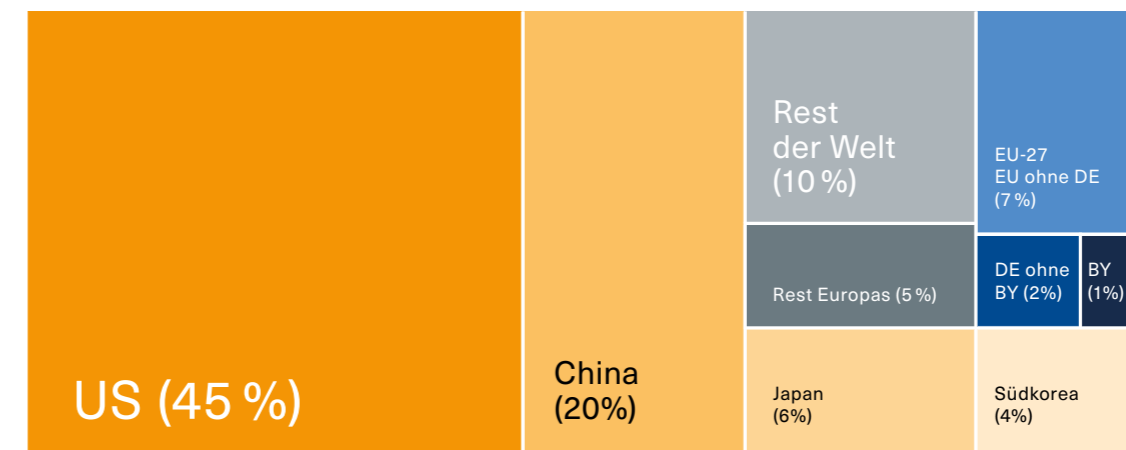
Quelle: EconSight, 2020

**Künstliche Intelligenz**

Künstliche Intelligenz (KI) hat das Potenzial, den Energieverbrauch signifikant zu senken sowie die Flexibilität zu erhöhen. So kann eine KI in einer Smart-Home-Umgebung oder im industriellen Umfeld lernen, wann welche Energieverbräuche anfallen, diese optimieren, „unnötige“ Verbräuche reduzieren und den Bedarf an Energiespeichern verringern. Zudem besteht die Möglichkeit, Standorte für und Einsatz von erneuerbaren Energien mithilfe von KI zu optimieren und so die Ausbeute zu erhöhen. Insbesondere im Kontext von „Smart Cities“ oder „Smart Urban Regions“ wird der KI ein hohes Potenzial an effizienter Steuerung zugeschrieben, mit dem sich auch die Verhältnisse zwischen Zentralität und Dezentralität erneuerbarer Energieproduktion gegenüber den bisher gedachten Systemorganisationen deutlich verändern könnten. Gegenwärtig ist nicht abzusehen, welche Fortschritte durch den Einsatz von KI erreicht werden können.

Die USA dominieren die künstliche Intelligenz mit 45 Prozent der Weltklassepatente, gefolgt von China mit 20 Prozent. Die EU kommt insgesamt auf zehn Prozent, wovon rund ein Drittel auf Deutschland entfällt. Bayern kommt auf einen Weltanteil von einem Prozent. Innerhalb der EU liegt der Anteil Bayerns damit bei zehn Prozent.

Abbildung 162  
**Künstliche Intelligenz – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019**



Quelle: EconSight, 2020



## 02.2 Sektorspezifische Game Changer

### Neuartige Dämmstoffe

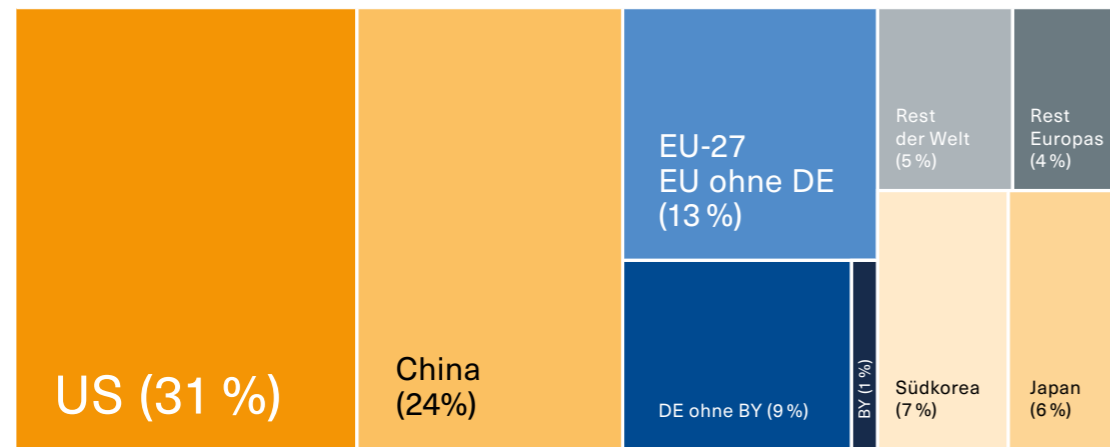
Im Gebäudesektor lassen sich durch Wärmedämmung der Außenhüllen erhebliche Einsparungen bei Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen. Das Aufbringen der bisher verfügbaren Dämmstoffe ist jedoch relativ aufwendig und teuer, sodass die energetische Sanierung durch verbesserte Dämmung von Bestandsgebäuden nur sehr langsam voranschreitet. Neuartige Dämmstoffe, wie z. B. sprühbare Nanoschäume mit verbesserter Wärmedämmleistung und einfacherer Anwendung könnten hier einen Durchbruch bewirken und innerhalb relativ kurzer Frist einen signifikanten Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten. Damit könnten die Sanierungsraten schneller hochlaufen, die Kosten deutlich sinken und Gebäude mit schwierigeren Geometrien energetisch saniert werden. Die Spielräume im Spannungsfeld zwischen „Effizienz“ und „Erneuerbaren“ im Gebäudesektor würden sich vergrößern.

Die Bedeutung der künstlichen Intelligenz für die Klimaschutztechnologien ist bereits im vorherigen Kapitel detailliert beleuchtet worden. Die hier dargestellten Aktivitäten in der künstlichen Intelligenz sind breiter definiert und umfassen die gesamte Technologie ohne thematische Einschränkung.

In den Dämmstoffen entfällt mehr als die Hälfte aller Weltklassepatente auf die USA (31 Prozent) und China (24 Prozent). Die EU kommt insgesamt auf 23 Prozent und liegt damit nur knapp hinter China. Knapp die Hälfte der EU-Forschung in den Dämmstoffen kommt aus Deutschland. Deutschland hat einen Weltanteil von zehn Prozent, Bayern kommt auf ein Prozent.

Abbildung 163

### Neuartige Dämmstoffe – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019



Quelle: EconSight, 2020

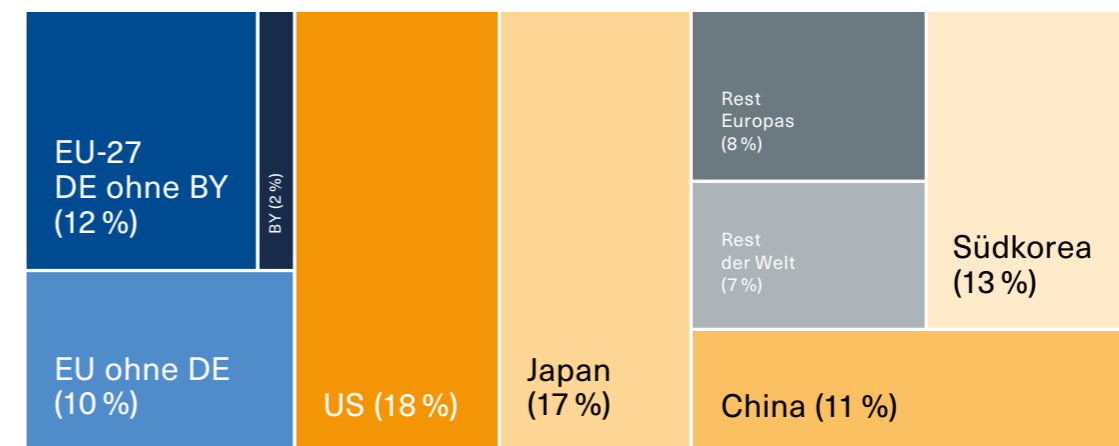
### Organische Photovoltaik

Organische Photovoltaik zeichnet sich dadurch aus, dass sie perspektivisch deutlich günstiger sein wird als Photovoltaik, die auf kristallinen mineralischen Halbleitern basiert. Zudem erlauben organische Photovoltaikzellen dünne und biegsame Trägermaterialien, was sich positiv auf das mögliche Anwendungsspektrum auswirkt (z. B. Gebäudefassaden) und neuartige Produktionsprozesse erlaubt. So kann organische Photovoltaik perspektivisch z. B. mit bekannten Verfahren auf Folien gedruckt werden. Dies ermöglicht infolge der Skalierbarkeit und des geringen Ressourcen- und Energieverbrauchs erhebliche Preissenkungen und erhöht das Potenzial zur Integration von Photovoltaik in Gebäuden, Fassaden, Fenstern etc.. Bspw. kann die Installation von Photovoltaik an Fassaden den Ertrag bei tiefstehender Sonne im Winter erhöhen und damit die Winterlücke, bei der die Stromerzeugung im Winter deutlich geringer ist als im Sommer, reduzieren. Somit könnten, bei schnellerem Hochlauf als in den Szenarien (konservativ) angenommen, die Ausgestaltung des Stromsystems sowie die Notwendigkeit der Saisonalspeicherung verringert werden, was die Ausgestaltung des Systems stark vereinfachen könnte. Allerdings bleiben auch bei organischer Photovoltaik gewisse Sockelkosten für die Elektrotechnik (z. B. Wechselrichter) und die Installation bestehen.

In der organischen Photovoltaik führt die EU mit 24 Prozent vor den USA (18 Prozent) und Japan (17 Prozent). Bayern kommt auf 2,3 Prozent der Weltklassepatente in dieser Technologie.

Abbildung 164

### Organische Photovoltaik – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019



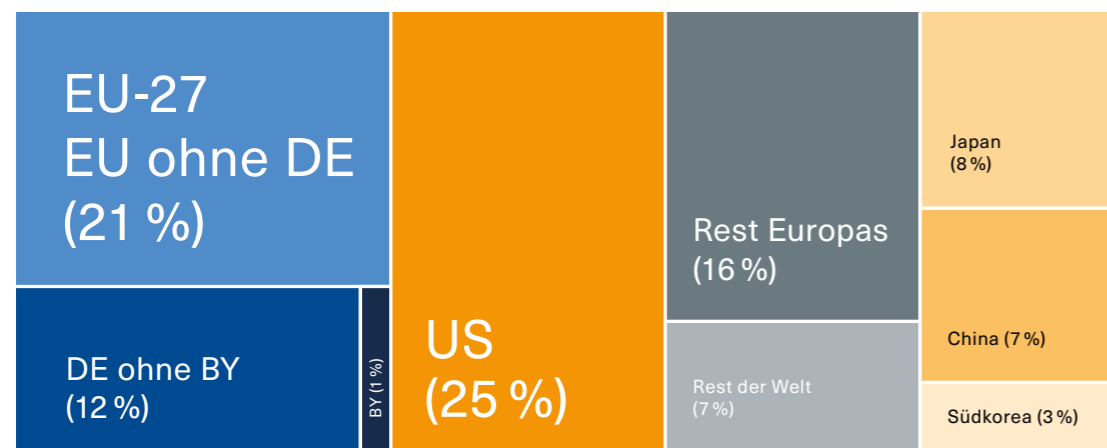
Quelle: EconSight, 2020

**Schwimmende Windkraftanlagen**

Bisher sind fast alle Offshore-Windkraftanlagen fest im Meeresboden verankert. Dadurch sind die Flächen für Windparks auf Gebiete mit niedriger Wassertiefe (weniger als 60 Meter) und zugleich gutem Windangebot begrenzt. Die Entwicklung schwimmender Plattformen, die die Windkraftanlagen tragen und mit Ketten an Bodenankern befestigt sind, erlaubt Windparks in größeren Wassertiefen. Dadurch vergrößert sich das wirtschaftliche Ausbaupotenzial, zumal weiter entfernt von der Küste in der Regel günstigere Windverhältnisse herrschen und Akzeptanzprobleme geringer sein dürften. Schwimmende Windkraftanlagen werden in Pilotanlagen bereits erprobt und könnten schon in naher Zukunft über spezifische Anwendungsfälle hinaus wirtschaftlich werden.

In der schwimmenden Windkraft zeigt sich die Dominanz Europas. Der Kontinent kommt insgesamt auf 50 Prozent aller Weltklassepatente in dieser Technologie. Davon entfallen rund 34 Prozent auf die EU. Innerhalb der EU ist Deutschland für rund ein Drittel aller Weltklassepatente in schwimmenden Windkraftanlagen verantwortlich. Bayern liegt bei rund einem Prozent. Die grossen asiatischen Nationen liegen in dieser Technologie mit insgesamt 18 Prozent der Weltklassepatente weit hinter Europa und den USA (25 Prozent).

Abbildung 165

**Schwimmende Windkraftanlagen – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019**

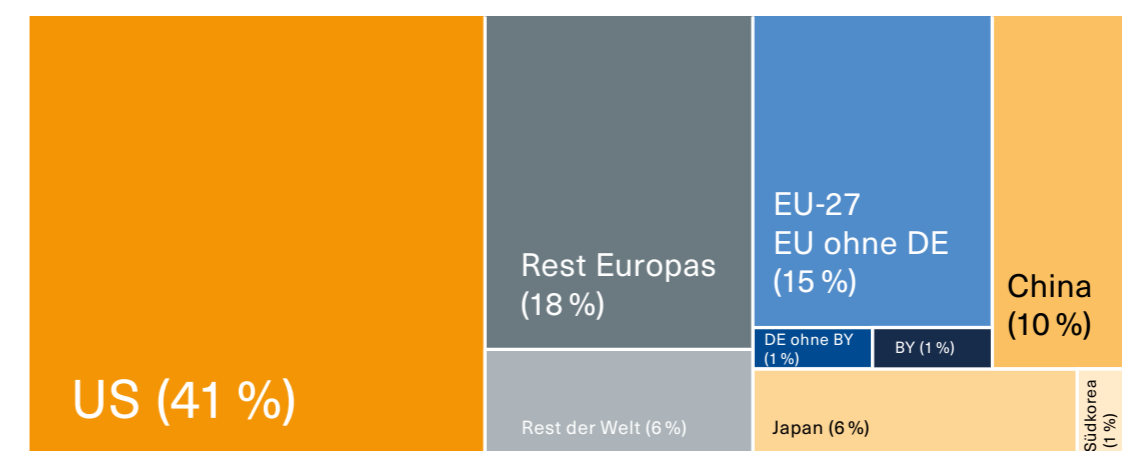
Quelle: EconSight, 2020

**Kernfusion**

Während bei der Kernspaltung Energie aus der Spaltung von schweren Atomkernen gewonnen wird, soll bei der Kernfusion Energie durch die Fusion leichter Atomkerne produziert werden. Für Atomkerne, die leichter sind als Eisen, ist die Kernfusion exotherm. Das Funktionsprinzip wurde bereits 1950er-Jahren erfolgreich nachgewiesen. Um die Fusion dauerhaft aufrechtzuerhalten, muss sich die fusionierende Materie in einem Vakuum befinden und extrem hoch erhitzt werden, um ein Plasma zu bilden. Der hohe Energieaufwand, um die ersten Teilchen zu fusionieren, sowie die Umwandlung der freigesetzten Fusionsenergie in nutzbare Energie wie Strom erfordern einen enormen technischen Aufwand. Auch wenn die Ausgangsstoffe für die Kernfusion relativ kostengünstig verfügbar sind, sind die Investitionskosten für die technischen Anlagen sehr hoch. Bisher hat noch kein Fusionsreaktor einen stabilen und energiepositiven Betrieb erreicht und erst recht keinen Strom einspeisen können. Weltweit sind einige Forschungs- und Testanlagen, die unterschiedliche Konstruktionsprinzipien verfolgen, in Betrieb. Neben den großen Forschungsanlagen existieren auch einige kleinere Start-ups (auch in Europa und Bayern), die Teilkonzepte, Teiltechnologien oder andere Ansätze als diejenigen in den Großforschungsanlagen verfolgen. Es ist zu erwarten, dass Kernfusion als nutzbare Energiequelle in naher Zukunft nicht zur Verfügung steht. Sollte eine Technologie den Durchbruch erreichen und mittelfristig produktive und wirtschaftlich absehbar konkurrenzfähige Reaktoren ermöglichen, hängt es von den konkreten Eigenschaften der Reaktoren (Werkstoffe, Größenordnung, Flexibilität, Regelbarkeit) ab, wie und wie schnell sie in das Energiesystem integriert werden können. Dieses resultierende System würde sich – abhängig von den Kostenstrukturen und Flexibilitätsoptionen – längerfristig vom heutigen Stromsystem strukturell deutlich unterscheiden.

In der Kernfusion zeigt sich die Stärke der USA mit 41 Prozent der Weltklassepatente. Auffällig sind die geringen Aktivitäten Deutschlands und Bayerns mit jeweils 1,4 Prozent. Die restlichen Mitgliedstaaten der EU kommen insgesamt auf 15 Prozent und liegen damit noch vor China (zehn Prozent) und Japan (sechs Prozent).

Abbildung 166

**Kernfusion – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019**

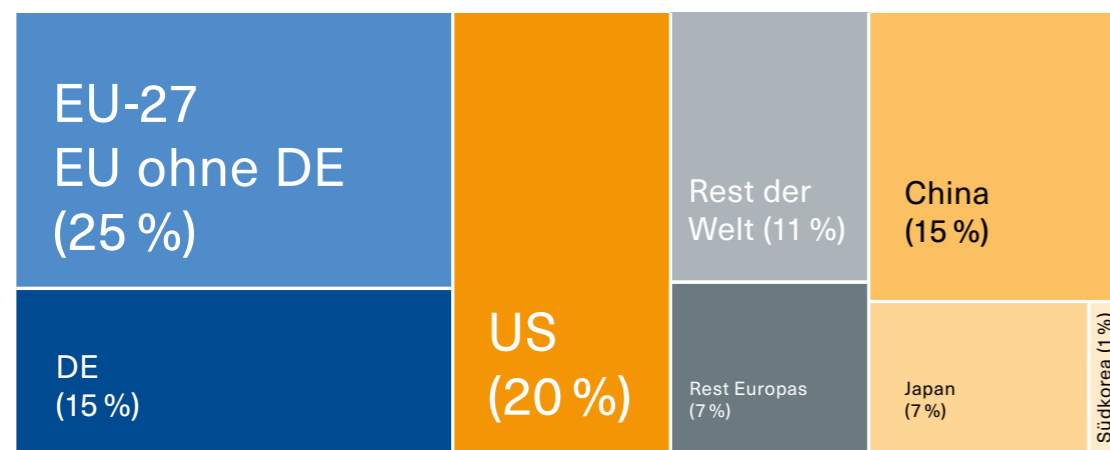
Quelle: EconSight, 2020

**Fleischersatz**

Da durch die Viehhaltung sowie die dafür erforderliche Futtermittelproduktion ein großer Anteil der landwirtschaftlichen Treibhausgas-Emissionen entsteht, bieten qualitativ vergleichbare Fleischsubstitute ein großes Potenzial zur Emissionsreduzierung. Die Massentierhaltung großer Nutztiere wie Rinder und Schweine ist neben dem Ausstoß großer Mengen von Methan- und Lachgasemissionen (v.a. Rinder, auch alle anderen Wiederkäuer) auch mit erheblichem Wasserverbrauch und der Nutzungskonkurrenz um Nahrungsmittel wie Soja verbunden. Durch den Ersatz von Fleisch durch Substitute nicht tierischen Ursprungs würden die entsprechenden Emissionen sowie der Wasser- und der Sojaverbrauch sinken. Zudem würden die bisher für die Viehhaltung genutzten Flächen anderweitig zur Verfügung stehen. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass auch Ersatzprodukte, wenn sie ähnliche ernährungsphysiologische Qualitäten in Aminosäure- und Fettsäureprofilen sowie Collagengerüsten aufweisen sollen, auch Ausgangsmaterialien erfordern, die wiederum aus Pflanzenextrakten gewonnen und konzentriert werden müssen. Ein Teil der erforderlichen Futtermittelproduktion mit seinem Flächenbedarf bleibt also auch in diesem Fall erforderlich. Ähnliche Effekte ließen sich erzielen, wenn konventionelles Fleisch durch Ersatzprodukte auf Basis von Insekten und Würmern substituiert würde. Insekten haben ein sehr viel besseres Verhältnis von Wachstum (Proteinproduktion) pro Futtermenge und können schnell und effizient gezüchtet werden. Die weltweit mindestens 1.400 essbaren Insektenarten können als essenzielle Quelle von Proteinen, Fetten, Mineralen und Vitaminen dienen. Für ihre Nutzung ist es allerdings entscheidend, ob sie in der breiten Bevölkerung Akzeptanz finden. Sollten sich solche Technologien schneller als in den Szenarien unterstellt durchsetzen, würde dies gravierende Veränderungen im Landwirtschafts- und im Ernährungssystem bedeuten und insbesondere die Emissionen der Landwirtschaft stark verringern. Entsprechend könnte der Einsatz von (teuren) Negativ-Emissionstechnologien reduziert werden.

In den Fleischersatztechnologien entfallen rund 40 Prozent aller Weltklassepatente auf die EU. Deutschland ist für 15 Prozent der Weltklassepatente verantwortlich. Bayern forscht ebenfalls zu Fleischersatztechnologien, allerdings erreicht bislang kein bayerisches Patent das Weltklassenniveau. Global dominiert die EU. Die USA liegen mit 20 Prozent weit dahinter, gefolgt von China mit 15 Prozent.

Abbildung 167  
**Fleischersatz – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019**



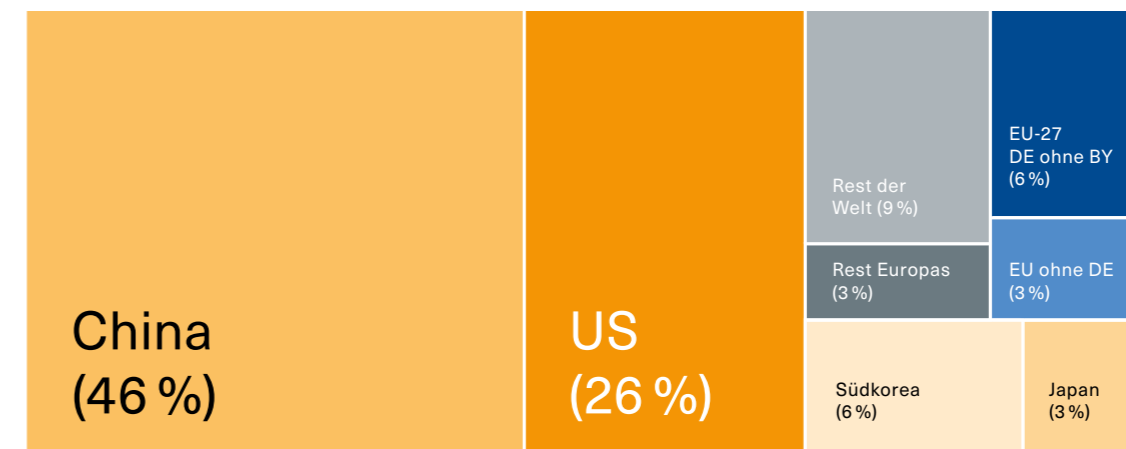
Quelle: EconSight, 2020

**Emissionsarme Reisproduktion**

Der Reisanbau, der zu rund 90 Prozent in Asien erfolgt, ist neben der Massentierhaltung von Rindern eine der relevanten menschengemachten Quellen für Methan. Reis wird traditionell auf Feldern angebaut, die die meiste Zeit zwischen Aussetzen und Ernten geflutet sind. In stehendem Wasser werden Pflanzenreste von Mikroben zersetzt, wobei Methan entsteht. Durch alternierendes Trockenlegen und Fluten der Felder kann die Anzahl der Mikroben erheblich gesenkt werden, was in der Folge auch die Methan-Emissionen reduziert. Nachhaltige Reisproduktion kann zudem die Erträge steigern. Hierfür sind nicht technische Maßnahmen der limitierende Faktor, sondern soziale Faktoren wie Kommunikation und Information. Nachhaltige Veränderungen sind hier schwierig herbeizuführen, da ein großer Teil der Reisfelder traditionell von Kleinbauern in Asien bewirtschaftet wird und es keine zentralen Anlaufstellen gibt.

Technologisch dominieren China und die USA. Auf China entfällt knapp die Hälfte der Weltklasseforschung in der emissionsarmen Reisproduktion, gefolgt von den USA mit 26 Prozent. Auffällig sind die geringen Aktivitäten Südkoreas und Japans. Die EU kommt auf insgesamt neun Prozent, davon ein Drittel aus Deutschland. Bayern hat keine Weltklasseaktivitäten in dieser Technologie vorzuweisen.

Abbildung 168  
**Emissionsarme Reisproduktion – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019**



Quelle: EconSight, 2020

# VI

## Synthese und Fazit

Der Studienteil fasst zentrale Erkenntnisse der Studie zusammen und ordnet sie in den Gesamtkontext ein. Dies dient der Ableitung von Handlungsempfehlungen.

## Synthese und Fazit

### Mit einem Umbau verschiedener technologischer Systeme begegnen wir dem Klimawandel. Deutsche und bayerische Entwickler und Unternehmen stellen für diese Aufgabe spezifische Technologien bereit und erschließen damit Chancen auf vorhandenen und neuen Märkten.

#### Thema und Zielsetzung

Die Studie hat den Themenkomplex Klimawandel und Klimaschutz zum Gegenstand. Im Mittelpunkt steht die Analyse der Potenziale, Chancen und Herausforderungen für die deutsche und bayerische Wirtschaft, die sich aus der Transformation hin zur Klimaneutralität auf unterschiedlichen Technologiegebieten ergeben. Dabei wird mithilfe von Szenarien berücksichtigt, dass das Ausmaß an globaler Kooperation beim Klimaschutz ungewiss ist und folglich unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann. Das übergeordnete Ziel der Studie ist es aufzuzeigen, in welchen Bereichen zentrale Handlungsoptionen und -notwendigkeiten bestehen, wie Bayern in diesen Bereichen aufgestellt ist und inwiefern die bayerische Wirtschaft einen positiven Beitrag zum Klimaschutz leisten und zugleich von der Transformation profitieren kann. Damit stehen Nachhaltigkeitsaspekte mit Bezug zu Ökologie und Ökonomie im Zentrum der Studie. Auf gesellschaftlichen Fragen, wie Akzeptanz bzw. Begeisterung für bestimmte Technologien, liegt zwar kein Fokus, sie sind aber ein wichtiger und notwendiger Baustein in der Gesamtbetrachtung.<sup>318</sup>

#### Herausforderung Klimawandel

Der anthropogene Klimawandel zeigt mittlerweile deutliche Auswirkungen auch in bislang gemäßigten Klimazonen. Wetterextreme wie Hitzesommer, Dürren, Waldbrände, starke Stürme, Starkregenereignisse, Überschwemmungen, die noch im letzten Jahrhundert vergleichsweise selten vorkamen, treten mittlerweile in hoher Häufung auf. Die Risiken und Schäden sind in den letzten Jahren stark und nicht linear gewachsen und weisen inzwischen signifikante Größenordnungen auf. Besonders betroffen sind ohnehin verletzliche Weltregionen und die entsprechenden Bevölkerungen, sowie – auch in Mitteleuropa – individuelle Akteursgruppen, z. B. die Landwirtschaft, die Binnenschifffahrt und von den damit zusammenhängenden Warenströmen abhängige Unternehmen, wie z. B. in der Chemieindustrie, Immobilienbesitzer oder ältere Menschen.

#### Kippunkte

Die aktuellen Entwicklungen des Klimasystems weisen darauf hin, dass sehr bald einige „Kippunkte“ wie das Tauen der Permafrostböden sowie der Verlust des grönländischen Eisschildes und des arktischen Eises erreicht werden. Die Gefahr schneller und hochvolatiler Veränderungen der lokalen Klimata und Wetterbedingungen wächst somit – es sind insbesondere Ökosysteme gefährdet, die die Nahrungsgrundlage der Menschen und der Menschheit bilden, z. B. in den Meeren oder in der Landwirtschaft bestimmter Klimazonen. Darüber hinaus sind durch Stürme und Meeresspiegelanstieg weltweit die küstennahen Siedlungs- und Wirtschaftsstrukturen gefährdet, in denen mehrere Milliarden Menschen leben. Zudem gefährden Hochwasser flussnahe Infrastrukturen und Trockenheiten die Nutzbarkeit der Flüsse zum Transport und zur Kühlung, z. B. von Großkraftwerken oder sonstigen Industrieanlagen.

#### Treibhausgase

Der anthropogene Klimawandel wird durch die großen Mengen an Treibhausgasen (allen voran CO<sub>2</sub>, aber auch Methan, Lachgas sowie einige Fluor- und Chlorkohlenwasserstoffe mit sehr hoher spezifischer Wärmekapazität) angetrieben, die von den Industrieländern und den zunehmend industrialisierten Schwellenländern emittiert werden. Der Hauptteil dieser Emissionen stammt aus den Energiesystemen (Strom- und Wärmeerzeugung, Verkehrssystem,

industrielle Prozesswärme), aus industriellen Prozessemissionen sowie aus der Landwirtschaft, hier vor allem aus der Fleisch-, Soja- und Reisproduktion. Diese Emissionen verändern die Strahlungsbilanz der Erde – grob gesprochen halten sie aufgrund ihrer spezifischen Wärmekapazität Wärme in der Atmosphäre zurück. Sie übersteigen bei Weitem die natürlichen Aufnahme- und Verarbeitungskapazitäten des Erdsystems (Ozeane, Böden, Gesteine, Biosphäre), was zu steigenden Durchschnittstemperaturen und den damit verbundenen weiteren klimatischen Auswirkungen führt.

#### Betroffenheit Deutschlands und Bayerns gegenüber den Folgen des Klimawandels

Deutschland und Bayern sind besonders vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels – weniger aufgrund ihrer direkten Exposition gegenüber Naturgefahren bzw. klimatischen Veränderungen als vielmehr aufgrund ihrer starken (wirtschaftlichen) Verflechtungen mit anderen Ländern und den dortigen Auswirkungen. Gleichwohl bestehen auch direkte Vulnerabilitäten durch das gehäufte Auftreten von Extremwetterlagen sowie nachweislich gestiegene Durchschnittstemperaturen. Hier sind vor allem die folgenden Aspekte zu nennen:

- Das häufigere Auftreten starker Dürreperioden, ggf. sogar in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren, betrifft vor allem die Land- und Forstwirtschaft. Es führt durch direkte Effekte wie Verdorren und indirekte Effekte wie das verstärkte Auftreten von Schädlingen wie z. B. dem Borkenkäfer zu Reduktionen der Ernte und wirtschaftlichen Schäden. Perspektivisch werden Investitionen in neue und angepasste Formen des Wassermanagements sowie in entsprechende, der Wetter- und Bodensituationen angepasste Sorten als Anpassungsreaktion erfolgen müssen. Damit verbunden wird eine höhere Diversität in den Sorten und Beständen (z. B. in den Wäldern) aufgebaut werden müssen, um die Auswirkungen begrenzen zu halten.
- Verbunden mit den Dürreperioden erhöht sich das Risiko von Waldbränden.
- Häufigeres, nahezu regelmäßiges Auftreten von Hitzewellen mit Temperaturen über 35 Grad C und Tropennächten mit Temperaturen, die nicht unter 20 Grad C sinken, wirken belastend und gefährdend insbesondere für geschwächte und ältere Personen. Arbeit, sowohl körperliche Arbeit als auch Büroarbeit, unter solchen Bedingungen ist mit deutlichen Produktivitätseinbußen verbunden. Um mit den entsprechenden Belastungen umzugehen, wird die Qualität von Gebäuden perspektivisch an solche Verhältnisse angepasst werden müssen und z. B. die Ausstattung mit technischen Möglichkeiten zur Kühlung auch in Wohngebäuden zum Standard werden. Längerer Aufenthalt außerhalb gekühlter Gebäude kann in entsprechenden Hitzeperioden zum Risiko werden.
- Vermehrtes Auftreten von Starkregenfällen kann zu verstärkter Erosion und Schäden an der Infrastruktur und Gebäuden führen. In Gefahrenregionen (z. B. in der Nähe von überschwemmungsgefährdeten Flüssen) verlieren Gebäude an Wert. Längerfristig muss auch für diese Ereignisse das Wassermanagement angepasst werden, um die größeren Wassermengen zu speichern und die Erosionsgefahr zu verringern.
- Vermehrtes Auftreten starker Stürme führt bereits heute zu Schäden an Wäldern, Infrastruktur und Gebäuden und erhöht entsprechende Unfallrisiken.

#### Migrationsströme

Neben der erhöhten Vulnerabilität durch wirtschaftliche Verflechtungen mit stärker gefährdeten Regionen ist auch damit zu rechnen, dass weltweit gegenüber der heutigen Situation deutlich verstärkte Migrationsströme entstehen, da sowohl feuchte als auch trockene Regionen zwischen den Wendekreisen und ggf. darüber hinaus sowie Küstenregionen zunehmend schlechtere Lebensgrundlagen und -bedingungen bieten.

Dies bedeutet für deutsche Unternehmen zum einen, dass sie sich in vielfältiger Art und Weise an die Folgen des Klimawandels anpassen müssen (z. B. Diversifizierung von Vorleistungsimporten und Transportwegen), und zum anderen, dass sie von globalen Klimaschutzanstrengungen profitieren können. Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad C würde die Auswirkungen der Folgen des Klimawandels global sowie in Deutschland und Bayern erheblich verringern.

### Naturgefahren

Insgesamt zeigt sich bei der direkten Exposition gegenüber Naturgefahren tendenziell ein Nord-Süd-Gefälle. So sind bspw. die südlichen Regionen Europas von extremer Hitze, Dürre und Verlusten in der Landwirtschaft in der Regel stärker betroffen als nördlichere Regionen Europas. Gleichwohl sind die Schadenssummen durch wetterbedingte Ereignisse (u. a. Stürme, Überschwemmungen sowie Temperaturextreme) in Deutschland, wie auch in anderen großen Volkswirtschaften, vergleichsweise hoch. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass es in diesen Ländern relativ viele (versicherte) Infrastrukturen gibt, die Schaden nehmen können und die Meldemechanismen gut funktionieren.

### Gesundheitliche Schäden

Für die Länder der EU sind u. a. die gesundheitlichen Schäden von größter Bedeutung, jedoch auch von der größten Unsicherheit gekennzeichnet, da die genauen Auswirkungen etwa invasiver Krankheiten, wie auch die aktuelle Pandemie zeigt, nur schwerlich antizipierbar sind. Neben Krankheiten wirken sich steigende Temperaturen vor allem auf die Arbeitsproduktivität von Menschen aus, wie die Hitzewellen der vergangenen Jahre eindrucksvoll ahnen ließen. Für die hier untersuchten Szenarien bedeutet dies, dass mit gleicher Beschäftigung in den Szenarien mit hohen Emissionen weniger Output produziert werden kann und somit die ohnehin nicht großen Wachstumsunterschiede dadurch noch nivelliert werden.

### Kosten des Klimawandels

Der Klimawandel wirkt sich auf vielfache Art und Weise auf die Volkswirtschaften aus, bspw. durch Schäden nach Extremereignissen, durch langfristige, langsame Veränderungen in der Landwirtschaft sowie durch langfristig sichtbar werdende gesundheitliche Risiken. Europa, und damit Deutschland und Bayern, liegt in den meisten Klimaszenarien in einer gemäßigten Region und weist im Durchschnitt Verluste von deutlich unterhalb einem Prozent des BIP auf. Allerdings sind Klimawandelfolgen viel stärker ein regionales Phänomen als der Ausstoß von Klimawandelgasen, der ortsunabhängig zur globalen Erwärmung beiträgt. Aufgrund der hochgradig regionalspezifischen Ausprägungen sind die Kosten des Klimawandels von großer Unsicherheit geprägt. In einer Region, die von Dürren, Starkregen, Sturm oder Hochwasser betroffen ist, können die Schäden zeitweise auf ein Vielfaches des genannten Werts anwachsen.

Über den Indikator BIP hinaus führt Klimawandel zur Beeinträchtigung menschlichen Wohlergehens durch Hitzewellen und damit verbunden einerseits zur Reduktion der Arbeitsproduktivität und andererseits zu gesundheitlichen Schäden oder sogar zum Tod. Zudem besteht die Gefahr disruptiver Klimaeffekte, die bspw. mit der Unbewohnbarkeit bestimmter Regionen, Hungersnöten und Migrationsströmen verbunden sind.

Die Klimawandelfolgen werden infolge der Trägheit des Klimasystems in der langen Frist weiter zunehmen. Durch Anpassungsmaßnahmen vor Ort können die Folgen zwar in gewissem Rahmen begrenzt werden, solche Maßnahmen sind aber in der Regel teurer als verpasste Vermeidungsoptionen.

### Technologische Optionen

Die weltweiten Emissionen auf ein Maß zu reduzieren, das die globale Erwärmung in einem voraussichtlich beherrschbaren Temperaturbereich hält (im globalen Durchschnitt unter zwei Grad C, besser unter 1,5 Grad C), ist technisch grundsätzlich möglich. Gerade die erneuerbaren Energieproduktionstechnologien sowie zahlreiche Effizienztechnologien sind bereits entwickelt und werden in den spezifischen Märkten eingesetzt. Der Umbau des Verkehrssystems beginnt gerade; hier sind neben der Elektrifizierung und dem Wechsel der Antriebssysteme auch die Durchdringung mit digitalen Technologien wie autonomes Fahren oder neue Formen urbaner Logistik ein Treiber für Veränderungen. Diese betreffen sowohl die Verkehrsorganisation als auch die Gestaltung und Produktion der Fahrzeuge und der Antriebe. Für die Übergangszeit (bis ca. 2035) spielt die Effizienzsteigerung der Verbrennermotoren und -Fahrzeugen noch eine wichtige Rolle.

In einigen grundstoffnahen Industriezweigen – Metallerzeugung, Chemie, Kunststoffproduktion, Zementproduktion – werden grundsätzliche Prozessumstellungen, wie z. B. Direktreduktion mit Wasserstoff sowie die Abscheidung und Speicherung von emittiertem CO<sub>2</sub> (CCS) erforderlich sein. Falls dies bei Biomasseverbrennungsprozessen erfolgt, können hierbei sogar Senken durch sogenannte Negativ-Emissionstechnologien (NET) erschlossen werden, die für die globale Treibhausgas-Bilanz benötigt werden. Auch hier sind grundsätzlich funktionierende Technologien bereits entwickelt, jedoch häufig noch nicht marktreif.

Die Verfahren für die Produktion von Wasserstoff als Energieträger und synthetischen (kohlenstoffhaltigen) Brenn- und Treibstoffen mithilfe von erneuerbarem Strom sind grundsätzlich technologisch entwickelt und funktionsfähig. Hier ist es jedoch notwendig, dass entsprechende Rahmenbedingungen für die Entwicklung von Absatzmärkten und zumindest ein gewisses Maß an Investitionssicherheit geschaffen werden. Dies gilt insbesondere für die Produktion von synthetischen Brenn- und Treibstoffen in Weltregionen mit entsprechend günstigen klimatischen und räumlichen Bedingungen für die günstige Produktion der benötigten Mengen an erneuerbarem Strom. Diese finden sich vor allem im Wüstengürtel der Erde, z. B. in der MENA-Region (Nahe Osten und Nordafrika), aber auch in Zentralasien, z. B. in Kasachstan.

Über diese direkten Technologien (die den Umbau der einzelnen Systeme direkt vorantreiben und unterstützen) hinaus werden Technologien benötigt, die den Systemumbau optimieren und begleiten. Zu diesen zählen insbesondere Recycling und Kreislaufwirtschaft, um einen effizienten Umgang mit den notwendigen Rohstoffen zu gewährleisten.

### Emissionen in der Landwirtschaft

Um die Emissionen der Landwirtschaft zu reduzieren, ist neben Düngermanagement, striktem Flächenmanagement (Vermeidung der Zerstörung von Kohlenstoffsinken für landwirtschaftliche Produktionsflächen), Futtermanagement für Wiederkäuer („Methanpille“) voraussichtlich auch eine Reduktion der Tierbestände vor allem an Wiederkäuern erforderlich. Dies ist mit insgesamt weltweit weniger Fleischkonsum verbunden, was Verhaltens- und Akzeptanzanforderungen stellt. Die Produktion von hochwertigen Fleischalternativen kann hier helfen.

### Politische Rahmenbedingungen

Dieser notwendige technologische Umbau insbesondere aller industrialisierten Wirtschaftssysteme sowie der Verkehrssysteme erfordert eine deutliche Veränderung der politischen Rahmenbedingungen. Bei den derzeitigen Preisregimen für fossile Energieträger, die praktisch keine Externalitäten abbilden, lohnt sich die Umsetzung emissionsfreier Technologien derzeit in vielen Fällen nicht. Ein Anfang ist bspw. mit dem europäischen Emissionshandelsystem (ETS) gemacht, das in den letzten Jahren Erfolge bei den Lachgasemissionen sowie beim Kraftwerkseinsatz und den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen gezeigt hat.

### Wettbewerb

Bei Unternehmen, die auf internationalen Märkten konkurrieren, führen unterschiedliche Umweltstandards (wie auch Sozialstandards) zu verzerrtem Wettbewerb, sodass hier idealerweise für ein globales Problem auch globale Lösungen und Vereinbarungen angestrebt werden sollten. Seit ca. 30 Jahren werden internationale Verhandlungen in diesem Kontext geführt – zunächst um die Anerkennung des Problems, dann um Zielsetzungen. Es müssen internationale Verpflichtungen und idealerweise Instrumente, Sanktions- und Ausgleichsmechanismen folgen. Die entsprechenden Verhandlungen gestalten sich extrem zäh, da die Interessen unterschiedlicher Staatengruppen stark divergieren und die Auswirkungen der zahlreichen verschiedenen denkbaren Instrumente und Instrumentengruppen (wie z. B. globaler Emissionshandel, unterschiedliche Emissionspreise oder -steuern, gemeinsames Ordnungsrecht, fixe Carbon Budgets, neue Zollregelungen wie Carbon Border Adjustment) jeweils unterschiedlich starke Auswirkungen auf die verschiedenen Länder und Unternehmen haben.

### Technologien in Deutschland und in Bayern

In Deutschland und in Bayern wird in allen erforderlichen Technologiefeldern im Bereich der Klima- und Nachhaltigkeitstechnologien geforscht, und in den meisten Feldern sind Deutschland und Bayern auch bezüglich der Innovationskraft weltweit konkurrenzfähig. Bayern stellt hier ca. 25 Prozent der deutschen und zehn Prozent der europäischen Forschungsaktivitäten in Patenten mit Weltklassequalität bereit.

### Volkswirtschaftliche Auswirkungen

Eine Umsetzung ambitionierter Klimaziele lässt sich in Deutschland in großen Teilen mit Technologie, Bauten und Anlagen umsetzen, die im Inland hergestellt werden. Die Umsetzung erfordert Mehrinvestitionen, die (bei moderater Entwicklung der Weltmarkt-Energiepreise für fossile Energieträger) nicht vollständig durch die Einsparungen kompensiert werden. Aufgrund der Tatsache, dass der größte Teil der Investitionen im Inland produziert wird, sind die volkswirtschaftlichen Auswirkungen auf Wertschöpfung und Beschäftigung insgesamt positiv.

### Szenarien: verschiedene internationale politische Rahmenbedingungen

Die Analyse verschiedener Szenarien, in denen unterschiedliche internationale Geschwindigkeiten bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen angenommen wurden, zeigt im Kern folgende Ergebnisse:

Die stärksten positiven Auswirkungen ergeben sich, wenn der Klimaschutz in einem weltweit einheitlichen Vorgehen umgesetzt wird. Dann haben auch die „schwierigen“ energieintensiven Branchen ein Konkurrenzumfeld, das ein „Level Playing Field“ darstellt. Jedoch werden diese Branchen (insbesondere Metall, Glas, Keramik, manche Kunststoffe, Zement) dennoch mit Einbußen und Konkurrenz zu kämpfen haben, da die relative Verteuerung der Produkte dazu führt, dass Konkurrenz durch neue, weniger energieintensive Werkstoffe entsteht.

### Gewinnerbranchen

Die Gewinnerbranchen sind in jedem Falle diejenigen, die Effizienztechnologien anbieten (Maschinen-, Anlagenbau, Elektroindustrie), die Bauwirtschaft, manche Kunststoffe (z. B. Dämmstoffe), Anlagen der erneuerbaren Energien, innovative und vernetzte Prozesstechnologien sowie zahlreiche industrienah und andere Dienstleistungen. Teile des Handwerks können ebenfalls als Gewinner eingeordnet werden.

Die Automobilindustrie spielt eine Sonderrolle: Sie hat mit dem Antriebswechsel und der „Digitalisierung“ tiefgreifende Strukturveränderungen vor sich, die die gesamte Wertschöpfungskette betreffen. Die durch die Patente in wichtigen Feldern abgebildete Innovationskraft in Verbindung mit dem System aus großen finanzstarken Konzernen und mittelständischen, innovationsstarken und schnellen Zulieferern bildet jedoch eine gute Voraussetzung dafür, dass diese Transformation gelingen kann – wenn sie schnell und gründlich angegangen wird. Dann können nach einigen Jahren die traditionellen Vorteile in den internationalen Märkten greifen, und die Automobilindustrie kann insgesamt ihre starke Position an den internationalen Märkten verteidigen.

Auch wenn der Klimaschutz nicht in weltweit abgestimmtem Vorgehen erfolgt, sondern „nur“ in europäischer Abstimmung, und der Rest der Welt ein langsames Vorgehen wählt, sind die volkswirtschaftlichen Auswirkungen in Deutschland positiv – also die „Gewinner-Effekte“ übersteigen die Verlusteffekte. Allerdings bringt die fortschreitende Erderwärmung voraussichtlich signifikante Risiken, Schäden und Anpassungserfordernisse mit sich, die zu erheblichen Kosten führen, die in den Modellrechnungen nicht abgebildet sind.

Wenn Deutschland im Wesentlichen allein einen einigermaßen ambitionierten Klimaschutz betreibt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Technologien für eine vollständige Klimaneutralität rechtzeitig zur Marktreife entwickelt und nur inländisch umgesetzt werden – es werden dann ungefähr Ziele von 80 Prozent Reduktion bis 2050 gegenüber 1990 erreicht, evtl. etwas mehr. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen dieses Vorgehens sind dann immer noch leicht positiv – zumindest, wenn die Folgekosten des Klimawandels unberücksichtigt bleiben. Die positiven volkswirtschaftlichen Wirkungen kommen dann vor allem aus dem inländischen Klimaschutz. Hierbei wurde allerdings vorausgesetzt, dass die am stärksten

betroffenen Branchen im internationalen Wettbewerb bei der Transformation unterstützt werden. Alle „Gewinner-Branchen“ gewinnen auch Exportanteile; diese sind allerdings nur klein, da die Klimaschutztechnologien insgesamt nur einen kleinen Anteil an der Wertschöpfung der Industrie ausmachen.

### Fazit für bayerische Technologien

Die in Bayern besonders starken „Klima-Technologien“ – vor allem Klimaschutztechnologien im Energie- und Verkehrssystem, aber auch Anpassungstechnologien – sind in den Gewinnerbranchen, hier vor allem im Maschinen- und Anlagenbau, in der Elektroindustrie, der Produktion von speziellen Werkstoffen (Chemieindustrie, Keramik), industrienahen und anderen Dienstleistungen sowie im Fahrzeugbau samt Zulieferketten zu finden. Hierbei handelt es sich um die folgenden Technologiefelder:

#### Energienachfrage

Verkehrssystem	(Digitalisierte) Industrie	Private Haushalte und Dienstleistungssektor
Verkehrseffizienz / Platooning	Vernetzte Fabrikation	Energieeffiziente Haushaltsgeräte
Vernetzter Verkehr	3D-Druck	Energieeffiziente Gebäudetechnik
Elektrofahrzeuge	Supraleiter	Anpassungstechnologien Bau / Infrastruktur
Effizientere Verbrennungsmotoren	Stickoxidfilter	Intelligentes
Ladeinfrastruktur Fahrzeuge	CO <sub>2</sub> -Filter, -Abscheidung	
Urbane Logistik	Treibhausgas-Managementsysteme	
Elektrisches / hybrides Fliegen	Recycling	
	Nachhaltige Verpackungen	

#### Energieproduktion und Infrastruktur, synthetische Energieträger

Energieproduktion und Infrastruktur, synthetische Energieträger	Andere wichtige Sektoren und Technologiefelder
Organische Solarzellen, Perovskitzellen	Anpassungstechnologien Gesundheit
Solarthermie	Fleischalternativen
Intelligente Stromnetze	Präzisionslandwirtschaft
Wasserstoff-Herstellung	Anpassungstechnologien Landwirtschaft
Brennstoffzelle	
Synthetische Treibstoffe	

Diese Technologien sind wesentlich, sowohl für die Transformation zu einem klimaschonenden Wirtschaftssystem als auch für die Anpassung an den Klimawandel. Sie bedienen in praktisch allen Bereichen perspektivisch weltweite Märkte mit regionalen Ausprägungen.

- Die Technologien auf der Nachfrageseite (Bau, Gebäude, Industrie, Verkehr) werden an bereits vorhandenen Märkten eingesetzt – bei entsprechenden Rahmenbedingungen oder Nachfrage durch „early adopter“ kann hiermit also bereits heute erfolgreiche Geschäftstätigkeit stattfinden.
- Die Technologien im Stromsystem sind erforderlich, um das System innerhalb der nächsten wenigen Jahre

umzubauen, es effizient, leistungsfähig und robust zu machen, bei immer höheren Anteilen fluktuierender erneuerbarer Produktion.

- Die Technologien zur Wasserstoffherzeugung, zur Produktion synthetischer Energieträger sowie zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung befinden sich noch in früheren Entwicklungsstadien
- die entsprechenden Märkte werden sich im Laufe der nächsten beiden Jahrzehnte entwickeln. Dennoch zeigen die neuen Rahmen für z. B. Wasserstoffstrategien, dass die Politik solche längerfristig orientierten Teile der Systemtransformation auch zunehmend im Blick hat.

Abbildung 169

**Zusammenfassung zentraler Erkenntnisse****Erderwärmung**

Die Erde erwärmt sich immer schneller, Kipppunkte werden bald erreicht.  
Haupttreiber sind anthropogen verursachte Treibhausgase.

**Kosten**

Die Erwärmung bedingt signifikante klimatische Veränderungen.  
Die Folgen des Klimawandels gehen in vielen Lebens- und Arbeitsbereichen mit erheblichen Kosten einher und sind zunehmend auch für einzelne Individuen spürbar.

**Vulnerabilität**

Deutschland und Bayern sind besonders vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels.  
Die Vulnerabilität kann die Resilienz der deutschen Volkswirtschaft beeinträchtigen.

**Einsatz geeigneter Technologien**

Der Einsatz von geeigneten Technologien bietet die einzig realistische Möglichkeit, um die Treibhausgas-Emissionen im Zeitraum weniger Jahrzehnte auf Netto-Null zu reduzieren.  
Das betrifft vor allem Technologien auf der Nachfrageseite (Bau, Gebäude, Industrie, Verkehr), im Stromsystem sowie zur Wasserstofferzeugung, zur Produktion synthetischer Energieträger und zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung.

**Konkurrenzfähigkeit**

Deutschland und Bayern sind in den meisten erforderlichen Technologiefeldern relativ gut aufgestellt und weltweit konkurrenzfähig.  
Die Transformation lässt sich somit in großen Teilen mit Technologien, Bauten und Anlagen umsetzen, die in Deutschland und Bayern hergestellt werden (können).

**Volkswirtschaftliche Effekte**

Die volkswirtschaftlichen Effekte der Transformation sind für Deutschland positiv.  
Sie sind am positivsten, wenn der Klimaschutz in einem weltweit einheitlichen Vorgehen umgesetzt wird (zudem sind dann die Kosten des Klimawandels am geringsten).

**Gewinnerbranchen**

Die Gewinnerbranchen sind vor allem diejenigen, die Effizienztechnologien anbieten.  
Dazu gehören u. a. der Maschinen- und Anlagenbau, Elektroindustrie, die Bauwirtschaft sowie zahlreiche industriennahe und andere Dienstleistungen und Teile des Handwerks.

**Möglichkeiten Deutschlands und Bayerns**

Die Möglichkeiten Deutschlands und Bayerns, den Klimawandel durch alleinige Reduktion der eigenen Treibhausgas-Emissionen spürbar zu beeinflussen, sind gering.  
Sie können jedoch die Rolle eines Multiplikators einnehmen und zeigen, dass die Transformation technisch und gesellschaftlich möglich ist und wirtschaftlich erfolgreich gelingen kann.  
Dabei können sie für den Klimaschutz relevante Technologiefelder besetzen, die ihnen bei fortschreitendem Klimawandel neue Export- und Wachstumsmöglichkeiten eröffnen.



# Anhang

## Bedeutung der zehn Zukunftsfelder für Klimaschutz und -anpassung

### Kapitel in der Übersicht

Die zehn Zukunftsfelder	336
→ Zukunftsfeld IKT und Digitalisierung	338
→ Zukunftsfeld Neue Werkstoffe und Materialien	340
→ Zukunftsfeld Nanotechnologien	342
→ Zukunftsfeld Biotechnologien	344
→ Zukunftsfeld Intelligente Verkehrssysteme (IVS) und zukünftige Mobilität	346
→ Zukunftsfeld Energiesysteme und Energie(system)technologien	348
→ Zukunftsfeld Industrielle Produktionstechnologien	350
→ Zukunftsfeld Gesundheitswesen und Medizintechnologien	352
→ Zukunftsfeld Ernährung und Lebensmitteltechnologien	353
→ Zukunftsfeld Luft- und Raumfahrttechnologien	354
Technologiedefinitionen	355










## Die zehn Zukunftsfelder

### Für die Transformation relevant sind insbesondere die vier Zukunftsfelder IKT und Digitalisierung, Energiesysteme und -technologien, Industrielle Produktionstechnologien sowie Neue Werkstoffe und Materialien.

In der Leitstudie 2015 wurden zehn technologische Zukunftsfelder identifiziert, die die Wirtschaft und Forschungslandschaft Bayerns langfristig entscheidend prägen werden. Diese Zukunftsfelder waren immer wieder Gegenstand der Folgestudien des Zukunftsrats der Bayerischen Wirtschaft. Im Zusammenhang mit dem diesjährigen Schwerpunktthema werden die zehn technologischen Zukunftsfelder (bzw. bestimmte, in den Zukunftsfeldern verortete Technologien und Anwendungen) daraufhin überprüft, inwieweit sie zur Umsetzung von Klimaschutz und Klimaanpassung beitragen können. Die zehn Zukunftsfelder sind in Abbildung 170 dargestellt.<sup>319</sup>

Abbildung 170

#### Die zehn bayerischen Zukunftsfelder

	Neue Werkstoffe und Materialien		Luft- und Raumfahrttechnologien
	Gesundheitswesen und Medizintechnologien		Intelligente Verkehrssysteme (IVS) und zukünftige Mobilität
	Ernährung und Lebensmitteltechnologien		Biotechnologien
	Energiesysteme und Energie(-system-)technologien		Industrielle Produktionstechnologien
	Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und Digitalisierung		Nanotechnologien

Quelle: Eigene Darstellung Prognos, 2020

<sup>319</sup> Ein technologisches Zukunftsfeld erfüllt mindestens drei der folgenden vier Kriterien:

- Erhebliches weltweites Wachstumspotenzial
- Anknüpfen an vorhandene Kompetenzen (Forschung, Unternehmen)
- Großes Potenzial für mindestens eine der stärksten Branchen am Standort
- Beitrag zur Lösung zentraler Herausforderungen (z. B. demografischer Wandel, Klimawandel, zukunftsfähige Mobilität)

#### Abgrenzung und Vermischung der Zukunftsfelder

Seit der Leitstudie sind die Entwicklungen zwar weiter vorangeschritten, die Unterscheidung in die zehn technologischen Zukunftsfelder ist aber nach wie vor zweckmäßig. Sie bilden weiterhin die bedeutsamsten Technologien bzw. Anwendungen der Gegenwart und Zukunft ab und erlauben es, neue technologische Trends grundsätzlich aufzunehmen.<sup>320</sup> Gleichwohl stößt die Abgrenzung der einzelnen Zukunftsfelder aufgrund der wachsenden Bedeutung von Querschnittstechnologien (v.a. der Digitalisierung) zunehmend an ihre Grenzen. Die Zukunftsfelder vermischen, prägen und bedingen sich zunehmend wechselseitig, ohne dass es jedoch einer grundlegenden Neudefinition bedarf. Das Dilemma der trennscharfen Abgrenzung bei gleichzeitigen Überschneidungen und Wechselwirkungen zwischen Technologiefeldern würde sich vermutlich auch bei anderen Kategorisierungssystemen ergeben. Infolge der Abgrenzungsproblematik und Vermischung ist auch eine Zuordnung der einzelnen Klima-Technologien zu den zehn Zukunftsfeldern oftmals nicht trennscharf möglich.

#### Aufbereitung des Klimabeitrags der Zukunftsfelder

Da die einzelnen Zukunftsfelder eine Vielzahl von Technologien, Ausprägungen und möglichen Anwendungen umfassen, werden diese vor allem qualitativ auf ihren Beitrag zur Emissionseinsparung und zur Klimaanpassung untersucht sowie notwendige Bedingungen dafür herausgearbeitet. Auf mögliche gegenläufige Entwicklungen innerhalb der einzelnen Zukunftsfelder wird ebenfalls hingewiesen. Auf diese Weise wird für jedes Zukunftsfeld ein „Klima-Factsheet“ entwickelt, das mit Bezug auf Klimaschutz und -anpassung die folgenden Aspekte stichpunktartig zusammenfasst:

- Wichtige Technologien bzw. Anwendungen aus dem Bereich Klimaschutz und -anpassung im Zukunftsfeld
- Klima-Wirkung (im Sinne von Wirkungsketten) der wichtigen Klima-Technologien bzw. -Anwendungen im Zukunftsfeld
- Zentrale Rahmenbedingungen wichtiger Klima-Technologien bzw. -Anwendungen im Zukunftsfeld
- Entwicklungsbedarf bei wichtigen Klima-Technologien bzw. -Anwendungen im Zukunftsfeld

<sup>320</sup> Die Relevanz der zehn Zukunftsfelder zeigt sich nicht zuletzt auch in den diversen Berührungspunkten zwischen den Zukunftsfeldern und den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen (Teil II Kasten 11) sowie den Missionen der Bundesregierung und der EU. Die Missionen zielen darauf ab, (globale) Herausforderungen in konkrete, messbare und erreichbare Ziele zu transferieren.



## Klima-Factsheet IKT und Digitalisierung

### Technologien und Anwendungen

- Vernetzte Systeme (Smart Home, Smart City, Smart Factory, etc.) die mit bedarfsorientierter Bereitstellung effizientere Energieverbräuche realisieren.
- Autonome Verkehr und autonome Logistik, die mit vorausschauendem Fahren Emissionen reduzieren.
- Effizientere Elektronik senkt den Verbrauch, sofern sie ineffiziente Technologien ersetzt und keinen überproportionalen Mehrverbrauch erzeugt.
- Die Technologie der IT-Infrastruktur verbraucht viel Energie, unterliegt aber wachsenden Anforderungen an Energieeffizienz, vor allem aus Kostengründen, um z. B. den Kühlaufwand von Rechenzentren und Serverfarmen beherrschbar zu halten, und Nachhaltigkeitskriterien aufgrund von Selbstverpflichtungen der Unternehmen oder öffentlichem Druck. Diese führen z. B. zunehmend dazu, dass zum Betrieb regenerativ erzeugter Strom eingesetzt oder kontrahiert wird, sowohl national als auch international.
- Die der „Hardware“ zugrunde liegende Technologie entwickelt sich u. a. aufgrund von Entwicklungen sowohl auf der Werkstoff- als auch auf der Betriebsseite in Richtung Effizienzsteigerung weiter. Nach wie vor scheint das „Moore'sche Gesetz“ für die Entwicklung der Leistungsfähigkeit der Hardware zu greifen. Dies ist bislang mit einem technologischen Fortschritt der Erhöhung der Speicherdichte oder der raumzeitlichen Dichte von Rechenoperationen auf dem zugrunde liegenden materiellen Substrat verknüpft. Künftige Materialien, die eine weitere Erhöhung der Packungsdichte bei gleichzeitiger Verkleinerung erlauben, befinden sich in Labor- und Kleinserienstadien.
- Bei Kleingeräten der Consumer Electronics (Laptops, Mobiltelefone, Tabletcomputer, IoT-Devices etc.) stellt die Energiedichte der Energiequellen bzw. Energiespeicher (und der Kühlbedarf) einen begrenzenden Faktor dar, der zu einem „technologischen Effizienz-Wettrüsten“ zwischen Effizienz der „produktiven“ IT-Seite und der Energiedichte und Leistungsfähigkeit der genutzten Energiequellen bzw. -speicher führt.

### Wirkung (siehe auch Kasten 32)

- Reduzierter Energieverbrauch bedeutet geringere Emissionen bzw. effizientere Nutzung der begrenzt verfügbaren erneuerbaren Energiequellen.
- Zunehmende Vernetzung und Cloud-Anwendungen führen dazu, dass die Daten international fließen und die Datennutzung somit einen Rucksack an nationalen und internationalen Energieverbräuchen und Emissionen erhält. Die nationale Seite ist gut quantifizierbar, die internationalen Vorketten enthalten wie bei allen Produkten große Unsicherheiten.
- Neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle können die Anzahl der genutzten Geräte bzw. Objekte (z. B. Pkw) senken bzw. die Nutzungseffizienz und Flexibilität steigern.
- Völlig neue „virtuelle“ Anwendungen können „Realwelt“-Dienstleistungen überflüssig machen – z. B. könnte nach der Videokonferenz die „Holo-Konferenz“ nochmals zu weniger Reiseaufwand führen (siehe Kasten 32 sowie Seite 141 und 142).

### Rahmenbedingungen

- Insbesondere beim autonomen Fahren, aber auch beim Internet of things (IoT) sowie bei sonstigen in Echtzeit vernetzt betriebenen Anwendungen müssen gesetzliche Rahmenbedingungen geschaffen werden.
- Schlecht gesicherte Geräte in vernetzten Systemen bilden dabei vermehrt Risiken im Bereich der IT-Sicherheit.

### Entwicklungsbedarf

- Effizienzsteigerungen sind ein durchgehend ablaufender Optimierungsprozess.
- Bei den vernetzten Systemen steht momentan die breite Umsetzung an.
- Beim autonomen und vernetzten Fahren laufen Pilotprojekte, aber die breite Einführung hängt von den gesetzlichen Rahmenbedingungen ab.



## Klima-Factsheet Neue Werkstoffe und Materialien

### Vorbemerkungen

Das Feld „Werkstoffe und Materialien“ ist sehr breit gefächert, hat Überschneidungen und enge Wechselwirkungen mit Biotechnologie, Nanotechnologie, Digitalisierung und bietet Lösungen und Beiträge z. B. in den Kategorien Batteriematerialien, alternative Materialien für erneuerbare Energien (insbesondere PV), Emissionsreduktionen durch Abscheidematerialien (Katalysatoren, Filter, CCS), nachhaltige Verpackungen, verbesserte Materialeigenschaften (Hochtemperatur-Supraleiter, bessere Dämmstoffe, Additive in Zement, Beschichtungen für physikalische Eigenschaften wie Reibungsarmut, Hydrophobie etc.).

### Technologien und Anwendungen

- Materialien zur Erhöhung von Energieeffizienz und Wirkungsgraden bei Prozessen (z. B. Reibungsarmut, Hochtemperatur-Supraleitung, aber auch Verbundmaterialien für Leichtbau wie z. B. im Flugzeugbau, Miniaturisierung).
- Materialien für verbesserte vorhandene und neue Arten der Nutzung erneuerbarer Technologien (z. B. OLED, recyclingfähige Katalysatormaterialien für Brennstoffzellen, Katalysatormaterialien für die Direktproduktion von Wasserstoff).
- Materialien, mit deren Hilfe effizientere und ressourcenschonendere Produkte (und deren Produktionsprozesse) designt und erzeugt werden können, wie z. B. 3D-Druckmaterialien, vollständig abbaubare oder recyclingfähige Funktionskunststoffe.
- IR-Laser, spintronische Materialien für die nächste Skalenerweiterung bei IT-Speichern, Stahlalternativen, Betonalternativen bzw. Zusatzstoffe für Kompositmaterialien, die den Einsatz energieintensiver Grundstoffe reduzieren etc.

### Wirkung

- Wirkungen auf Emissionen im Einsatz sind z. T. direkt positiv, z. T. erfolgen sie indirekt über die benötigten Ressourcen und Rohstoffe in der Produktionskette.
- Bei der Produktion besteht z. T. noch Entwicklungsbedarf (z. B. Carbonfaserwerkstoffe oder spezialkeramische Werkstoffe sind energieintensiv in der Produktion, jedoch nicht energieintensiver als Stahl).
- Bei neuen „Plastik-Werkstoffen“ und (biogenen) Plastik-Ersatzstoffen bestehen über die gesamte Kette Einsparungsoptionen, da ggf. stofflich genutzter fossiler Kohlenstoff mehrfach eingesetzt wird und nicht durch Verbrennung als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre gelangt.
- Hohe Emissionsreduktion sowie Entlastung weiterer Ressourcen (Flächen, mineralische und biologische Ressourcen) werden z. B. Katalysatormaterialien für die Direktproduktion von Wasserstoff zugeschrieben.
- Weitere positive Auswirkungen: Einsparung sonstiger mineralischer und metallischer Ressourcen, z. B. Kobalt, Actiniden, Lanthaniden bei elektromagnetischen Anwendungen, Platin und Palladium bei Elektrolyseuren und Brennstoffzellen.
- Potenzielle negative Auswirkungen: Flächenbedarf und Ressourcenkonkurrenz bei biogenen Grundstoffen, ggf. problematische Abbaumethoden bei neuen Grundstoffen (Lithium, aber auch Silizium) – diese Probleme sind von vornherein mitzudenken und können gelöst werden. Sie sind keine physikalischen Eigenschaften der in Frage stehenden Werkstoffe oder Produkte.
- Vor allem bei nanotechnologisch basierten Werkstoffen treten häufig Akzeptanzfragen auf, die auf möglichen zu lösenden Gesundheits- und Sicherheitsproblemen beruhen. Hier empfiehlt es sich, dass bei der Entwicklung parallele Assessments durchgeführt werden und für die entsprechenden Fragen möglichst integrierte Lösungen gefunden werden.

### Rahmenbedingungen

- Benötigt wird insgesamt ein förderliches Umfeld für den Einsatz von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz mit z. B. konsequenten Kosteninstrumenten; positives Umfeld für Innovation, Raum für Experimente.
- Grundsätzliche „Probleme“: Investitionszyklen bei vorhandenen Technologien können die Einführung neuer und ressourceneffizienterer Technologien verzögern (z. B. Ersatz von halbleiterbasierter durch organische PV); Lernkurven müssen durchlaufen und bezahlt werden.

### Entwicklungsbedarf

Bei Werkstoffen und Werkstoffentwicklungen kommen je nach Produkt und Anwendung praktisch alle Technologiereifegrade vor: Nach jahrzehntelangen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind z. B. Hochtemperatur-Supraleiter oder beleuchtungsstärkenabhängige Fensterbeschichtungen nah an der Marktreife. Spintronische Materialien und spezifische 3D-Druck-Grundstoffe sind noch in Laborentwicklung oder Kleinserien. Stahl- und Zementersatzstoffe haben eine hohe Breite an Technologiereifegraden. Batteriematerialien entwickeln sich mit den Lernkurven der gesamten Batterieentwicklungen derzeit eher stetig und an vielen Stellschrauben weiter.



## Klima-Factsheet Nanotechnologie

### Vorbemerkungen

Das Technologiefeld ist eng mit dem Feld Materialien und neue Werkstoffe sowie z. T. mit dem Feld Biotechnologien verknüpft. Der Bezug zu Energie- und Klimaschutzfragen ist eher indirekt und dabei breit als Querschnittstechnologie, die sich durch viele Anwendungsfelder zieht.

Die Herstellung von Nanomaterialien erfordert skalierbare Herstellungsverfahren, welche heute z. T. noch nicht verfügbar sind. Hier gibt es enge Wechselwirkungen mit den industriellen Produktionstechnologien.

Auch mit der Bio- und Medizintechnologie gibt es Überschneidungen und kombinierte Anwendungsfelder.

### Technologien und Anwendungen

- Nanotechnologische bzw. mit nanotechnologischen Verfahren produzierte Materialien können zur Einsparung von Endenergie sowohl bei der Herstellung als auch bei der Nutzung von Produkten beitragen.
- Nanomaterialien spielen eine große Rolle bei miniaturisierten Komponenten für die Sensorik als wichtige Hardware-Komponenten bei Digitalisierung und Automatisierung.
- Hierzu gehören z. B. hochleistungsfähige Dämmstoffe auf der Basis von Nanoschäumen oder nanoskaligen Aerogelen oder Batteriezellbauweisen mit Nanoschäumen und extrem großen inneren Reaktionsflächen.
- Materialien auf Basis von z. B. Carbon-Nanoröhren werden große Potenziale bei der Konstruktion von Verbundwerkstoffen zugeschrieben, die teilweise Stahl in Bauteilen (z. B. bei Fahrzeugen und Flugzeugen) ersetzen können.
- Auch an neuen nanotechnologisch-basierten Werkstoffen für (energieeffiziente) Displays und haptische Interaktionsflächen zur Mensch-Maschine-Kommunikation wird geforscht.
- Die zunehmende Miniaturisierung (oder Nanoisierung) von Bauteilen spielt bei Fragen des Energiesystems und des Klimaschutzes außer beim Energieverbrauch von IKT-Technologien eine untergeordnete Rolle – die Hauptanwendungszwecke von Energie betreffen mit Raumwärme, Prozesswärme, Transport eher „makroskopische“ Anwendungen, die nicht oder nur wenig verkleinerbar sind. Ausnahmen bilden hier Virtualisierungen von Dienstleistungen, die dem IT- bzw. Digitalisierungsbereich zugeordnet werden.
- Nanotechnologische Ansätze werden auch bei der Verbesserung der Bioverfügbarkeit von neuartigen pharmazeutischen Wirkstoffen verfolgt.

### Wirkung

- Wirkungen auf Emissionsreduktion im Einsatz sind z. T. direkt positiv, z. T. erfolgen sie indirekt über die benötigten Ressourcen und Rohstoffe in der Produktionskette.
- Bei der Produktion besteht z. T. noch Entwicklungsbedarf (z. B. Carbonfaserwerkstoffe oder spezialkeramische Werkstoffe sind energieintensiv in der Produktion, jedoch nicht energieintensiver als Stahl).
- Bei neuen „Plastik-Werkstoffen“ und (biogenen) Plastik-Ersatzstoffen bestehen über die gesamte Kette Einsparungsoptionen, da ggf. stofflich genutzter fossiler Kohlenstoff mehrfach eingesetzt wird und nicht über Verbrennung in die Atmosphäre gelangt.
- Analog der Anwendungen im Werkstofffeld sind die Wirkungen in Bezug auf Energie- und Emissionsreduktion insgesamt eher positiv zu bewerten – nanotechnologische Werkstoffe helfen beim Einsparen von Energie bei verschiedenen Anwendungszwecken und Umwandlungsprozessen.
- Im Allgemeinen sind die Grundstoffe unkritisch, Anteile an Edelmetallen, „Gewürzmetallen“<sup>321</sup> etc. eher gering und werden mit zunehmender Miniaturisierung weiter reduziert. Die Produktionsmethoden benötigen hohe Präzision, haben aber einen eher geringen spezifischen Energieverbrauch.
- Einige Anwendungen wirken eher mittelbar auf weitere Ressourcen, z. B. Katalysatoren für die Reinigung oder spezifisch nanotechnologisch „verpackte“ Enzyme für das Recycling von Kunststoffen oder Verbundwerkstoffen.

### Rahmenbedingungen

- Die zur Entwicklung benötigten Rahmenbedingungen sind in weiten Teilen analog zum Feld „Materialien und Werkstoffe“ – förderliche Innovationslandschaft, Innovationsdruck in allen Bereichen der Energieeffizienz, Platz für Experimente, Überwindung des „valley of death“.
- Besonders wichtig sind integrierte Assessments von Gesundheits- oder Sicherheitsauswirkungen, um Akzeptanzproblemen konstruktiv zu begegnen.
- Entsprechende Rahmenbedingungen für Entwicklung und Anwender könnten späteren Anwendungsrisiken vorbeugen und ein „Level Playing Field“ schaffen.
- Nanotechnologische Werkstoffe und Prozesse erfahren gelegentlich höhere öffentliche Aufmerksamkeit und in Folge Akzeptanzprobleme.

### Entwicklungsbedarf

Die Technologiereifegrade sind je nach Material und Anwendungszweck breit gefächert. Einige Anwendungen existieren bereits (z. B. schmutzabweisende „Lotus-Beschichtungen“ zur Reduzierung von Reinigungsaufwand), andere stehen nach Aussage der entsprechenden Entwickler kurz vor der Marktreife (wie verschiedene Nanoschaummaterialien zur Wärmedämmung oder Stromspeicherung). Zahlreiche Felder sind im Laborstadium, Energieeffizienzoptionen fallen dabei gelegentlich als „Nebeneffekt“ ab. Zur Vermeidung von Akzeptanzproblemen sollte die Klärung von Gesundheits- und Sicherheitsrisiken integral mit der Entwicklung erfolgen und ebenso Möglichkeiten des Recyclings und der Wiederverwertung umfassen.

<sup>321</sup> Als „Gewürzmetalle“ werden verschiedene seltene Metalle bezeichnet, die für die Herstellung bestimmter Produkte in nur sehr geringen Mengen benötigt werden.



## Klima-Factsheet Biotechnologien

### Vorbemerkungen

Wie Werkstoff- und Nanotechnologien sind auch Biotechnologien ein Grundlagenfeld, das Lösungen und Veränderungsmöglichkeiten in zahlreichen Klimaschutz- und -anpassungsrelevanten Anwendungen bereitstellt. Daher kann die Nennung relevanter Technologien und Anwendungen nicht abschließend erfolgen.

### Technologien und Anwendungen

- Pflanzenkohle bzw. Biokohle, auf Basis pflanzlicher Rest- und Abfallstoffe oder -produkte hergestellte Kohle, kann als Katalysator für die Kohlenstoffaufnahmekapazität von Böden wirken.
- Pflanzliche Ersatzstoffe für Fleischkonsum (sowohl Ersatzprodukte als auch „Laborfleisch“).
- Entwicklung und Produktion von methanreduzierenden Futterzusätzen für Wiederkäuer („Methanpille“).
- Biotechnologische Produktion von synthetischen Brenn- und Treibstoffen aus z. B. niederwertigen Zellulosegrundstoffen.
- Biotechnologische Direktproduktion von Wasserstoff (z. B. Algen).
- Biotechnologische Produktion von (Alternativen zu derzeit genutzten, auf fossilen Ausgangsmaterialien beruhenden) Grund- und Zwischenprodukten in der Chemie.
- Biotechnologische Alternativen zu konventionellen chemischen oder metallurgischen Produktionsprozessen.

### Wirkung

- Biogene Energieträger wirken direkt senkend auf die Emissionen, Pflanzenkohle, in Verbindung mit Bodenverbesserungen, hat vermutlich sogar einen multiplizierten Bindungseffekt (CO<sub>2</sub>-Senke). Pflanzenkohle, die gespeichert wird, wirkt ebenfalls als Senke.
- Biologische Direktproduktion von Wasserstoff kann tiefgreifende Auswirkungen auf die Organisation des Energiesystems haben. Falls sie auf mariner Basis durchgeführt wird, kann sie erheblich zur Entlastung von Flächen an Land beitragen.
- Methanreduzierende Futterzusätze adressieren direkt das Problem der Methan-Emissionen, vor allem durch die Rinderhaltung.
- Von pflanzlich basierten Fleischersatzprodukten wird zumindest eine geringere Treibhausgas-Wirkung als von Fleischprodukten erwartet, da keine Methan-Emissionen anfallen und der Energieeinsatz bei den Konzentrationsprozessen der pflanzlichen Ausgangsstoffe im Allgemeinen geringer ist als in der Tierhaltung. Allerdings entstehen durch Anbau, Transport und Verarbeitung von Fleischersatzprodukten (z. B. Soja, Weizen) ebenfalls Treibhausgase.
- „Laborfleisch“ hat ebenfalls den Vorteil der vermiedenen Methan-Emissionen, die direkte energetische Kette bei der „Fütterung“ des Prozesses ist bislang noch nicht abschließend geklärt.
- Biotechnologische Produktionsverfahren können den Prozesswärmebedarf reduzieren.

### Rahmenbedingungen

- Grundsätzlich sind die Flächen für die nachhaltige Produktion von nutzbaren biologischen Systemen (Nutzpflanzen für Nahrung, stoffliche Nutzung, Energie) begrenzt. Flächenkonkurrenzen treten praktisch notwendigerweise auf, die Ressourcen z. B. von nachhaltig nutzbaren Energie-Biomassen sind weltweit und insbesondere in Industrieländern begrenzt. Wenn bspw. mehr biogene Grundstoffe für die Chemieproduktion bereitgestellt werden sollen, reduziert das die Verfügbarkeit von energetisch nutzbaren Biomassen.
- Die zur Entwicklung benötigten Rahmenbedingungen sind in weiten Teilen analog zum Feld „Materialien und Werkstoffe“ sowie „Nanotechnologien“ – förderliche Innovationslandschaft, Innovationsdruck in allen Bereichen der Energieeffizienz, Platz für Experimente, Überwindung des „valley of death“.
- Akzeptanzprobleme können in Deutschland erfahrungsgemäß insbesondere bei der Anwendung gentechnisch veränderter Organismen auftreten.
- Entsprechende Rahmenbedingungen für Entwicklung und Anwender könnten späteren Anwendungsrisiken vorbeugen und ein „Level Playing Field“ schaffen.

### Entwicklungsbedarf

- Die meisten genannten Anwendungen und Technologien, wie z. B. die Produktion von Pflanzenkohle, synthetischer Brenn- und Treibstoffe sind im Pilot- und Demonstrationsstadium.
- Einige auf unterschiedliche Weise produzierte Fleischersatzprodukte befinden sich in der Markteinführung.
- Die eher strikt biotechnologischen Anwendungen wie Direktproduktion von Wasserstoff sowie Alternativen zu konventionellen Prozessen der chemischen Industrie befinden sich noch im Laborstadium.



## Klima-Factsheet IVS und zukünftige Mobilität

### Vorbemerkungen

Der „Verkehrssektor“ ist eine der wesentlichen Infrastrukturen und Aktivitäten, die in direkter Wechselwirkung mit globalisierter Wirtschaft und Wohlstandswachstum stehen. Einerseits ermöglichen Verkehrstechnologien globalen und regionalen Transport von Gütern und die zunehmende Mobilität von Menschen, andererseits führt zunehmender Wohlstand zu wachsenden Reisebedürfnissen und der Möglichkeit, diese zu befriedigen, sowie zu steigender Güternachfrage. Darüber hinaus ermöglichen es immer leistungsfähigere Verkehrsmittel, zunehmend größere Strecken bei gleichbleibendem Zeitbudget zurückzulegen. Aufgrund des derzeit weitaus überwiegenden Betriebs der Fahrzeuge mit fossilen Kraftstoffen trägt der Verkehrssektor sowohl national als auch global einen erheblichen Anteil zu den Treibhausgas-Emissionen, insbesondere CO<sub>2</sub>, bei.

Technische Entwicklungen, die diese Emissionen verringern und die Substitution fossiler Antriebsenergien ermöglichen, spielen daher eine Schlüsselrolle beim Umbau des Energie- und Verkehrssystems hin zu klimafreundlicher und nachhaltiger Ausgestaltung. „Intelligente Verkehrssysteme“ haben vor allem die Aufgabe, den Verkehr zeit- und ressourceneffizient zu machen. Sie sind daher für den Klimaschutz zentral.

### Technologien und Anwendungen

- Organisationstechnologien wie autonomes Fahren, Pooling, Carsharing.
- Elektrifizierung des Verkehrs: Elektrofahrzeuge, Batterietechnik, Oberleitungs-Hybrid-Lkw, Brennstoffzellenfahrzeuge.
- Geschäftsmodelle zur Organisation effizienter Mobilität (bessere Vernetzung der Verkehrsmoden, Differenzierung der genutzten Fahrzeuge nach Fahrprofilen).
- Geschäftsmodelle zur Sicherung des Zugriffs der Hersteller auf die verbauten Rohstoffe („nutzen statt besitzen“).

### Wirkung

- Reduktion direkter Emissionen durch Elektrifizierung (und ggf. Einführung wasserstoffbasierter Antriebe).
- Verbrauchsreduktion durch automatisiert vorausschauendes Fahren.
- Vergleichmäßigung des Verkehrsflusses und Windschattenoptimierung.
- Sinkende Produktionsemissionen durch weniger benötigte und ggf. leichtere Fahrzeuge.
- Auswirkungen des autonomen Fahrens auf Fahrleistungen (und daraus folgend Energieverbrauch und Emissionen) sind bislang unklar.

### Rahmenbedingungen

Für den Umbau des Verkehrssystems und die Einführung intelligenter Verkehrssysteme müssen verschiedene Rahmenbedingungen zusammenspielen:

- Beschleunigung der Lernkurve und Einführung der Elektromobilität.
- Sicherstellung des Vorranges der Sicherheit bei der Entwicklung des autonomen Fahrens.
- Paralleler Aufwuchs von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur.
- Aufbau von Oberleitungs-Infrastruktur für schweren Güterverkehr.
- Bereitstellung einer leistungsfähigen und sicheren IT-Kommunikationsinfrastruktur.
- Zusammenwachsen von IT und Automotive (Fahrzeuge sowie Infrastruktur).
- Ggf. unterstützende Instrumente für die Einführung von alternativen Antrieben.
- Integration der neuen Infrastrukturanforderungen sowie Gestaltungsfragen in Raum- und Stadtplanung etc.

### Entwicklungsbedarf

- Teile der Technologie(n) befinden sich am Anfang der Markteinführung (E-Mobilität, Mobilitätsorganisation).
- Weiterentwicklungen sind in allen Bereichen des Zukunftsfelds im Gange (z. B. Batterietechnologie, Fahrzeugtechnologie, Infrastruktur, neue Geschäftsmodelle).
- Teilweise werden starke Strukturveränderungen erwartet (IT-Dominanz statt Fahrzeugdominanz in Mobilität und Transport), Veränderungen von Besitz- und Nutzungsverhältnissen bei neuen Organisationsformen, vor allem des motorisierten individuellen Personenverkehrs.
- In Deutschland und Bayern treten aufgrund des starken Gewichts der Fahrzeugindustrie zahlreiche industriepolitische Fragen auf, zu denen Positionierungen erfolgen müssen (z. B. durch die Veränderung der Wertschöpfungsstruktur bei Elektromobilität, aber auch Plattformfragen bei dem zunehmenden IT-Anteil im Verkehrssystem).



## Klima-Factsheet Energiesysteme und Energie(system)technologien

### Vorbemerkungen

Das Energiesystem – als Kombination von Nachfragesektoren, Energieumwandlung und Versorgung – ist dasjenige System, das die größte Transformation zu bewältigen hat, denn dort werden, historisch entwickelt, technologiebedingt die größten Mengen an fossilen Brennstoffen verbrannt und entsprechende Treibhausgas-Emissionen (vor allem CO<sub>2</sub> und Methan) erzeugt. Das Zukunftsfeld „Energiesysteme und Energie(system)technologien“ ist daher naturgemäß sehr breit definiert. Besondere Schwerpunkte liegen hier im Kontext der „Bayerischen Zukunftstechnologien“ auf Technologien, die mit der Organisation, Steuerung, Flexibilisierung und dem Ausgleich von Nachfrage, Angebot und Infrastruktur im regionalen und überregionalen Kontext befasst sind (z. B. Quartiere, aber auch Speicher und z. B. Wasserstoffproduktion im netzdienlichen Betrieb). Diese Technologien haben jeweils einen wachsenden IT-Anteil und große Überschneidungen mit dem Zukunftsfeld „Digitalisierung“. Insgesamt weist das Zukunftsfeld „Energiesysteme und Energie(system)technologien“ eine starke Vernetzung mit den Zukunftsfeldern „Neue Werkstoffe und Materialien“ und „Nanotechnologien“ auf.

### Technologien und Anwendungen

- Basistechnologien: erneuerbare Energien, Batterietechnik, effiziente Wärmebereitstellung, Technologien für die Bereitstellung effizienter netzförmiger Infrastruktur (z. B. supraleitende Materialien für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung-Netze, aber auch Hochleistungs-Motoren in der Industrie, hochisolierende Materialien für Fernwärmenetze etc.)
- Emissionskompensation (Pflanzkohle, CCS).
- Wasserstoffelektrolyse, Brennstoffzelle, Produktionstechnologien synthetischer Brenn- und Treibstoffe (PtX) mit Überschneidungen zu Industrietechnologien.
- Effizienztechnologien (Energie- und Rohstoffeffizienz) mit Überschneidung mit Industrietechnologien und Werkstoffen.
- Energiesystemtechnologien: Infrastrukturen und unterstützende Technologien für den Betrieb des neuen „witterungsbasierten“ Energiesystems.
- Software- sowie Geschäftsmodell-Lösungen zur Erschließung von Flexibilitätspotenzialen und Systembetrieb in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung.
- Technologien und Organisationsformen für Sicherheit und Datenschutz bei der zentralen und dezentralen IT-Anwendung zur Systemsteuerung.

### Wirkung

- Praktisch alle Energiesystemtechnologieentwicklungen werden derzeit durchgeführt, um das Energiesystem emissionsärmer zu machen, bei gleichzeitiger Wahrung der Versorgungssicherheit.
- Gegenläufige Effekte könnten lediglich entstehen, wenn sehr schnell große energieintensive Batterieanlagen aufgebaut würden, während noch ein signifikanter Anteil Kohlestrom im Mix ist (dies könnte vermieden werden, wenn spezifisch für einen solchen Zweck erneuerbare Energien zugebaut werden).

### Rahmenbedingungen

- Planungs- und Investitionssicherheit werden insbesondere für große und langfristige Infrastrukturinvestitionen benötigt; daher sollten hier verlässliche Rahmenbedingungen und Planungsgrundlagen (z. B. für Netzinfrastruktur, Windkraftanlagen onshore etc.) geschaffen werden.
- Platz für Experimente für Geschäftsmodelle sowie Systemorganisationsmodelle wird benötigt.
- Marktbedingungen, die der Bereitstellung von Flexibilität (sowohl für Strom- als auch für Wärmenachfrage) einen systemdienlichen Wert zuweisen.
- Akzeptanzfragen, insbesondere für Netzausbau, Windenergie, CCS, sind wesentlich und müssen angegangen werden, sowohl mit aufwendigen Bürgerkommunikationsprozessen und Informations- und Bildungsmaßnahmen als auch mit klaren Rahmenbedingungen für Planungs- und Genehmigungsprozesse.

### Entwicklungsbedarf

Die Technologien sind im Grundsatz bekannt, allerdings befinden sich die verschiedenen Anwendungen in unterschiedlichen Technologiereifegraden:

- Bei Technologien für PtX, CCS und CCU sind noch Lernkurven und Skaleneffekte zu erwarten, wenn auch in unterschiedlichem Maße, bei CCS und CCU betrifft dies lediglich die Abscheidetechnologien.
- Elektrische Netz-, Regel- und Steuerungstechnologien sowie Geschäftsmodelle befinden sich in unterschiedlichen Phasen der Markteinführung und benötigen eher gesicherte Rahmenbedingungen.
- Grundsätzlich wird erwartet, dass mit der zunehmenden Umsetzung der „Energiewende“ weitere und z. T. beschleunigte Technologieentwicklungen erfolgen, z. B. bei Elektrolyseuren und Brennstoffzellen, spezifischen Energiespeichermöglichkeiten, Next Generation Photovoltaics, Direktproduktion von Wasserstoff, CCS, CCU.





## Klima-Factsheet Industrielle Produktionstechnologien

### Vorbemerkungen

Industrielle Produktionstechnologien haben naturgemäß zahlreiche Überschneidungen mit „Energie- und Klimaanpassungstechnologien“: Einerseits werden letztlich alle für Klimaschutz und auch Klimaanpassung eingesetzten Technologien mit industriellen Produktionsprozessen hergestellt, andererseits bieten neu und weiterentwickelte industrielle Produktionstechnologien zahlreiche Möglichkeiten, Produkte zunehmend energie- und ressourceneffizienter als mit älteren oder konventionelleren Technologien herzustellen. Das Zukunftsfeld ist so breit, wie Industriebranchen und industrielle Produktion divers sind, daher können hier nur sehr grundsätzliche Kategorien unvollständig gestreift werden. Hier sind die Stärke des möglichen Beitrags zum Klimaschutz und zur Ressourceneffizienz sowie ggf. das „disruptive Potenzial“ wichtige Kriterien. Gerade im Kontext der Energiewandlung und -speicherung (z. B. Batterieherstellung, Rohstoffaufbereitung) muss die Entwicklung der entsprechenden Produktionstechnologien Lösungsbeiträge bieten. Hier spielen sich derzeit sehr dynamische Entwicklungen ab.

### Technologien und Anwendungen

- Effizientere Herstellung diverser Produkte, vernetzte Produktionsanlagen und Neuorganisation von industriellen Zusammenhängen unter dem Stichwort „Industrie 4.0“ bzw. etwas breiter unter „Wirtschaft 4.0“.
- Ressourceneffiziente(re) Produktion durch Kreislaufführung von Materialien (z. B. Einsatz von Schrott bei der Stahlproduktion) als Teil der Kreislaufwirtschaft.
- Spezifische Produktionstechnologien: Direktreduktion bei Stahl, emissionsärmere Zementproduktion, Wasserstoff in der Grundstoffchemie.
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei großen Produktionsanlagen (sowohl aus der Verbrennung fossiler oder biogener Rohstoffe als auch bei Prozessemissionen) und -Nutzung – Aufbereitung von sequestriertem Kohlenstoff zur Nutzung als Grundstoff in der Chemieindustrie oder zur Weiterverarbeitung als Brenn- oder Treibstoff.
- Direct Air Capture von CO<sub>2</sub> zur Produktion von klimaneutralen synthetischen Brenn- und Treibstoffen mithilfe erneuerbarer Energien.

### Wirkung

- Technologien, die auf Energieeffizienz und Dekarbonisierung (wie z. B. Direktreduktion bei der Stahlproduktion) abzielen, wirken emissionsenkend.
- Zahlreiche Technologien und Organisationsformen wie „Wirtschaft 4.0“, die zur ökonomischen Effektivierung der Prozesse beitragen, z. B. durch weniger Ausschuss, Lagerung und Transporte, steigern gleichzeitig die Ressourcen- und Energieeffizienz.
- Bei PtX-Technologien sowie CCU ist es für eine positive Klimawirkung notwendig, dass langfristig die genutzten Kohlenstoffmengen aus biogenen Quellen oder aus der Luft stammen. CCU aus abgeschiedenen fossilen Kohlenstoffmengen (wie z. B. aus der Stahl- und Zementproduktion) kann nur übergangsweise genutzt werden).

### Rahmenbedingungen

- Notwendig sind insbesondere ökonomische Rahmenbedingungen, die Energieeffizienz und emissionsreduzierende Technologien attraktiv machen. Insbesondere in den energieintensiven Branchen ist dies erforderlich.
- Allerdings sind für diejenigen Branchen und Unternehmen, die mit relativ homogenen Produkten im internationalen Wettbewerb stehen, auch die Bedingungen der internationalen Konkurrenz wichtig. Hier ist anzustreben, dass z. B. wirksame Emissionshandelssysteme auf globaler Ebene entwickelt werden oder entsprechende Anforderungen an Importe analoger Produkte gestellt werden. Das Problem beim Export ist allerdings nur durch bi- oder multinationale Vereinbarungen zu lösen. Je günstiger die Effizienz- und Alternativtechnologien werden, umso einfacher sind sie auch international umzusetzen und können langfristig zu Wettbewerbsvorteilen oder neuen Exportoptionen führen.

### Entwicklungsbedarf

- Zahlreiche „Effizienztechnologien“ (effiziente Motoren, Pumpen, Druckluft, Abwärmenutzung, Wärmepumpen, MSR-Technologien etc.) sind am Markt eingeführt.
- „Industrie 4.0“-Systeme und -Organisationsformen sind zumeist individuelle Lösungen und nicht mit einem einheitlichen „Stand“ bewertbar.
- Die spezifischen Dekarbonisierungstechnologien wie Direktreduktion, CCS, CCU haben den „proof of concept“ sowie Pilot- und Demonstrationsphasen hinter sich gelassen, werden sich aber mit weiterer Umsetzung im Sinne von Skaleneffekten, Lernkurven und weiteren Effizienzgewinnen oder Individualisierungen weiterentwickeln.
- PtX-Technologien und z. B. alternative Wasserstoffproduktion haben immer noch starke Forschungs- und Entwicklungsaspekte und sind z. T. noch weiter von der Markteinführung entfernt.
- Die reproduzierbare und skalierbare Produktion nanostrukturierter Materialien erfordert Entwicklung und Aufbau entsprechender Produktionsverfahren und World-Scale-Anlagen.



## Klima-Factsheet Gesundheitswesen und Medizintechnologien

### Technologien und Anwendungen

In diesem Feld gibt es weniger Technologien, die direkt mit Klimaschutz und Energieeinsparung zu tun haben, als vielmehr dringend notwendige Unterstützungen der Klimaanpassung. Vorbereitung, Reaktion auf und Umgang mit Krankheiten aus anderen Klimazonen, Prävention gegen und routinemäßiger Umgang mit Hitzeschäden, vor allem bei verwundbaren Personen (Kleinkinder, Senioren, geschwächte Personen). Die Medizintechnologien weisen Überschneidungen und Wechselwirkungen mit Nano- und Biotechnologien auf.

- Einige Technologien können mittelbare Einsparungen zur Folge haben, z.B. kann Telemedizin Verkehrswege einsparen.
- Das Gesundheitssystem als solches trägt als Teil des Dienstleistungssektors mit Gebäuden, Technologien, Produkten und z. B. Prozesswärme oder elektrischen Anwendungen zu den Emissionen bei.

### Wirkung

- Zumeist neutral in Bezug auf Direktmissionen.
- Telemedizin kann Verkehrsleistungen ersetzen.
- Aufwendige diagnostische Methoden mit bildgebenden Verfahren (z.B. Magnetresonanztomografie, Computertomografie, aber auch „normales Röntgen“ beinhalten sowohl bei der Produktion der Geräte (CT-Gerät aus hochwertigem Stahl, Bleiabschirmungen) als auch im Betrieb Energieverbrauch und Emissionen.
- Big-Data-Analysenmethoden und KI-Unterstützung können Diagnosen schneller und sicherer machen und somit die Zahl der notwendigen Untersuchungen reduzieren.
- Miniaturisierung, Automatisierung und elektronische Kommunikationsfähigkeit z. B. von Sensorik, aber auch von therapeutischen Geräten (z. B. Herzschrittmacher, Insulinpumpen) können heute noch aufwendige Untersuchungen und Verkehrswege einsparen.
- Wenn plötzlich klassische „Krankheiten aus tropischen Entwicklungs- und Schwellenländern“ durch den Klimawandel verstärkt auch in Industrieländern auftreten, kann die bisher unattraktive Entwicklung von Therapien auch wiederum den Ursprungsländern Vorteile bringen.

### Rahmenbedingungen

Anerkennung als Teil einer notwendigen Anpassungsstrategie, Finanzierung, internationale Kooperationen, insbesondere zwischen Industrie- und Entwicklungsländern.

### Entwicklungsbedarf

Z. T. Einführung und Standardisierung grundsätzlich vorhandener Methoden nötig, die bislang in unseren Breiten nicht benötigt wurden. Z. T. Entwicklung von kostengünstigen „Low-Tech“-Methoden – z. B. kühlende Materialien.



## Klima-Factsheet Ernährung und Lebensmitteltechnologien

### Technologien und Anwendungen

- Fleischsubstitute.
- Futtermittel-Anpassungen, effizientere Landwirtschaft, Düngemittelmanagement.
- Präzisions-Landwirtschaft.
- Organisationsformen: regionales Wirtschaften, regionale Stoffkreisläufe.
- Klimaanpassung: z. B. hitze- und dürreresistente(re) Sorten, anpassungsfähige Nutztierassen.

### Wirkung

- Fleischersatzprodukte: emissionsreduzierende Wirkung (Methan-Emissionen aus der Tierhaltung sowie Lachgasemissionen aus der Futtermittelproduktion).
- Weiterhin Flächenentlastung und ggf. Entlastung von Ökosystemen durch weniger intensive Produktion.
- Entlastung bei Methan, Lachgas, NOx durch Präzisionslandwirtschaft und Düngermanagement.
- Präzisionslandwirtschaft: leichte Erhöhung des Stromverbrauchs durch elektronische Sensorik, Drohnenüberwachung und -einsatz.
- Regionale Stoffkreisläufe reduzieren vor allem Langstreckentransporte; ggf. Energiemehrverbrauch durch mehr Gewächshausanbau.

### Rahmenbedingungen

- Änderung der Rahmenbedingungen auf Ebene Agrarsubventionspolitik (in Deutschland und der EU).
- Zulassungsbedingungen Fleischersatzprodukte (klare Kriterien, Sicherheit).
- Entwicklung von Nachfrage und Organisation in der regionalen Landwirtschaft (ggf. Label).

### Entwicklungsbedarf

- Effiziente Landwirtschaft und Präzisions-Landwirtschaft entwickeln sich derzeit dynamisch für unterschiedliche Betriebsgrößen und Anbaumethoden.
- „Laborfleisch“ sowie Fleischersatzprodukte (z. B. auf Basis von Insekten- oder Krillprotein oder aus pflanzlichem Protein) ist z. T. in Markterkundungsphasen mit parallelem Forschungs- und Entwicklungsanteil.
- Hitze- und dürreresistente Sorten sind z. B. beim Weinbau und Gemüse in Testphasen, bei Getreide und Tierfutter noch am Anfang.
- Forschung, Pilot- und Demonstrationsvorhaben, Anfangsunterstützung resistenter Sorten.



## Klima-Factsheet Luft- und Raumfahrttechnologien

### Technologien und Anwendungen

- Reibungsarme und aerodynamische Materialien, Hybrid-Antriebstechnologien, Leichtbau-Werkstoffe.
- Synthetische Treibstoffe (Power-to-Kerosin), Brennstoffzellen-Antrieb.
- Bei Kurzstrecken: batterieelektrischer Antrieb.
- Detektionssatelliten (z. B. für die Bereitstellung von Spezialdaten für die Landwirtschaft).
- Spezielle Löschflugzeuge und Spezialdrohnen.
- Unterstützung bei der Bewältigung von Naturkatastrophen durch spezialisierte Drohnen.

### Wirkung

- Alternative Antriebe und Treibstoffe sowie aerodynamische Spezialmaterialien werden mit dem Ziel der direkten Emissionsreduktion entwickelt.
- Spezielle Satelliten und Drohnen, Löschflugzeuge etc. dienen eher indirekt (für die Landwirtschaft) der Emissionsreduktion sowie der Klimaanpassung bzw. dem Umgang mit Klimafolgen.

### Rahmenbedingungen

- Gute Rahmenbedingungen für spezifische Forschung und Entwicklung, Testphasen, Einführung.
- Personen- und Frachtflugverkehr: Lenkungsinstrumente und Anreize für den Einsatz emissionsarmer Technologien.
- Bei anpassungsunterstützenden Technologien (Satelliten, Drohnen): besonders enge Verzahnung mit Digitalisierungsanwendungen.

### Entwicklungsbedarf

- Werkstoffe: ständige Entwicklung, z. T. in Markteinführungsphasen.
- Antriebe und Treibstoffe: Testphasen, noch lange vor Serienentwicklung oder großtechnischer Produktion (könnte bei entsprechenden Rahmenbedingungen vermutlich schnell gehen).
- Satelliten, Drohnen etc.: teils F&E, teils industrielle Entwicklung, teils bereits in Kommerzialisierungsphase.

## Technologiedefinitionen

### 3D Druck oder Robotereinsatz im Bau

3D gedruckte Häuser oder Roboterautomatisierung im Bauwesen.

### 3D Drucken

Herstellung von vielfältigen Produkten und Ersatzteilen zur bedarfsgerechten Massenmaßschneiderung statt Massenproduktion. Während in der herkömmlichen Produktion Objekte in der Regel aus einem Materialblock herausgearbeitet werden, wird im 3D Druck das Objekt Schicht für Schicht aufgebaut.

### Abfallmanagement

Technologien rund um die Planung und Ausführung von Abfallbehandlung, vor allem Geschäftsmethoden und Prozesse rund um Abfallkategorisierung, Bezahlung und Ausfuhrproptimierung, sowie Abfalletikettierung und Sortierungsmethoden.

### Anpassungstechnologien im Bau und Infrastruktur

Technologien gegen Tsunamis, Überschwemmungen, Wirbelstürme und andere Umwelt-extreme.

### Anpassungstechnologien in der Gesundheitsvorsorge

Entwicklungen zur Gesundheitsvorsorge gegen zunehmende Krankheiten wie Malaria, Zika, Nil-Fieber etc.

### Anpassungstechnologien in der Landwirtschaft

Technologien zur Anpassung an höhere Temperaturen, ein verändertes Niederschlagsregime, Veränderungen des hydrologischen Kreislaufs, der Bodenfruchtbarkeit, der Luftschadstoffe und der Ausbreitung invasiver Arten.

### Bauwerksdatenmodellierung

Vollständig digitale Entwicklung von Gebäuden in Modellen zur Optimierung der Baukosten, beispielsweise über Materialeinsparung. Darüber hinaus können die Daten in die Gebäudeverwaltung einfließen, beispielsweise zur Optimierung von Wartungsintervallen.

### Biopolymere

Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen, wie Cellulosen oder Milchsäure, die aufgrund ihrer Herstellung und/oder durch ihre biologische Abbaubarkeit nachhaltig und umweltschonend sind.

### Biotreibstoffe, Biomasse

Die Umwandlung von Kohlenstoffverbindungen aus biogenen Quellen (z. B. Bio-Abfälle, Gülle, Holz aus Kurzumtriebsplantagen etc.) durch verschiedene technische Schritte und Prozesse zu elektrischem Strom oder Energieträgern wie Biogas oder Biotreibstoffen.

### Brennstoffzelle

Energiewandler, die chemisch gebundene Energie, oft  $H_2$  und  $O_2$ , in elektrische Energie umwandeln. Neben Wasserstoff können auch andere Brennstoffe wie Methanol oder Erdgas verwendet werden, dann allerdings mit zusätzlichen Prozessschritten.

### Edge / Steuerung und Software in Endgeräten

Verlagerung der Steuerung und Software in dezentrale Endgeräte, im Gegensatz zur Cloud und zentralen Lösungen. Obwohl technische Gründe wie Datensicherheit und Reaktionsgeschwindigkeit im Vordergrund stehen, kann dadurch auch der hohe Stromverbrauch von Serverfarmen reduziert werden.

### Effiziente Glas- und Keramikproduktion

Technologien zur Vermeidung von Ausschuss und zur ressourceneffizienteren Herstellung von Glas und Keramik.

**Effiziente Industrieproduktion in Chemie, Petrochemie, Textil und andere**

Technologien zur energiesparenden und ressourcenoptimierten Produktion in Chemie und verwandten Bereichen.

**Effiziente Metallproduktion**

Technologien zur energieoptimierten Produktion von Metallen. Im Zentrum der Forschungsaktivitäten steht die Steigerung der Effizienz (Wirkungsgrad) der Schmelz- und Warmhalteöfen. Zudem spielt auch die optimierte Abwärmenutzung eine Rolle. Bei der Roheisenproduktion geht es auch um die tiefgreifende Umstellung des Reduktionsprozesses, um Prozessemissionen zu vermeiden.

**Effizientere Verbrennungsmotoren**

Das Feld umfasst verschiedene Aspekte der Reduktion des Treibstoffverbrauchs des Verbrennungsmotors, wie die Steuerung des Treibstoff/Luftgemisches, Abgasrückführung (EGR), Wärmeisolierung und verbesserte Schmierung. Das Gebiet fokussiert auf Automobile und verwandte Fahrzeuge.

**Elektrofahrzeuge**

Vollelektrische Fahrzeuge und Batteriegetriebene Fahrzeuge, nicht aber Hybride.

**Elektrisches / hybrides Fliegen**

Teil- oder ganz-elektrische Antriebe in der Luftfahrt mit Strom aus erneuerbaren Quellen oder aus Brennstoffzellen. Aufgrund des hohen Gewichts der Batteriespeicher spielen in absehbarer Zeit hybride Systeme eine wichtige Rolle.

**Emissionsreduzierende Tierfutter**

Futterzusätze zur Optimierung der Verdauung von Nutztieren. Ziel ist es, den Methan- ausstoß der Tiere zu reduzieren.

**Energieeffiziente Gebäude-, Beleuchtung- und Büroelektronik**

Dieses Feld umfasst energieeffiziente Gebäudeelektronik und Endgeräte in Heim- und Büroumgebungen. Dazu gehören Energiesparmaßnahmen für Bürogeräte wie auch effiziente Beleuchtungstechnologien in Gebäuden sowie die Steuerung von raumluftechnischen Anlagen.

**Energieeffiziente Computer Hardware**

Dieses Technologiefeld umfasst alle Technologien rund um Energiesparmaßnahmen für Computer Hardware, z. B. Stand-By-, Power-Down und Schlaffunktionen, aber auch effiziente Serverfarmen und Stromsparmaßnahmen größerer Computerinstallationen.

**Energieeffiziente Gebäudetechnik**

Dieser Bereich umfasst Technologien für Wärmedämmung, Passives Kühlen, raumluftechnische Anlagen, Wärmepumpen, Thermochrome Gläser und andere energieeffiziente Gebäudetechnologien.

**Energieeffiziente Haushaltsgeräte**

Energieoptimierte „Weiße Ware“, Wasch-, Spülmaschinen, Trockner, Herde, Kühlschränke. In der Regel steht der reduzierte Stromverbrauch im Vordergrund der Forschung.

**Energieeffiziente Netzwerktechnologie**

Dieses Feld beinhaltet diverse Technologien zur Steigerung der Effizienz drahtloser und drahtgebundener Übertragungsnetze und Energiesparmaßnahmen in Ethernet und Mobilfunknetzen, wie z. B. adaptive Übertragungsratenregelungen und Stand-By Technologien in Netzwerken und Controllern.

**Energiespeicher, Wärme, Mechanisch, Druck**

Zweck der Energiespeicher ist die Aufnahme und zeitlich verzögerte Verfügbarkeit der Energie. Beispiele sind Pumpspeicher, Druckluftspeicher oder Wärmespeicher.

**Geothermie**

Die Geothermie nutzt die Erdwärme zur direkten oder indirekten Energieerzeugung. Diese kann direkt zur Heizung von Gebäuden, für Warmwasser oder zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Der Vorteil liegt in der wetterunabhängigen und damit steuerbaren Produktion.

**Feststoffakkumulator**

Akkumulator oder Batterie, die einen Feststoff-Elektrolyten aufweist, der aus Polymeren oder Oxiden, z. B. Granaten besteht und weniger empfindlich auf Elektrolytverlust und Entzündung ist als Technologien mit flüssigen Elektrolyten.

**Fleischalternativen**

Produkte meist auf pflanzlicher Basis (Erbseproteine etc.), die als Fleischersatz dienen. Im Vordergrund stehen insbesondere Texturanpassungen und Fermentationstechnologien.

**Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung**

HGÜ (engl. HVDC) ist eine Technologie der Stromübertragung mit Gleichspannung, die insbesondere für die Elektrizitätsübertragung über große Entfernungen entwickelt wurde und geringere Übertragungsverluste im Vergleich zur Wechselstromübertragungstechnik verspricht. An den Ein- und Ausspeisepunkten erfolgt zumeist eine Transformation von bzw. zu Wechselstrom.

**Hyperloop und Magnetschwebbahnen**

Moderne schienenähnliche Transportsysteme, bei denen die Fahrzeuge berührungslos mit Magneten in der Schwebelage gehalten werden und dadurch sehr viel geringeren Reibungswiderstand überwinden müssen als Fahrzeuge, die mit Rädern auf Schienen rollen. In Hyperloops wird mit Hilfe eines geringeren Luftdrucks in den Röhren zusätzlich der Luftwiderstand reduziert.

**Industrielle Wasseraufbereitung**

Das Technologiefeld beinhaltet die verschiedenen Aspekte der Wasseraufbereitung für industrielle Zwecke, wie sie im Umfeld der Halbleiterherstellung, Labormaterialien oder Industrierwasserreinigung eingesetzt werden. Nicht enthalten sind die Kanalisation und Rohre, sowie die Trinkwasseraufbereitung insbesondere im Haushalt.

**Intelligentes Glas**

Thermochrome oder elektrochrome Gläser, insbesondere für Gebäude und große Fensterflächen zum Wärme- bzw. Strahlungsmanagement.

**Intelligente Stromnetze**

Stromnetze und Stromverteilung mit kommunikativer Verteilung und Steuerung. Diese finden sich in dezentralen Energieerzeugern (z. B. Windenergieanlagen), aber auch in modernen Fahrzeugen. Perspektivisch wird angestrebt, solche Systeme auch in größeren Regionen aufzubauen, um viele dezentrale Erzeuger und Verbraucher effizient miteinander zu koppeln.

**Intelligentes, vernetztes Haus**

Geräte in und um Gebäude, die aus Sensoren und Netzwerkkomponenten bestehen. Das intelligente energieeffiziente Zusammenspiel der Geräte steht im Vordergrund.

**Kernfusionsreaktoren**

Dieses Feld beschreibt Technologien um die Energieerzeugung durch Kernfusion, und beinhaltet Stellarator, Tokamak und vergleichbare Technologien.

**CO<sub>2</sub>-Filter, -Abscheidung, -Bindung**

Gasfilteranlagen, Abscheidungsvorrichtungen und Kohlenstoffbindungsprozesse ermöglichen die direkte Bindung des entstehenden CO<sub>2</sub>. Im Idealfall wird das gewonnene CO<sub>2</sub> wieder als Rohstoff eingesetzt und gebunden aus dem Kreislauf genommen. In den meisten Fällen handelt es sich um industrielle Gaswaschanlagen und Filter.

**Kondensatorspeicher**

Elektrische Speicher, die Ladungen statisch in einem Feld speichern. Dies können insbesondere passive Batteriealternativen sein, es sind aber auch kleine Kondensatoren für elektrische Geräte enthalten.

**Ladeinfrastruktur in und um Fahrzeuge**

Ladesysteme in Fahrzeugen (z.B. Hybride) sowie von Fahrzeugen (Elektrofahrzeuge).

**Lithium Akkumulatoren**

Lithium-Akkumulatoren, also wiederaufladbare Stromspeicher auf Basis von Li-Ionen als Elektrolyt (und nicht Lithium Batterien im eigentlichen Sinn).

**Meeresenergie**

Gezeitenkraftwerke, Strömungs- und Wellenkraftwerke zur Stromerzeugung.

**Micro-LEDs**

Selbstleuchtende Micro-LEDs als Nachfolger der hintergrundbeleuchteten LCD, insbesondere für TV und Screens mit niedrigerem Stromverbrauch.

**Nachhaltige Schiffsantriebe**

Elektrifizierung, Segel- oder Windantriebe auf Schiffen als Alternative zum gegenwärtig verwendeten Schweröl.

**Nachhaltige Verpackungen**

Verpackungen auf Basis nachwachsender Rohstoffe, wie z. B. Cellulosen, insbesondere für die Kreislaufwirtschaft.

**OLEDs**

OLEDs (Organic light emitting diodes, organische LEDs) als Nachfolger der LCDs und in Konkurrenz zu Micro-LEDs, insbesondere für TV und Screens. Als Materialien werden spezifische organochemische Farbstoffe eingesetzt.

**Organische Solarzellen, Tandem- und Perovskitzellen**

Sammelgruppe von Nicht-Siliziumsolarzellen, auf Basis von organischen Farbstoffen (Polymerzellen), meist mit niedrigerem Wirkungsgrad und (anorganische) Tandem/Perovskit-Zellen mit höheren Wirkungsgraden.

**Photovoltaik, AC / DC Wandler**

Umwandlungstechnologie von Gleich- in Wechselspannung für photovoltaische Anlagen.

**Polymerelektrolytbrennstoffzelle**

Niedrigtemperatur- oder Feststoffpolymer-Brennstoffzelle mit einem Polymerelektrolyten.

**Präzisionslandwirtschaft**

Unterstützungs- und Optimierungstechnologien in der Landwirtschaft, z. B. Einsatz von Drohnen oder Satelliten zur ressourcenschonenden Ertragsoptimierung.

**Recycling, Wiederaufbereitung**

Wiederverwendung von Produkten aus Produktionsprozessen wie aus Abfällen diverser Art, insbesondere aus Industrieprozessen aber auch Haushalten.

**Reinraumlandwirtschaft**

Landwirtschaft in Reinräumen und künstlicher Atmosphäre, auch in Städten.

**Silizium Photovoltaik Zellen**

Klassische Silizium Solarzellen, die auf Basis dotierter Silizium-Halbleiter Sonnenlicht direkt in elektrische Energie umwandeln.

**Solarthermie**

Solarthermische Anlagen, die im Gegensatz zu Photovoltaik-Anlagen nicht Strom erzeugen, sondern Wärme, die z. B. in Warmwasserspeichern gespeichert werden kann. Je nach Technologien können unterschiedlich hohe Temperaturen erzeugt werden, bis hin zu Prozesswärmertemperaturen bei konzentrierenden Anlagen.

**Stickoxidfilter**

Verschiedene Technologien zur Reduktion oder Filterung von NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O und anderen höheren Gasen.

**Supraleiter**

Supraleitende Materialien, die unterhalb einer Sprungtemperatur die verlustarme Leitung von elektrischem Strom ermöglichen. In der Regel wird der elektrische Widerstand erst bei sehr niedrigen Temperaturen (Sprungtemperatur) aufgehoben. Die Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung von Materialien zur Erreichung dieses Effekts bei deutlich höheren Temperaturen.

**Synthetische Treibstoffe**

Treibstoffe, insbesondere für die Mobilität, hergestellt aus nicht petrochemischen Rohstoffen, insbesondere Fischer-Tropsch und ähnliche Verfahren.

**Torrefaction, Pyrolyse, Biokohlenstoff**

Umwandlung von Bio-Kohlenstoff, insbesondere kohlenstoffhaltiger Abfälle mit verschiedenen Verfahren zu Kohlenstoff oder Methan.

**Treibhausgasärmere Zementproduktion**

Zementersatzstoffe, alternative Zementherstellungsmethoden und intelligente Prozesse zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei der Zementproduktion.

**Treibhausgas-Managementsysteme**

Digitale Geschäftsmethoden zur Reduktion von Treibhausgasen oder zur Adaption bei zunehmenden Umweltschäden, in dem z. B. die Kosten oder Effizienz von Abläufen evaluiert und optimiert werden. Enthalten sind auch Modellsysteme, AI-unterstützte Optimierungen oder Testabläufe, sowie diverse Finanz-, Versicherungs- und Messmethoden rund um die Klimaeffekte, Vorhersagen oder Anpassungen.

**Urbane Logistik und automatisierte Lagerwirtschaft**

Drohnen, Autonome Fahrzeuge und Roboter in Containerterminals, Hochregallager oder als städtische Liefervarianten, sowie moderne urbane Warenverteilsysteme.

**Verkehrsleitsysteme und vernetzter Verkehr**

Die ressourcenoptimierte Vernetzung von Verkehrsteilnehmern jeder Art, Verkehrsleitung und Steuerung. Ebenso sind Verkehrseffizienztechnologien wie intelligente autonome Fahr- und Kommunikationssysteme Teil der Definition.

**Vernetzte Fabrikation**

Vernetzung in der industriellen Produktion, bis zur komplett integrierten Fabrik. Ein wesentlicher Teil dieser Technologie sind die prädiktiven Unterhaltssysteme, die Elemente wie Monitoring, Datensammlung und Bildanalysen, Fehlerdiagnose und vernetzte Kontrolle der Produktion umfassen. Ein kleiner Bereich sind auch adaptive Kontrollsysteme, wie sie bei automatisierten Fabrikationen Anwendung finden (automatisierte Containerterminals und Warentransport, autonome „Fließbänder“).

**Wasserstoffherstellung mit erneuerbaren Energien**

Im Mittelpunkt der Technologie steht die Wasserstoffproduktion mit Hilfe mit erneuerbarer Energie, insbesondere Elektrolyse und Brennstoffzelle mit Strom aus Photovoltaik und Windanlagen.

**Windenergie**

Stromerzeugung durch Rotoren, Drachen- oder andere windbewegte Installationen. Windkraftspezifische Bauteile wie Rotorblätter sind ebenfalls enthalten.

## Fortgeschrittene Digitalisierungstechnologien

### 3D Bildanalyse

Modellieren und manipulieren von 3dimensionalen Bildern zur Verwendung in Computergrafiken oder Simulationen, bis zur Navigation in 3D Modellen. Auch 3D Modellbeschreibungen, Texture Mapping und perspektivisches Rechnen gehört in dieses Gebiet.

### 5G

Die 5. Generation des Mobilfunknetzes ist eine Technologie mit einer deutlich höheren Datenrate als die Vorgängerversion. Durch bis zu zehn Gigabit pro Sekunde verspricht 5G die gleichzeitige Ansprache von 100 Milliarden mobilen Endgeräten. Aufgrund der Verwendung mehrerer Sende- und Empfangsantennen und Frequenzbändern bis zu 80 GHz können mobile Empfangsgeräte bei Bedarf gezielt mit hohen Datenraten versorgt werden.

### Big Data

Big Data bezeichnet Datensätze, die zu unstrukturiert, zu umfangreich oder zu komplex sind, um sie mit klassischer Datenverarbeitungssoftware verwalten oder analysieren zu können. Die Technologie beinhaltet neue Ansätze zur Suche, Indexierung, Verwaltung und Analyse dieser Daten sowie Geschäftsmethoden, die darauf aufbauend entwickelt werden können.

### Blockchain

Blockchain ist eine gemeinsam genutzte Datenbanktechnologie, bei der Verbraucher und Lieferanten einer Transaktion direkt miteinander verknüpft werden und Einzelheiten der Transaktion immer verzeichnet sowie für alle einsehbar, verifizierbar und nicht veränderbar sind. Neben der bekanntesten Blockchainanwendung Bitcoin sind auch Verträge (Smart Contracts) oder Wahlen aufgrund der hohen technologischen Sicherheit möglich. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die beständige Überprüfbarkeit von Lieferketten.

### Cloud Computing

Cloud Computing dient der Entwicklung und Verwaltung einer virtuellen IT-Infrastruktur, die lokale Systeme ersetzt. Neben der Skalierbarkeit der nachgefragten Infrastruktur (infrastructure as a service) sind Nutzungszugänge für Anwendungen (software as a service) und Rechenkapazitäten (platform as a service) Teile der Technologie.

### Digital Twin

Digital Twin, oder digitalen Zwilling beschreibt die digitale Abbildung und Modellierung realer oder auch irrealer Gegenstände, bis hin zu einer vollständigen Fabrikationsanlage. Ziel ist die Prüfung der Funktionsfähigkeit bzw. die Simulation von Prozessen.

### Digitale Sensoren

Sensoren, die deutliche höhere Anforderungen an die Kommunikation und Datentransfer aufweisen, als einfache Messvorrichtungen, die maximal eine Antenne enthalten, fallen unter digitale Sensoren. Typische Sensoren dieser Bauart sind in autonomen Fahrzeugen und Verkehrselementen eingesetzt, arbeiten mit Lidar oder Radar, oder es sind IoT-Sensoren, in vernetzten Geräten. Weitere sind Biosensoren und Device-Sensoren, die in Kontakt mit tragbaren Geräten sind, aber auch Sensoren in intelligenten Häusern oder Energierellevanten Geräten.

### Fintech

Finanztechnologie und Zahlungsverkehr beschreibt das Gebiet der finanztechnischen Verfahren und Methoden aus dem Bereich des Bank-, Versicherungs-, Wertpapier- und Transaktionswesens. Inbegriffen sind auch Anwendungen von Simulationssoftware sowie maschinelles Lernen zur Mustererkennung und Vorhersage. Ebenfalls enthalten sind Anwendungen zur Ermöglichung von Zahlungen, z. B. im Onlinehandel.

### Gestikanalyse

Handbewegungen können als natürliche Schnittstelle im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktion genutzt werden. Benutzer können einfache Gesten verwenden, um Geräte zu steuern oder mit ihnen zu interagieren, ohne sie physisch zu berühren. Neben einfachen Gesten umfasst die Technologie auch die Analyse der gesamten Körpersprache.

### Halbleiterproduktion

Mikroprozessoren bzw. integrierte Schaltkreise werden gegenwärtig vor allem aus Halbleitermaterial wie Silizium gefertigt. Sie haben die Fertigkeit, als elektrisch gesteuerte Schalter zu agieren, um Rechenvorgänge auszuführen. Sie sind somit die zentrale Komponente aller heutigen elektronischen Geräte. Der wesentliche leistungssteigernde Fortschritt in der Produktion wird durch die ständige Miniaturisierung erzielt, die eine immer höhere Dichte an Transistoren ermöglicht. Perspektivisch können photonische und später spintronische Systeme eingesetzt werden, die dann nicht mehr auf Halbleitermaterialien basieren.

### Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz bezeichnet Anwendungen, die kognitive Fertigkeiten des Menschen – wie das Lösen von Problemen – nachahmen. Die Technologie beinhaltet verschiedene Ansätze wie Machine Learning, Neural Networks und Deep Learning. Diese können für neue Entwicklungen in den Bereichen Spracherkennung, Bildanalyse, Zeichenerkennung, Datenanalyse und auch zur Produktion von Inhalten nutzbar gemacht werden.

### Machine to Machine Communication

Machine-to-machine (m2m), Device to Device (d2d) oder V2V (vehicle to Vehicle) Kommunikation bezeichnet eine spezifische Technologiekategorie, die sich massgeblich um die Kommunikation zwischen „Devices“ verschiedener Art kümmert. Klassisch sind dies Mobiltelefone, inzwischen kommunizieren aber Devices ganz verschiedener Art miteinander. Seit dem starken Anwachsen des IoT steigt die Anzahl markant, und das Gebiet enthält sowohl die direkte Kommunikation zwischen den Devices wie auch der Kommunikation via Plattformen und Zentralstellen.

### Prozessautomatisierung

Programm-Steuerungen im Produktionsumfeld, insbesondere Programme zur Steuerung von Robotern oder ganzen integrierten Produktionsanlagen (Total Factory Control), sowie diverse Computer- und Software-Applikationen in der Herstellung von Gütern, bis hin zur vollautomatisierten Produktion.

### Quantencomputer

Quantencomputer können Probleme bearbeiten, die mit konventionellen Computern nur in extrem langer Zeit und mit zunehmender Rechenleistung nicht oder nur extrem schwer gelöst werden können, wie z. B. Primfaktorzerlegung sehr großer Zahlen. Für zahlreiche konventionelle Probleme sind sie hingegen weniger gut geeignet. Die Prinzipien beruhen auf verschränkten Quantenzuständen und nicht auf klassischer Elektrodynamik. Damit können sie nach den Prinzipien mehrwertiger „Quantenlogik“ operieren, die anders funktioniert als die üblicherweise angewendete zweiwertige aristotelische Logik.

### Sprachanalysetechnologien

Sprachanalyse und Spracherkennung, insbesondere die Verarbeitung natürlicher Sprache (Natural language processing, NLP), ist ein zentrales Forschungsgebiet im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktionstechnologien. Obwohl die Spracherkennung als Technologie vergleichsweise alt ist, sind signifikante Fortschritte aufgrund der Verknüpfung der Technologie mit künstlicher Intelligenz zu erwarten.

### Streamingtechnologien

Streaming oder früher Video on Demand sind Technologien, bei denen die Videosignale oder das digitale TV direkt über das (Heim-)Netzwerk bezogen wird.

### Touch Technologie

Eine Interaktionstechnologie mit der die Befehlseingabe des Benutzers direkt über den berührungsempfindlichen Bildschirm erfolgen kann. Der Vorteil liegt in der intuitiven Bedienung. Der wichtigste Anwendungsbereich der Touch Technologie ist gegenwärtig das Smartphone.

**Verschlüsselungstechnologien**

Encryption oder Ciphering (Verschlüsselung oder Chiffrierung) ist eine entscheidende Technologie insbesondere in Computernetzwerken und zunehmend von Bedeutung in der digitalen Kommunikation. Meist werden dabei Schlüssel ausgetauscht, insbesondere Privat-Privat- oder Privat-Public-Keys. Auch die Verschlüsselungstechniken rund um Block-Ciphering, Blockchain (nur bezüglich der Verschlüsselung, nicht der Anwendung) und ähnliche moderne Sicherheitstechniken in Netzwerken sind enthalten. Zukünftig ist hier eine Verknüpfung mit Quantencomputern zur Entwicklung neuer Sicherheitsstandards zu erwarten.

**Virtual Reality / Augmented Reality**

Virtual Reality bezeichnet die Wahrnehmung der Wirklichkeit in einer computergenerierten und interaktiven Umgebung. Neben der virtuellen Realität ist auch die Augmented Reality Teil der Technologie. Hier sehen Anwender die reale Welt und bekommen zusätzlich Informationen eingeblendet.

**Wireless Communication Hardware**

Chips werden heutzutage in allerlei Anwendungen verarbeitet. Hier sind die Chips zusammengetragen, die maßgeblich für die drahtlose Kommunikation, insbesondere von Mobiltelefonen, aber auch den zunehmenden anderen drahtlos kommunizierenden Geräten verantwortlich sind. Sie bilden daher eine spezifische Untergruppe der allgemeinen Halbleitertechnologie. Da die Abgrenzung zu sonstigen Chips bzw. der Anwendung von Chips in generellen Netzwerken nicht immer vollständig separierbar ist, gibt es eine gewisse Überlappung in angrenzende Bereiche.

## Literaturverzeichnis

<b>acatech (2018)</b>	CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie.
<b>acatech und Körber Stiftung (2019)</b>	TechnikRadar 2018. Was die Deutschen über Technik denken.
<b>acatech, Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) und Deutsche Energie-Agentur (dena) (2019)</b>	Expertise bündeln, Politik gestalten. Energiewende jetzt! Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050 in Deutschland.
<b>Agentur für Erneuerbare Energien (2010)</b>	Erneuerbare Energien 2020. Potenzialatlas Deutschland.
<b>Agora Energiewende (2020a)</b>	Die Energiewende im Stromsektor, Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020.
<b>Agora Energiewende (2020b)</b>	Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz Deutschlands. Eine Abschätzung der Emissionen 2020.
<b>Allianz Global Corporate &amp; Specialty (2012)</b>	Managing Disruptions. Supply Chain Risk: An Insurer's Perspective.
<b>Arnstein, S. R. (1969)</b>	A Ladder of Citizen Participation. Journal of the American Planning Association 35, 216–224.
<b>Ballhorn, U., Siegert, F., Masonc, M. und Limin S. (2009)</b>	Derivation of Burn Scar Depths and Estimation of Carbon Emissions with LIDAR in Indonesian Peatlands. PNAS 106, 21213–21218.
<b>BASF (2019)</b>	BASF-Bericht 2018. Ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Leistung.
<b>Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2015)</b>	Deponie-Info 2. Photovoltaikanlagen auf Deponien.
<b>Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2018)</b>	Geothermie in Bayern. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://www.lfu.bayern.de/geologie/geothermie/geothermie_tief/index.htm">https://www.lfu.bayern.de/geologie/geothermie/geothermie_tief/index.htm</a>
<b>Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2015)</b>	Klima-Report Bayern 2015.
<b>Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2017a)</b>	Bayerische Klima-Anpassungsstrategie 2016.
<b>Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2017b)</b>	Indikatoren zu Klimafolgen und Klimaanpassung in Bayern. Machbarkeitsstudie.

<b>Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (StMWi) (2017)</b>	Umweltwirtschaft in Bayern Studie. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Publikationen/2017/2017-07-28_Umweltwirtschaft_in_Bayern.pdf">https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Publikationen/2017/2017-07-28_Umweltwirtschaft_in_Bayern.pdf</a>
<b>Bayern design (2017)</b>	Design Innovation Day. Unlocking Business Value through the Circular Economy. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://bayern-design.de/en/event/design-innovation-day">https://bayern-design.de/en/event/design-innovation-day</a>
<b>Bayern innovativ (2019)</b>	The Circular Economy in Southern Germany. Opportunities and Obstacles for Dutch Entrepreneurs in the Infrastructure and Construction Sectors. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://www.bayern-innovativ.de/seite/mehr-nachhaltigkeit-durch-kreislaufwirtschaft">https://www.bayern-innovativ.de/seite/mehr-nachhaltigkeit-durch-kreislaufwirtschaft</a>
<b>Benzie, M., Hedlund, J. und Carlsen, H. (2016)</b>	Introducing the Transnational Climate Impacts Index. Indicators of Country-level exposure. Methodology Report. Working Paper 2016-07. Stockholm Environment Institute: Stockholm.
<b>Beste, D. (2019)</b>	Neues Material spart bei LED-Lampen Seltene Erden ein. SpringerProfessional Im Fokus. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://www.springerprofessional.de/materialentwicklung/rohstoffe/neues-material-spart-bei-led-lampen-seltene-erden-ein/16414908">https://www.springerprofessional.de/materialentwicklung/rohstoffe/neues-material-spart-bei-led-lampen-seltene-erden-ein/16414908</a>
<b>Birkmann, J. und Fleischhauer, M. (2013)</b>	Vulnerabilität von Raumnutzungen, Raumfunktionen und Raumstrukturen. In: Birkmann, Jörn; Vollmer, Maik; Schanze, Jochen (Hrsg.): Raumentwicklung im Klimawandel. Herausforderungen für die räumliche Planung (Forschungsberichte der ARL, H. 2). Akademie für Raumforschung und Landesplanung ARL, Hannover, 44–68.
<b>Birkmann, J., Schanze, J., Müller, P. und Stock, M. (2012)</b>	Anpassung an den Klimawandel durch räumliche Planung. Grundlagen, Strategien, Instrumente. E-Paper der Akademie für Raumforschung und Landesplanung ARL Nr. 13. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/e-paper_der_arl_nr13.pdf">https://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/e-paper_der_arl_nr13.pdf</a> .
<b>Bloomberg NEF (2019)</b>	New Energy Outlook 2019. Bloomberg NEF.
<b>Bode, S. (2006)</b>	Die deutsche Krankheit. German Angst. Stuttgart: Klett-Cotta.
<b>Bowman, M. J. S. (2009)</b>	Fire in the Earth System. Science 5926, 481–484.
<b>BUND und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2020)</b>	Klimaschutz statt Kohleschmutz. Woran es beim Kohleausstieg hakt und was zu tun ist. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/kohle/kohle_ausstieg_diw-studie.pdf">https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/kohle/kohle_ausstieg_diw-studie.pdf</a>
<b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2020)</b>	Forschung für Nachhaltige Entwicklung. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <a href="https://www.bmbf.de/de/forschung-fuer-nachhaltige-entwicklung-170.html">https://www.bmbf.de/de/forschung-fuer-nachhaltige-entwicklung-170.html</a>
<b>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2016)</b>	Klimaschutzplan 2050.
<b>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019a)</b>	Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.



- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019b)** Nationales Programm für nachhaltigen Konsum. Gesellschaftlicher Wandel durch einen nachhaltigen Lebensstil.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019c)** Überblick über das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.bmu.de/themen/wirtschaft-produkte-ressourcen-tourismus/ressourceneffizienz/deutsches-ressourceneffizienzprogramm/>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019d)** Klimaschutz in Zahlen. Der Sektor Verkehr. Stand: Mai 2019.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020)** Trump im Faktencheck des BMUB. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/faktencheck>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2018)** Mobilität in Deutschland 2017. Ergebnisbericht
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019)** Die Zukunft fährt elektrisch. Mitteilung vom 21.08.2019. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Elektromobilitaet/Elektromobilitaet-kompakt/elektromobilitaet-kompakt.html>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019)** Handbuch für eine gute Bürgerbeteiligung. Planung von Großvorhaben im Verkehrssektor.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014)** Analyse spezifischer Risiken des Klimawandels und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für exponierte industrielle Produktion in Deutschland (KLIMA-CHECK). Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-spezifischer-risiken-des-klimawandels-und-erarbeitung-von-handlungsempfehlungen-fuer-exponierte-industrielle-produktion-in-deutschland-klimacheck.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-spezifischer-risiken-des-klimawandels-und-erarbeitung-von-handlungsempfehlungen-fuer-exponierte-industrielle-produktion-in-deutschland-klimacheck.pdf?__blob=publicationFile&v=5)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019a)** Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2018.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019b)** Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-des-integrierten-nationalen-energie-und-klimaplan.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-des-integrierten-nationalen-energie-und-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=12)

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019c)** Energieeffizienzstrategie 2050.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019d)** Gesamtausgabe der Energiedaten. Datensammlung des BMWi. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020a)** Das neue Gebäudeenergiegesetz. Im Internet verfügbar (28.09.2020): [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gebäudeenergiegesetz-zusammen-gefasst.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gebäudeenergiegesetz-zusammen-gefasst.pdf?__blob=publicationFile&v=6)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020b)** Die nationale Wasserstoffstrategie. Im Internet verfügbar (28.09.2020): <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>
- Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): Bundesregierung (2008)** Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Bundesregierung (2011)** Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie.
- Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft (BDE) et al. (2018)** Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2018. Einblicke und Aussichten.
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) (2019)** Wärmewende. Keine Energiewende ohne den Wärmemarkt. Im Internet verfügbar (28.09.2020): <https://www.bdh-koeln.de/waermewende>
- Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) (2018)** Klimapfade für Deutschland. Studie erstellt von BCG und Prognos.
- Bundesverband Solarwirtschaft (2016)** Photovoltaik-Preismonitor Deutschland. EUPD Research.
- Bündnis Entwicklung Hilft (2017)** WeltRisikoBericht. Analyse und Ausblick 2017.
- Ciscar et al. (2018)** Climate Impacts in Europe. Final Report of the JRC PESETA III Project.
- Cisco 2018** Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update (2017-2022). Im Internet verfügbar (28.05.2020): unter [https://www.cisco.com/c/dam/m/en\\_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1213-business-services-ckn.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1213-business-services-ckn.pdf)
- Council of the European Union (2015)** Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States. Im Internet verfügbar (28.05.2020) unter: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/2015030601\\_eu\\_indc\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/2015030601_eu_indc_en.pdf)
- Creutzig, F. et al. (2016)** Beyond Technology. Demand-Side Solutions for Climate Change Mitigation. Annual Review of Environment and Resources 41, 173-198.

- Creutzig, F. et al. (2018)** Towards Demand-side Solutions for Mitigating Climate Change. *Nature Climate Change* 8, 260–263.
- Cuthbert, M. O. et al. (2019)** Global Patterns and Dynamics of Climate-groundwater Interactions. *Nature Climate Change* 9, 137–141.
- Davila, A. (2013)** SARTRE Project. Report on Fuel Consumption.
- De Wit, M. et al. (2020)** The Circularity Gap Report 2020. When Circularity goes From Bad to Worse. The Power of Countries to Change the Game.
- Deutsche Bank Research (2011)** Minderung des Klimawandels durch Landwirtschaft.
- Deutscher Bundestag (2017)** Anthropogener Treibhauseffekt und Klimaänderungen, Darstellung des gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes.
- Deutscher Bundestag (2018)** Sachstand Elektrifizierungsgrad der Schieneninfrastruktur. Wissenschaftliche Dienste WD 5 - 3000 - 027/18.
- Deutscher Industrie und Handelskammertag (DIHK) (2020)** IHK-Recyclingbörse. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.ihk-recyclingboerse.de>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020)** Spurengase. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung\\_atmosphaere/spurengase/spurengase\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/spurengase_node.html)
- Deutscher Wetterdienst (DWD) 2017** Meteorologie und Versicherungswirtschaft. Mitteilung vom 24.09.2017. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema\\_des\\_Tages/2851/meteorologie-und-versicherungswirtschaft](https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/2851/meteorologie-und-versicherungswirtschaft)
- Deutsches Dialog Institut und NOERR LLP (2018)** Elektromobilitätsgesetz (EmoG). Berichterstattung 2018.
- Ellen MacArthur Foundation (2016)** The new Plastics Economy. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/EllenMacArthurFoundation\\_TheNewPlasticsEconomy\\_Pages.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/EllenMacArthurFoundation_TheNewPlasticsEconomy_Pages.pdf)
- Ellen MacArthur Foundation und McKinsey Center for Business and Environment (2015):** Growth Within. A Circular Economy Vision for a Competitive Europe. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>
- Europäische Kommission (2013)** Beschluss der Europäischen Kommission vom 26. März 2013 zur Festlegung der jährlichen Emissionszuweisungen an die Mitgliedstaaten für den Zeitraum 2013 bis 2020 gemäß der Entscheidung Nr. 406/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der europäischen Kommission vom 28.03.2013.
- Europäische Kommission (2017)** Network and Traffic Management Systems. Expert Group Report.
- Europäische Kommission (2018)** In Depth Analysis in Support of the Commission Communication COM (2018) 773, A Clean Planet for all – A European Long-term Strategic Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy.

- Europäische Kommission (2019a)** Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf)
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2018)** Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Amtsblatt der Europäischen Union vom 19.06.2018.
- European Academies Science Advisory Council (EASAC) (2018)** Negative Emission Technologies. What Role in Meeting Paris Agreement Targets?.
- European Council (2019)** European Council Meeting (12 December 2019). Conclusions, EUCO 29/19.
- European Environment Agency (EEA) (2015)** Circular Economy in Europe. Developing the Knowledge Base. EEA Report No 2/2016.
- European Environment Agency (EEA) (2019)** Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990–2017 and Inventory Report 2019. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-in-ventory-2019>.
- Excess Materials Exchange (EME) (2019)** Pilot Report. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://excessmaterialexchange-pilot-report.s3.eu-central-1.amazonaws.com/EME+Pilot+Report+compressed.pdf>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2015)** Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status quo in Deutschland. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe 36.
- Farid, M. et al. (2016)** After Paris: Fiscal, Macroeconomic and Financial Implications of Climate Change, IMF Staff Discussion Note 16/01.
- Feyen L., Ciscar J.C., Gosling S., Ibarreta D. und Soria A. (Hrsg.) (2020)** JRC PESETA IV Final Report. Im Internet verfügbar (28.09.2020): [https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/pesetaiv\\_summary\\_final\\_report.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/pesetaiv_summary_final_report.pdf)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2010)** Forest Insects as Food. Humans Bite Back. RAP Publication 2010/02.
- Fraunhofer (2020)** Die Deutsche Energiewende. 13 Thesen.
- Fraunhofer Institut (2015)** Chancen für und Grenzen der Akzeptanz von CCS in Deutschland „CCS-Chancen“. Schlussbericht. Gemeinschaftsprojekt des Fraunhofer Instituts (ISI), des Wuppertal Instituts und des Forschungszentrum Jülich (STE).
- Fraunhofer ISI, Wuppertal Institut, ifeu und Prognos 2020** Inputpapier für die AG Digitalisierung im Rahmen der Roadmap Energieeffizienz 2050, im Auftrag BMWi/BfEE, Juni 2020.
- Friedlingstein, P. et al. (2019)** Global Carbon Budget. *Earth System Science Data* 11, 1783–1838.

- Fundación DARA Internacional (2012)** Climate Vulnerability Monitor 2nd Edition. A Guide to the Cold Calculus of a Hot Planet.
- Fuss, S. et al. (2018)** Negative Emissions Part 2. Costs, Potentials and Side Effects. Environmental Research Letters 13.
- Genossenschaftsverband Bayern (2017)** Energiegenossenschaften in Bayern. Strom und Wärme für den Freistaat. Artikel vom 30.01.2017. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.gv-bayern.de/standard/artikel/energiegenossenschaften-in-bayern-5867>
- Germanwatch (2013)** Der steigende Meeresspiegel. Arbeitsblätter zum globalen Klimawandel. Aktualisierte Ausgabe.
- Germanwatch (2019)** Globaler Klima-Risiko-Index 2019. Zusammenfassung. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/Globaler%20Klima-Risiko-Index%202019%20-%20Zusammenfassung\\_0.pdf](https://germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/Globaler%20Klima-Risiko-Index%202019%20-%20Zusammenfassung_0.pdf)
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) (2019)** Naturgefahrenreport 2019.
- Global CCS Institute (GCCSI) (2019)** Global Status of CCS Report 2019. Targeting Climate Change.
- Global Energy Monitor (2020a)** Boom and Bust 2020. Tracking the Global Coal Plant Pipeline. Report March 2020.
- Global Energy Monitor (2020b)** Boom and Bust 2020. Tracking the Global Coal Plant Pipeline. COVID-19 Update.
- Haustein, K. et al. (2017)** A Real-time Global Warming Index. Scientific Reports 7.
- Hendriks, K. und Singhal, V. R. (2005)** The Effect of Supply Chain Disruptions on Long-term Shareholder Value. Profitability and Share Price Volatility. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <http://supplychainmagazine.fr/TOUTE-INFO/ETUDES/singhal-scm-report.pdf>
- Industrievereinigung Kunststoffverpackungen (2019)** Wie können wir Recyclate aus Kunststoffverpackungen verstärkt im Kreislauf führen?. Stellungnahme der IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen im Rahmen des öffentlichen Fachgesprächs im Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit des Deutschen Bundestags am 10. April 2019. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.bundestag.de/resource/blob/633596/9fbdfd-dad6c3865f86ccae554f5b64f5/19-16-186-B\\_Fachgesprach\\_Recyclate\\_Dr-Isabell-Schmidt-data.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/633596/9fbdfd-dad6c3865f86ccae554f5b64f5/19-16-186-B_Fachgesprach_Recyclate_Dr-Isabell-Schmidt-data.pdf)
- Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) (2011)** Endbericht Energieeffizienz. Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative.
- Institut für Ressourcen-effizienz und Energiestrategien (IREES) (2018)** Prozessemissionen in der deutschen Industrie und ihre Bedeutung für die nationalen Klimaschutzziele. Problemdarstellung und erste Lösungsansätze.
- Institut für Ressourcen-effizienz und Energiestrategien (IREES) (2018)** Prozessemissionen in der deutschen Industrie und ihre Bedeutung für die nationalen Klimaschutzziele – Problemdarstellung und erste Lösungsansätze. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013)** Fifth Assessment Report. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014)** Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018)** Summary for Policymakers. Global Warming of 1.5 Grad C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 Grad C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathway in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty.
- International Energy Agency (IEA) (2019)** World Energy Outlook 2019. IEA. Paris.
- International Energy Agency (IEA) 2017** Digitalization & Energy Report.
- International Monetary Fund (IMF) (2016)** After Paris. Fiscal, Macroeconomic, and Financial Implications of Climate Change. Prepared by Farid, M., Keen, M., Papaioannou, M., Parry, I., Pattillo, C., Ter-Martirosyan, A. & other IMF Staff, January 2016. Im Internet verfügbar (28.04.2020): <https://www.imf.org/external/pubs/ft/sdn/2016/sdn1601.pdf>
- International Ocean Institute (2010)** World Ocean Review 2010. Ein Bericht über den Zustand der Weltmeere.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020)** Measuring the Socio-economics of Transition: Focus on Jobs. International Renewable Energy Agency.
- Ismer, R, Neuhoff, C und Pirlot, A (2020)** Border Carbon Adjustments and Alternative Measures for the EU ETS. An Evaluation. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.743698.de/dp1855.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.743698.de/dp1855.pdf)
- Jones, M.W. et al. (2019)** Global Fire Emissions Buffered by the Production of Pyrogenic Carbon. Nature Geoscience 12., 742–747.
- Kamiya, G (2020)** The Carbon Footprint of Streaming Video: Fact-checking the Headlines. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>
- Kelletat, D. (1999)** Physische Geographie der Meere und Küsten. 2. Auflage. Borntaege. Stuttgart.
- Kleidat, C. P. (2011)** Bedingungen der Akzeptanz von Reform. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Klima Allianz (2019)** Umweltausschuss. Umfassende Kritik an Klimapaket und Klimaschutzgesetz. Pressemitteilung vom 06.11.2019. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.klima-allianz.de/presse/meldung/umweltausschuss-umfassende-kritik-an-klimapaket-und-klimaschutzgesetz>
- Konecny, K. et al. (2016)** Variable Carbon Losses from Recurrent Fires in Drained Tropical Peatlands. Global Change Biology 22, 1469–1480.

- Kraus, H. (2004)** Die Atmosphäre der Erde. 3. Auflage. Springer. Berlin.
- Kriegler E, Hall, J. W., Held, H., Dawson, R. und Schellnhuber, H. J. (2009)** Imprecise Probability Assessment of Tipping Points in the Climate System. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106, 5041–5046.
- Larch, M. und Wanner, J. (2019)** The Consequences of Unilateral Withdrawals from the Paris Agreement. CESifo Working Paper 7804.
- Lehr, U., Flaute, M., Ahmann, L., Nieters, A., Hirschfeld, J., Welling, M., Wolff, C., Gall, A., Kersting, J., Mahlbacher, M. und von Möllendorff, C. (2020)** Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel, Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungskennzahl 3716 48 1000.
- Lenton, T. M. et al. (2019)** Climate Tipping P. Too Risky to Bet Against. Nature 575, 592–595.
- Lorek, S. und Spangenberg, J. (2019)** Energy Sufficiency through Social Innovation in Housing. Energy Policy 126, 287–294.
- Lu, X., McElroy M. B. und Kiviluoma, J. (2009)** Global Potential for Wind-generated Electricity. PNAS 106, 10933–10938.
- Lutz, C., Flaute, M., Lehr, U., Kemmler, A., Kirchner, A., auf der Maur, A., Ziegenhagen, I., Wünsch, M., Koziel, S., Piégsa, A. und Straßburg, S. (2018)** Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende. GWS Research Report 2018/4, Osnabrück, Basel.
- Mack, B. und Hackmann, P. (2008)** Stromsparendes Nutzerverhalten erfolgreich fördern. In: Fischer, Corinna (Hrsg.): Strom sparen im Haushalt. Trends, Einsparpotentiale und neue Instrumente für eine nachhaltige Energiewirtschaft, 108–123.
- Marvel, K., Kravitz, B. und Caldeira K. (2013)** Geophysical Limits to Global Wind Power. Nature Climate Change 3, 118–121.
- Mosbrugger, V., Brasseur, G., Schaller, M. und Stribrny, B. (2014)** Klimawandel und Biodiversität. Folgen für Deutschland. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Mouginot, J. et al. (2019)** Forty-six Years of Greenland Ice Sheet Mass Balance from 1972 to 2018. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 116, 9239–9244.
- MOVECO Project (2019)** MOVECO Closes the Loop! Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://danube-goes-circular.eu>
- Myhre et al. (2007)** Radiative forcing due to stratospheric water vapour from CH4 oxidation, Geophysical Research Letters, doi: 10.1029/2006GL027472.
- NABU (2020)** Chemisches Recycling von Kunststoffen. Potenziale, Risiken und viele offene Fragen. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html>

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019)** Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press.
- National Centers for Environmental Information (2019)** The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). Updated Spring 2019. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2017)** Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. Technical Report. Im Internet verfügbar (26.08.2020): [https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/techrpt83\\_Global\\_and\\_Regional\\_SLR\\_Scenarios\\_for\\_the\\_US\\_final.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/techrpt83_Global_and_Regional_SLR_Scenarios_for_the_US_final.pdf)
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2013)** Bioenergie. Möglichkeiten und Grenzen. Halle (Saale).
- Nelles, D. und Serrer, C. (2018)** Kleine Gase große Wirkung. Der Klimawandel.
- Obschonka, M., Stützer, M., Rentfrow, P. J., Potter, J. und Gosling, S. D. (2017)** Did Strategic Bombing in the Second World War lead to ‚German Angst‘? A Large-scale Empirical Test Across 89 German Cities. European Journal of Personality 31, 234–257.
- Öko-Institut (2017)** Nachhaltiger Konsum. Strategien für eine gesellschaftliche Transformation. Working Paper. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Konsumstrategie.pdf>
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2007)** Climate Change in the European Alps. Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management.
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2017)** Investing in Climate, Investing in Growth, OECD Publishing, Paris. Im Internet verfügbar (28.04.2020): <http://dx.doi.org/10.1787/9789264273528-en>
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2018)** Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences.
- Otto, I. M. et al. (2020)** Social Tipping Dynamics for Stabilizing Earth's Climate by 2050. Proceedings of the National Academy of Science 117, 2354–2365.
- Page et al. (2002)** The Amount of Carbon Released from Peat and Forest Fires in Indonesia during 1997. Nature 420, 61–65.
- Paul, R., Smith, T. und Wu, A. (2019)** Total Energy Model for Connected Devices. Electronic Devices & Networks Annes EDNA.
- Peter M., Guyer M., Füssler J., Bednar-Friedl B., Gabriel B., Schwarze R. und von Unger M. (2020)** Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland. Abschlussbericht, Climate Change 15/2020.

- Pongratz, J. und Caldeira, K. (2012)** Attribution of Atmospheric CO<sub>2</sub> and Temperature Increases to Regions: Importance of Preindustrial Land Use Change. *Environmental Research Letters* 7, 1–8.
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2017)** Kippelemente. Achillesfersen im Erdsystem. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente/kippelemente](http://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente/kippelemente)
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2018)** Beschleunigtes Verwittern von Gestein kann helfen, CO<sub>2</sub> aus der Luft zu holen – ein wenig. Pressemitteilung vom 06.03.2018. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/beschleunigtes-verwittern-von-gestein-kann-helfen-co2-aus-der-luft-zu-holen-ein-wenig>
- Praetorius, B. et al. (2020)** Stellungnahme der ehemaligen Mitglieder der Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung (KWSB). Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/kohle/kohle\\_kommission\\_stellungnahme\\_ehemalige.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/kohle/kohle_kommission_stellungnahme_ehemalige.pdf)
- Prognos (2019)** Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Studie im Auftrag des BMWi. Im Internet verfügbar (23.07.2020): <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transformationspfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf>
- Prognos (2020)** Future Trends in the European Energy Provision, im Auftrag eines internationalen Unternehmens.
- Prognos, GWS, Fraunhofer ISI, Iinas (2020)** Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgenabschätzungen, Kurzbericht Dokumentation Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030, März 2020.
- Prognos, GWS, Fraunhofer ISI, Iinas (tbc)** Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgenabschätzungen 2030 / 2050, im Auftrag des BMWi.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2020)** Klimaneutrales Deutschland, im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität.
- Prognos, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) und Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (2015)** Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Erstellt im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung zur Erarbeitung einer Energieeffizienzstrategie Gebäude.
- Puls, T. und Schaefer, T. (2016)** Klimakonferenz von Paris. Auf die warmen Worte müssen jetzt auch Taten folgen. ifo Schnelldienst 3/2016, 15–18.
- Renn, O. (2008)** Wie aufgeschlossen sind die Deutschen gegenüber der Technik. Ergebnisse der Akzeptanz- und Modernisierungsforschung. Themenheft Forschung 4/2008 der Universität Stuttgart.
- Rignot, E. et al. (2019)** Four Decades of Antarctic Ice Sheet Mass Balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 116, 1095–1103.
- Ritchie, H. und Roser, M. (2020a)** Hunger and Undernourishment. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/hunger-and-overnourishment>
- Ritchie, H. und Roser, M. (2020b)** Sanitation. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/sanitation>

- Ritchie, H. und Roser, M. (2020c)** Clean Water. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/water-access>
- Ritchie, H. und Roser, M. (2020d)** Natural Disasters. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/natural-disasters>
- Ritchie, H. und Roser, M. (2020e)** CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- Ritchie, H., Roser, M., Mispy, J. und Ortiz-Ospina, E. (2018)** Measuring Progress towards the Sustainable Development Goals. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://sdg-tracker.org/>
- Roser, M. und Ortiz-Ospina, E. (2020)** Global Extreme Poverty. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/extreme-poverty>
- Roser, M., Ortiz-Ospina, E. und Ritchie, H. (2020a)** Life Expectancy. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/life-expectancy>
- Roser, M., Ritchie, H. und Dadonaite, B. (2020b)** Child and Infant Mortality. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/child-mortality>
- Rosling, H., Rosling Rönnlund, A. und Rosling, O. (2018)** Factfulness. Ullstein. Berlin.
- Schellnhuber, H. J., Rahmstorf, S. und Winkelmann, R. (2016)** Why the Right Climate Target was Agreed in Paris. *Nature Climate Change* 6, 649–653.
- Schmalz, I. M. (2019)** Akzeptanz von Großprojekten. Eine Betrachtung von Konflikten, Kosten- und Nutzenaspekten und Kommunikation. Wiesbaden: Springer VS.
- Schmidt, T., Schneider, F., Leverenz, D. und Hafner, G. (2019)** Lebensmittelabfälle in Deutschland. Baseline 2015. Thünen-Institut Report 71.
- Schneidmesser, E., Kuik, F., Kutzner, R. und Schmale, J. (2017)** Gefahr für Gesundheit und Klima. Kurzlebige Klimawirksame Schadstoffe, Institute for Advanced Sustainability Studies.
- Schönauer, A.-L. (2017)** Industrieindlichkeit in Deutschland. Eine empirische Analyse aus sozialwissenschaftlicher Perspektive. Wiesbaden: Springer VS.
- Schulz W. F. et al. (2001)** Lexikon Nachhaltiges Wirtschaften. München und Wien: Oldenbourg Verlag.
- Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.) (2011)** Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung - Synthesebericht.
- SFV (2003)** Forsa-Umfrage zur Akzeptanz von Freiflächenanlagen. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <http://www.sfv.de/lokal/emails/wvf/forsafre.htm>

- Siegert, F., Ruecker, G., Hinrichs, A. und Hoffmann, A. A. (2001)** Increased Damage from Fires in Logged Forests during Droughts caused by El Nino. *Nature* 414, 437–440.
- Spektrum (2000)** Kohlenstoffkreislauf. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/kohlenstoffkreislauf/8545>
- Spektrum (2001)** Lexikon der Geographie. Albedo. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/albedo/241>
- Spektrum (2004)** Brennende Regenwälder, Februar 2004.
- Spektrum (2011)** Wolkenbildung im Labor nachgespielt. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/news/wolkenbildung-im-labor-nachgespielt/1121253>
- Spektrum (2018a)** Das Wolkenparadoxon. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/news/das-wolkenparadoxon/1560204>.
- Spektrum (2018b)** Umstrittene Tricks, um den Klimawandel aufzuhalten. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/news/koennen-wir-den-klimawandel-mittels-neuer-technologie-aufhalten-die-co2-aus-der-luft-nehmen/1609658>
- Spektrum (2019a)** Was Katzenvideos das Klima kosten. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/news/das-internet-verbraucht-so-viel-energie-wie-der-flugverkehr/1693692>.
- Spektrum (2019b)** KI ist alles andere als grün. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/news/kuenstliche-intelligenz-verbraucht-fuer-den-lernprozess-unvorstellbar-viel-energie/1660246>.
- Spektrum (2015)** 25 Jahre FCKW-Verbot. Es bleibt ein Loch ohne Boden. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.spektrum.de/news/25-jahre-fckw-verbot-wie-steht-es-um-das-ozonloch/1352353>
- Stark, K, Niedrig, M., Biederbick, W., Merkert, H. und Hacker, J. (2009)** Die Auswirkungen des Klimawandels. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, 1–15. Robert Koch-Institut.
- Statistisches Bundesamt (2020)** Kurzübersicht Abfallbilanz. Zeitreihe. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallbilanz-kurzuebersicht.html;jsessionid=7722A6D3C312535543E-0FAE73AC30374.internet711>
- Straßburger, G. und Rieger, J. (2014)** Partizipation kompakt. Weinheim: Beltz.
- Strefler, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E. und Hartmann, J. (2018)** Potential and Costs of Carbon Dioxide Removal by Enhanced Weathering of Rocks. *Environmental Research Letters* 13, 1–9.

- Strubell, E., Ganesh, A. und McCallum, A. (2019)** Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL), 3645–3650.
- Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2003)** Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Sachstandsbericht. Arbeitsbericht 84.
- The Economist Intelligence Unit (EIU) (2015)** The Cost of Inaction. Recognizing the Value at Risk from Climate Change.
- Tol, R. S. J. (2018)** The Economic Impacts of Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy* 12, 4–25.
- Umweltbundesamt (UBA) (2011)** Geo-Engineering. Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?
- Umweltbundesamt (UBA) (2013a)** Politikszenerarien für den Klimaschutz VI. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4412.pdf>
- Umweltbundesamt (UBA) (2013b)** Potenzial der Windenergie an Land Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land.
- Umweltbundesamt (UBA) (2014)** Häufige Fragen zum Thema Licht (vom 23.07.2014). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/licht/haeufige-fragen-thema-licht#Begriffe>
- Umweltbundesamt (UBA) (2015)** Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Climate Change* 24/2015. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_24\\_2015\\_vulnerabilitaet\\_deutschlands\\_gegenueber\\_dem\\_klimawandel\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf)
- Umweltbundesamt (UBA) (2016)** Konzept zur absoluten Verminderung des Energiebedarfs: Potenziale. Rahmenbedingungen und Instrumente zur Erreichung der Energieverbrauchsziele des Energiekonzepts. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_17\\_2016\\_konzept\\_zur\\_absoluten\\_verminderung\\_des\\_energiebedarfs.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_17_2016_konzept_zur_absoluten_verminderung_des_energiebedarfs.pdf)
- Umweltbundesamt (UBA) (2017)** Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2015. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-2>
- Umweltbundesamt (UBA) (2018)** Energieerzeugung aus Abfällen: Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030, Umweltbundesamt Texte 51/2018. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieerzeugung-aus-abfaellen-stand-potenziale-in>
- Umweltbundesamt (UBA) (2019a)** Projektionsbericht 2019 für Deutschland. Zusammenfassung in der Struktur des Klimaschutzplans. Teilbericht des Projektes Treibhausgas-Projektion. Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerarien IX“). *CLIMATE CHANGE* 33/2019.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019b)** Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE Studie. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-konzepte-fuer-die-klimaschutz/rescue-wege-in-eine-ressourcenschonende#hintergrund>

- Umweltbundesamt (UBA) (2019c)** Monitoringbericht 2019 zur Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019d)** Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019e)** Nutzung von Flüssen. Wasserkraft (18.09.2019). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse/nutzung-belastungen/nutzung-von-fluessen-wasserkraft#wasserkraftnutzung-global>
- Umweltbundesamt (UBA) (2019f)** Der Europäische Emissionshandel. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>
- Umweltbundesamt (UBA) (2019g)** Energiesparende Gebäude (18.11.2019). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebäude#eigentümer>
- Umweltbundesamt (UBA) (2019h)** Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen (25.04.2019). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#emissionen-aus-der-landwirtschaft-im-jahr-2017>
- Umweltbundesamt (UBA) (2019i)** Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018. CLIMATE CHANGE 37/2019.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020a)** Erneuerbare Energien in Zahlen (13.03.2020). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#status-quo>
- Umweltbundesamt (UBA) (2020b)** Erneuerbare Energien in Deutschland 2019. Daten zur Entwicklung im Jahr 2019, Hintergrund März 2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020c)** Indikator: Energieverbrauch für Gebäude (24.02.2020). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch-fuer-gebäude#die-wichtigsten-fakten>
- Umweltbundesamt (UBA) (2020d)** Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren (16.03.2020). Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>
- Umweltbundesamt (UBA) (2020e)** Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990–2018. CLIMATE CHANGE 14/2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020f)** Emissionsübersichten Treibhausgase Emissionsentwicklung 1990–2018. Treibhausgase. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020g)** Regionale Klimafolgen in Bayern. Im Internet verfügbar (28.09.2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland/regionale-klimafolgen-in-bayern#bereits-aufgetretene-und-erwartete-klimaänderungen>.

- Umweltbundesamt (UBA) (2020h)** Hintergrundinformationen Klimawirkung von Videostreaming & Co. Stand: 7. September 2020. Im Internet verfügbar (28.09.2020): <https://publicarea.admiralcloud.com/p/iRg9WDwNJTYyr1D21Bx4mY>
- Umweltbundesamt Österreich (2014)** Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich.
- Umweltbundesamt Österreich (2016)** Update. Ökobilanz alternativer Antriebe.
- Umweltbundesamt Österreich (2018)** Ökobilanz alternativer Antriebe. Fokus Elektrofahrzeuge.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2020)** NDCs as Communicated by Parties. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx>.
- Vanderslott, S., Dadonaitė, B. und Roser, M. (2020)** Vaccination. Im Internet verfügbar (28.05.2020): <https://ourworldindata.org/vaccination>
- vbw / GWS (2020)** Breitbandbedarf der bayerischen Unternehmen 2020 – leitungsgebunden und mobil.
- vbw / Prognos (2019)** TechCheck 2019. Erfolgsfaktor Mensch.
- vbw / Prognos (2020)** Verbesserung der Resilienz der deutschen und bayerischen Wirtschaft.
- vbw Position (2020)** Carbon Border Adjustment. Im Internet verfügbar (28.08.2020): [https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2020/Downloads/vbw\\_Position\\_Carbon\\_Border\\_Adjustment\\_Mechanism\\_Juli\\_2020.pdf](https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2020/Downloads/vbw_Position_Carbon_Border_Adjustment_Mechanism_Juli_2020.pdf)
- Verdon, J. P. und Stork A. L. (2016)** Carbon Capture and Storage, Geomechanics and Induced Seismic Activity. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8, 928–935.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2015)** VDI 7000. Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung bei Industrie- und Infrastrukturprojekten. Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag.
- Weber, T. und Stuchtey, M. (2019)** Deutschland auf dem Weg zur Circular Economy. Erkenntnisse aus europäischen Strategien (Vorstudie). Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circular\\_economy\\_web\\_final.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circular_economy_web_final.pdf)
- Willis, K. J. (2018)** State of the World's Fungi 2018. Report. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlicher Verbraucherschutz und Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2016)** Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Gutachten. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/Klimaschutzgutachten\\_2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/Klimaschutzgutachten_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

- Wolter, M. I., Mönnig, A., Hummel, M., Weber, E., Zika, G., Helmrich, R., Maier, T. und Neuber-Pohl, C. (2016)** Wirtschaft 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Ökonomie. Szenario-Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen. IAB-Forschungsbericht, 13/2016, Nürnberg.
- Wolter, M. I., Mönnig, A., Schneemann, Ch., Weber, E., Zika, G., Helmrich, R., Maier, T. und Winnige, S. (2019)** Wirtschaft 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Ökonomie. Szenario-Rechnungen im Rahmen der fünften Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen; Heft-Nr.: 200, Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), Bonn.
- World Economic Forum (WEF) (2020)** The Global Risks Report 2020. Im Internet verfügbar (28.05.2020): [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risk\\_Report\\_2020.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf)
- Wuppertal Institut et al. (2008)** Sozioökonomische Begleitforschung zur gesellschaftlichen Akzeptanz von Carbon Capture and Storage (CCS) auf nationaler und internationaler Ebene. Endbericht. Gemeinschaftsprojekt des Wuppertal Instituts, des Forschungszentrum Jülich (STE), dem Fraunhofer Institut (ISI) und der BSR Sustainability GmbH, Wuppertal.
- Ziesing, H.-J. (1996)** Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland in der ersten Hälfte der neunziger Jahre. DIW-Wochenbericht 04/1996.
- Zukunftsrat der Bayerischen Wirtschaft (2020)** Resilienz. Schlussfolgerungen aus der Corona-Pandemie. Handlungsempfehlungen.

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1** Aufbau und Struktur der Studie
- Abbildung 2** Energiebilanz der Erde mit Interaktionen innerhalb der Atmosphäre
- Abbildung 3** Schematische Darstellung der Albedo-Wirkung
- Abbildung 4** Beitrag der natürlichen Treibhausgase zum natürlichen Treibhauseffekt
- Abbildung 5** Zusammensetzung trockener Luft in der Atmosphäre
- Abbildung 6** Abweichung der Temperatur vom Durchschnitt der Jahre 1951–1980
- Abbildung 7** Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre, 1750–2017
- Abbildung 8** Haupttreiber des Klimawandels
- Abbildung 9** Beitrag der kumulierten natürlichen und menschlichen Faktoren zur Erklärung der globalen Erwärmung, 1850–2020
- Abbildung 10** Nettoaufnahme anthropogener CO<sub>2</sub>-Emissionen in den drei Reservoirs
- Abbildung 11** Kippelemente und kritische Schwellenwerte im Erdsystem
- Abbildung 12** Erwartete klimatische Veränderungen und Handlungsfelder in den Regionen Deutschlands
- Abbildung 13** Vom Klimawandel betroffene Lebens- und Wirtschaftsbereiche
- Abbildung 14** Schätzwerte zu den gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels
- Abbildung 15** BIP-Effekte durch Anpassung: Komponenten des BIP (real), Jahr 2033, Stromnetz
- Abbildung 16** Entwicklung des jährlichen Schadensaufwands in der Naturgefahren-Sachversicherung seit 1970
- Abbildung 17** Indirekte Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels
- Abbildung 18** Branchen mit dem höchsten Produktionswert in Bayern und der höchsten Importabhängigkeit im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland
- Abbildung 19** Entwicklung der weltweiten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen, 1850–2017
- Abbildung 20** Entwicklung der Anteile an den seit 1750 kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Abbildung 21** Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1990 und 2018 in ausgewählten Ländern
- Abbildung 22** CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Ländern und Regionen, 2018
- Abbildung 23** CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf nach Ländern, 2018
- Abbildung 24** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt und pro Kopf in ausgewählten europäischen Ländern
- Abbildung 25** Reichweite der nationalen CO<sub>2</sub>-Budgets zur Erreichung des 2-Grad-Ziels bei Aufteilung nach Bevölkerungsanteil
- Abbildung 26** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der bedeutendsten Emittenten, nach Indikatoren



<b>Abbildung 27</b>	Anteile der Sektoren an den CO <sub>2</sub> -Emissionen 2018
<b>Abbildung 28</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen der bedeutendsten Emittenten nach Sektoren
<b>Abbildung 29</b>	Veränderungen in den Kohlekraftwerkskapazitäten
<b>Abbildung 30</b>	Anteil der Bundesländer an den CO <sub>2</sub> -Emissionen Deutschlands im Jahr 2016
<b>Abbildung 31</b>	Anteil der Sektoren an den deutschen und bayerischen CO <sub>2</sub> -Emissionen
<b>Abbildung 32</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen in der DDR und Deutschland
<b>Abbildung 33</b>	Zusammenhang zwischen CO <sub>2</sub> -Emissionen und BIP, 2018
<b>Abbildung 34</b>	Zeitliche Entwicklungen des Zusammenhangs zwischen CO <sub>2</sub> -Emissionen und BIP
<b>Abbildung 35</b>	Aufteilung der Wertschöpfung auf Landwirtschaft, Industrie und Dienstleistungen in ausgewählten Ländern
<b>Abbildung 36</b>	Aufteilung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträger
<b>Abbildung 37</b>	17 UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung
<b>Abbildung 38</b>	Standardisierte Reduktionszusagen im Rahmen des Paris-Abkommens
<b>Abbildung 39</b>	Bedeutung des Austritts einzelner Staaten aus dem Paris-Abkommen
<b>Abbildung 40</b>	Preisentwicklung der Emissionszertifikate, 2008–2020
<b>Abbildung 41</b>	Zielarchitektur der internationalen, europäischen und deutschen Klimaziele
<b>Abbildung 42</b>	Die 15 Handlungsfelder der BayKlas und ausgewählte Maßnahmenbeispiele
<b>Abbildung 43</b>	Einsparpotenzial ausgewählter Suffizienz-Maßnahmen im Gebäudebereich bis 2030
<b>Abbildung 44</b>	Einsparpotenzial ausgewählter Suffizienz-Maßnahmen im Verkehrsbereich bis 2030
<b>Abbildung 45</b>	Einsparpotenzial ausgewählter Suffizienz-Maßnahmen im Bereich Ernährung bis 2030
<b>Abbildung 46</b>	Mögliche Chancen und Herausforderungen durch Änderungen von Konsummustern
<b>Abbildung 47</b>	Vereinfachte schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft
<b>Abbildung 48</b>	Schematische Darstellung der Vernetzung von Stromerzeugung und Stromverbrauch durch intelligente Steuerung
<b>Abbildung 49</b>	Anteile erneuerbarer Energien am Energieverbrauch
<b>Abbildung 50</b>	Wirkung des Übergangs zu einer Wirtschaft 4.0 auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Branchen für das Jahr 2035 – Abweichungen zu einer Situation ohne Übergang

<b>Abbildung 51</b>	Ablauf von CO <sub>2</sub> -Speicherung und -Nutzung
<b>Abbildung 52</b>	Schematische Darstellung der Verfahren zur Abscheidung von CO <sub>2</sub> an Punktquellen
<b>Abbildung 53</b>	Schematische Darstellung von CCS und CCU
<b>Abbildung 54</b>	Schematische Übersicht zu den Negativen Emissionstechnologien
<b>Abbildung 55</b>	Absorptionsbasierter DACCS-Prozess mit Natriumhydroxid
<b>Abbildung 56</b>	Power-to-X: Umwandlung elektrischer Energie in Brenn-, Kraft- und Grundstoffe
<b>Abbildung 57</b>	Mögliche Stufen der Beteiligung
<b>Abbildung 58</b>	Überblick über die Ausgestaltung der klimapolitischen Szenarien
<b>Abbildung 59</b>	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in den Szenarien bis zum Jahr 2030 gegenüber 2018
<b>Abbildung 60</b>	CO <sub>2</sub> -Preise in konstanten USD je Tonne im Jahr 2030
<b>Abbildung 61</b>	Deutsche Mehrinvestitionen im Jahr 2030 zur Erreichung des jeweiligen Treibhausgas-Ziels
<b>Abbildung 62</b>	Ausmaß des Einsatzes von Technologien aus acht zentralen Bereichen in den Szenarien
<b>Abbildung 63</b>	Signifikanz des Beitrags der Technologiebereiche im Zeitverlauf in den Szenarien
<b>Abbildung 64</b>	Abweichungen des BIP im Jahr 2030 vom Szenario „Business as Usual“
<b>Abbildung 65</b>	Abweichungen der Bruttowertschöpfung gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – reale Bruttowertschöpfung (2030)
<b>Abbildung 66</b>	Abweichungen der Beschäftigung in den Szenarien gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – 2030
<b>Abbildung 67</b>	Veränderung der direkten und indirekten Bruttowertschöpfung in den Szenarien gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2030
<b>Abbildung 68</b>	Veränderung der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Intensitäten in den Szenarien gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2030
<b>Abbildung 69</b>	BIP, Beschäftigung und Preisindex der Lebenshaltung – Abweichungen im EWS vom KFS
<b>Abbildung 70</b>	Beschäftigung nach Sektoren – Abweichungen im EWS vom KFS
<b>Abbildung 71</b>	BIP-Effekte des Klimawandels und Klimaschutzes (grobe Abschätzung)
<b>Abbildung 72</b>	Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Business as Usual“ in EJ
<b>Abbildung 73</b>	Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq. im Szenario „Business as Usual“

- Abbildung 74** Bevölkerungsentwicklung im internationalen Vergleich im Szenario „Business as Usual“ – durchschnittliche jährliche Wachstumsraten
- Abbildung 75** Wirtschaftswachstum im internationalen Vergleich – „BaU“ – durchschnittliche jährliche Wachstumsraten
- Abbildung 76** Entwicklung des BIP und seiner Komponenten in Deutschland – „BaU“ – durchschnittliche jährliche Wachstumsraten
- Abbildung 77** Entwicklung der Wirtschaftsstruktur in Deutschland – „BaU“
- Abbildung 78** Energieintensive Industrien – Bruttoproduktion und Beschäftigung – „BaU“ (Kugelgröße entspricht Wertschöpfung in 2040)
- Abbildung 79** Fokusbranchen der Industrie – Bruttoproduktion und Beschäftigung – „BaU“ (Kugelgröße entspricht Wertschöpfung in 2040)
- Abbildung 80** Ausgewählte Dienstleistungsbranchen – Bruttoproduktion und Beschäftigung – „BaU“ – (Kugelgröße entspricht Wertschöpfung in 2040)
- Abbildung 81** Zeitliche Entwicklung der BWS im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in Mio. USD
- Abbildung 82** Zeitliche Entwicklung der Beschäftigung im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in 1.000 Beschäftigten
- Abbildung 83** Wirtschaftsstruktur Bayerns und Deutschlands gemessen an der BWS, nach Branchenclustern; anteilig in Prozent an der Gesamtwirtschaft, 2015
- Abbildung 84** Wirtschaftsstruktur Bayerns und Deutschlands gemessen an der Beschäftigung, nach Branchenclustern; anteilig in Prozent an der Gesamtwirtschaft, 2015
- Abbildung 85** Zeitliche Entwicklung der nominalen BWS in Bayern im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in Mio. USD
- Abbildung 86** Zeitliche Entwicklung der Beschäftigung in Bayern im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in 1.000 Beschäftigten
- Abbildung 87** Rückgang der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Business as Usual“ zwischen 2015 und 2030; in Tonnen CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output
- Abbildung 88** Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Business as Usual“ zwischen 2015 und 2030
- Abbildung 89** Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“ zwischen 2015 und 2030
- Abbildung 90** Zeitliche Entwicklung der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“ in Bayern nach Branchenclustern
- Abbildung 91** Zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern
- Abbildung 92** Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ in EJ
- Abbildung 93** Entwicklung des Stromerzeugungskapazitäten im Szenario „Einheitliches Vorgehen“

- Abbildung 94** Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq. im Szenario „Einheitliches Vorgehen“
- Abbildung 95** Abweichung des BIP gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
- Abbildung 96** Abweichungen des BIP und seiner Komponenten in Deutschland im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
- Abbildung 97** Abweichungen der Bruttowertschöpfung in konstanten Preisen in Deutschland im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
- Abbildung 98** Abweichungen der Bruttowertschöpfung in konstanten Preisen im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
- Abbildung 99** Abweichungen der Güterpreise im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
- Abbildung 100** Abweichungen der Beschäftigung im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
- Abbildung 101** Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD
- Abbildung 102** Veränderungen der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD
- Abbildung 103** Veränderungen der direkten und indirekten BWS in Bayern im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2040
- Abbildung 104** Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensitäten im Szenario „Einheitliches Vorgehen“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Tonnen CO<sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output
- Abbildung 105** Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Intensitäten in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
- Abbildung 106** Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
- Abbildung 107** Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ nach Branchenclustern (2030 und 2040)
- Abbildung 108** Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Europa geht voran“ in EJ
- Abbildung 109** Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq. im Szenario „Europa geht voran“
- Abbildung 110** BIP im internationalen Vergleich – Abweichungen im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
- Abbildung 111** Abweichungen im Szenario "Europa geht voran" gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – reale Bruttowertschöpfung (2030)
- Abbildung 112** Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD

<b>Abbildung 113</b>	Veränderungen von BPW, BWS und Beschäftigung in Bayern im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (2030 und 2040)
<b>Abbildung 114</b>	Veränderungen der direkten und indirekten BWS in Bayern im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem „Szenario „Business as Usual“, 2040, in Mio. USD, nominal
<b>Abbildung 115</b>	Rückgang der CO <sub>2</sub> -Intensitäten im Szenario „Europa geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Tonnen CO <sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output
<b>Abbildung 116</b>	Vergleich der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Intensitäten in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
<b>Abbildung 117</b>	Vergleich der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
<b>Abbildung 118</b>	Vergleich der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ nach Branchenclustern (2030 und 2040)
<b>Abbildung 119</b>	Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Deutschland geht voran“ in EJ
<b>Abbildung 120</b>	Entwicklung der Treibhausgas-Emission in Deutschland in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq. nach Sektoren im Szenario „Deutschland geht voran“
<b>Abbildung 121</b>	BIP im internationalen Vergleich – Abweichungen im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
<b>Abbildung 122</b>	Abweichungen des BIP und seiner Komponenten in Deutschland im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“
<b>Abbildung 123</b>	Abweichungen im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – reale Bruttowertschöpfung (2030)
<b>Abbildung 124</b>	Abweichungen im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ – Beschäftigung (2030)
<b>Abbildung 125</b>	Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS) im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. USD
<b>Abbildung 126</b>	Veränderungen von BPW, BWS und Beschäftigung in Bayern im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (2030 und 2040)
<b>Abbildung 127</b>	Veränderungen der direkten und indirekten BWS in Bayern im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“, 2040, in Mio. USD, nominal
<b>Abbildung 128</b>	Rückgang der CO <sub>2</sub> -Intensitäten im Szenario „Deutschland geht voran“ gegenüber dem Szenario „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Tonnen CO <sub>2</sub> je 1 Mio. USD Output
<b>Abbildung 129</b>	Vergleich der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Intensitäten in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
<b>Abbildung 130</b>	Vergleich der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
<b>Abbildung 131</b>	Vergleich der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ nach Branchenclustern (2030 und 2040)
<b>Abbildung 132</b>	Clusterung der Klima-Technologien nach Sektoren der Treibhausgas-Bilanz

<b>Abbildung 133</b>	Cluster-Struktur Bayerns
<b>Abbildung 134</b>	Position Bayerns im Cluster Industrie
<b>Abbildung 135</b>	Position Bayerns im Cluster Verkehr
<b>Abbildung 136</b>	Position Bayerns im Cluster Private Haushalte und Dienstleistungssektor
<b>Abbildung 137</b>	Position Bayerns im Cluster Erneuerbare Energien
<b>Abbildung 138</b>	Position Bayerns im Cluster Infrastruktur / Sektorkopplung / Flexibilität
<b>Abbildung 139</b>	Position Bayerns im Cluster Synthetische Energieträger / Wasserstoff
<b>Abbildung 140</b>	Position Bayerns im Cluster Negativ-Emissionstechnologien
<b>Abbildung 141</b>	Position Bayerns im Cluster Landwirtschaft / Landnutzung / Forstwirtschaft
<b>Abbildung 142</b>	Position Bayerns im Cluster Anpassungstechnologien
<b>Abbildung 143</b>	Position Bayerns im Cluster Digital getriebene Technologien
<b>Abbildung 144</b>	Internationaler Vergleich des Clusters Industrie
<b>Abbildung 145</b>	Europäischer Vergleich des Clusters Industrie
<b>Abbildung 146</b>	Internationaler Vergleich des Clusters Verkehr
<b>Abbildung 147</b>	Europäischer Vergleich des Clusters Verkehr
<b>Abbildung 148</b>	Globale Positionierung der bayerischen Leuchtturmtechnologien
<b>Abbildung 149</b>	Übersicht der Marktreife und Verfügbarkeit der Technologien
<b>Abbildung 150</b>	Digitalisierungsgrad der Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien, in Prozent, 2019
<b>Abbildung 151</b>	Fortgeschrittene Digitalisierung in den bayerischen Leuchtturmtechnologien
<b>Abbildung 152</b>	Digitalisierungsstruktur in vernetzter Fabrikation
<b>Abbildung 153</b>	Digitalisierungsstruktur in der Technologie Verkehrsleitsysteme und vernetzter Verkehr
<b>Abbildung 154</b>	Digitalisierungsstruktur in der Technologie Intelligente Stromnetze
<b>Abbildung 155</b>	Digitale Sensoren in den bayerischen Leuchtturmtechnologien
<b>Abbildung 156</b>	Prozessautomatisierung in den bayerischen Leuchtturmtechnologien
<b>Abbildung 157</b>	Cloud Computing in den bayerischen Leuchtturmtechnologien
<b>Abbildung 158</b>	Künstliche Intelligenz in den bayerischen Leuchtturmtechnologien
<b>Abbildung 159</b>	Vorgehensweise bei der Zuordnung von Technologien zu Branchen, Wertschöpfung und Beschäftigung

- Abbildung 160** Wasserstoff-Direktproduktion – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 161** Neuartige und verbesserte Energiespeicher – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 162** Künstliche Intelligenz – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 163** Neuartige Dämmstoffe – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 164** Organische Photovoltaik – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 165** Schwimmende Windkraftanlagen – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 166** Kernfusion – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 167** Fleischersatz – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 168** Emissionsarme Reisproduktion – Anteile ausgewählter Länder und Ländergruppen, Weltklassepatente 2019
- Abbildung 169** Zusammenfassung zentraler Erkenntnisse
- Abbildung 170** Die zehn bayerischen Zukunftsfelder

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen in den bedeutendsten Emittentenländern 2018
<b>Tabelle 2</b>	Zugesagte Klimaschutzbeiträge (NDCs) bedeutender Emittenten
<b>Tabelle 3</b>	Sektorale Emissionsziele bis 2030 in Deutschland
<b>Tabelle 4</b>	Vergleich Sektorziele KSG und Szenario mit Klimaschutzplan
<b>Tabelle 5</b>	Klimaschutzmaßnahmen und deren Beitrag zur Treibhausgas-Reduktion, nach Sektoren (nicht abschließend)
<b>Tabelle 6</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Intensitäten im Szenario „Business as Usual“ und in den Abweichungsszenarien, 2030, in Tonnen CO <sub>2</sub> je 1 Mio. USD
<b>Tabelle 7</b>	Wert des CO <sub>2</sub> auf den deutschen Importen im Jahr 2030 in Mio. USD
<b>Tabelle 8</b>	Zusammensetzung der Branchencluster (mit Kurzbezeichnung)
<b>Tabelle 9</b>	Zeitliche Entwicklung der BWS im Szenario „Business as Usual“ nach Branchenclustern; in Mio. USD
<b>Tabelle 10</b>	Wirtschaftliche Kennzahlen, Bayern und Deutschland, 2015
<b>Tabelle 11</b>	Entwicklung der Anteile der Branchencluster an der Gesamtwirtschaft, Bayern und Deutschland
<b>Tabelle 12</b>	Zeitliche Entwicklung der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Intensitäten und CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „Business as Usual“
<b>Tabelle 13</b>	Zeitliche Entwicklung der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „Business as Usual“ in Bayern, in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub>
<b>Tabelle 14</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Intensitäten in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
<b>Tabelle 15</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“
<b>Tabelle 16</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Einheitliches Vorgehen“ und „Business as Usual“ (2030 und 2040); in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub>
<b>Tabelle 17</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Intensitäten in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
<b>Tabelle 18</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub>
<b>Tabelle 19</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Europa geht voran“ und „Business as Usual“ (2030 und 2040); in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub>
<b>Tabelle 20</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Intensitäten in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030)
<b>Tabelle 21</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (jeweils 2030); in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub>
<b>Tabelle 22</b>	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien „Deutschland geht voran“ und „Business as Usual“ (2030 und 2040); in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub>

<b>Tabelle 23</b>	Überblick über die 62 identifizierten Klimaschutz- und Nachhaltigkeitstechnologien, alphabetisch sortiert
<b>Tabelle 24</b>	Bayerns Position in den Clustern als Anteil an Welt, EU und Deutschland, Anteile an den Weltklassepatenten je Cluster, 2019
<b>Tabelle 25</b>	Bayerns Position in den Leuchtturmtechnologien als Anteil an den Weltklassepatenten der Welt, EU und Deutschland, 2019
<b>Tabelle 26</b>	Überblick über die 23 verwendeten Digitalisierungstechnologien und Technologiegruppen, alphabetisch sortiert

## Kastenverzeichnis

<b>Kasten 1</b>	Verbesserung der weltweiten Lage in vielen Bereichen
<b>Kasten 2</b>	Klimawirkung von Wolken und deren Interaktion mit Aerosolen
<b>Kasten 3</b>	Industrialisierung als Referenzzeitpunkt zur Bestimmung des menschlichen Einflusses
<b>Kasten 4</b>	Zukünftige klimatische Veränderungen in Bayern
<b>Kasten 5</b>	Auswirkungen im Finanzsektor
<b>Kasten 6</b>	Ökonomische Effekte des Klimawandels und von Klimawandelanpassung in Deutschland
<b>Kasten 7</b>	EDGAR-Datensatz und die Bedeutung von (nicht erfassten) Waldbränden
<b>Kasten 8</b>	Rolle der deutschen Einheit bei der Entwicklung der Emissionen
<b>Kasten 9</b>	Wohlstandsindikatoren
<b>Kasten 10</b>	Möglichkeiten Deutschlands und Bayerns den Klimawandel zu beeinflussen
<b>Kasten 11</b>	Ziele der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung
<b>Kasten 12</b>	Paris Abkommen: Zusagen und Folgen möglicher Austritte
<b>Kasten 13</b>	Grundzüge des Europäischen Emissionshandelssystems
<b>Kasten 14</b>	Auswirkungen der Corona-Krise auf die deutsche Energiebilanz und die Erfüllung der Klimaschutzziele
<b>Kasten 15</b>	Scheitern von Klimaanpassungsmaßnahmen als zentrales Risiko
<b>Kasten 16</b>	Prinzipien und Zielkonflikte staatlicher Anpassungskonzepte
<b>Kasten 17</b>	Die vier Arten klimabedingter Risiken in der Lieferkette
<b>Kasten 18</b>	Chemisches Recycling von Kunststoffen
<b>Kasten 19</b>	Notwendigkeit Netzausbau
<b>Kasten 20</b>	Wirtschaft 4.0 / Digitalisierung
<b>Kasten 21</b>	Öko- bzw. Umweltbilanz unterschiedlicher Pkw-Antriebe
<b>Kasten 22</b>	Verfahren zur Abscheidung von CO <sub>2</sub> an Punktquellen
<b>Kasten 23</b>	DACCS-Verfahren
<b>Kasten 24</b>	Speichermöglichkeiten von Wasserstoff
<b>Kasten 25</b>	Aktuelle Szenarienarbeit „Klimaneutrales Deutschland“
<b>Kasten 26</b>	Carbon Border Adjustment (CBA)
<b>Kasten 27</b>	Ökonomische Effekte der Energiewende (Gebäude, Mobilität, erneuerbare Energien)

<b>Kasten 28</b>	Ökonomische Modelle
<b>Kasten 29</b>	Messung der Patentqualität
<b>Kasten 30</b>	Berechnung des Digitalisierungsgrads
<b>Kasten 31</b>	Alle Informationen online abrufbar
<b>Kasten 32</b>	Digitalisierung und Klimaschutz

## **Ansprechpartner**

Christine Völzow  
Geschäftsführerin und  
Leiterin der Abteilung  
Wirtschaftspolitik

T 089-551 78-251  
christine.voelzow@vbw-bayern.de

Dr. Christina Hans  
Referentin Zukunftsrat,  
Abteilung Wirtschaftspolitik

T 089-551 78-135  
christina.hans@vbw-bayern.de

## **prognos**

Eine Studie im Auftrag der vbw  
erstellt von Prognos mit Beiträgen von EconSight, GWS und TwinEconomics

Autoren Prognos: Dr. Heiko Burret, Dr. Almut Kirchner, Dr. Micheal Schlesinger

Weitere Beteiligte: Hans Dambeck, Marieke Eckert, Lukas Eiserbeck, Hanno Falkenberg, Lukas Haberland, Hanne Hagedorn, Eva Klotz, Sven Kreidelmeyer, Jannis Lambert, Jan Limbers, Sebastian Lübbers, Dominik Rau, Sina Scheffer, Hendrik Schramm, Samuel Straßburg, Christoph Thormeyer, Taoufik Touhtouh

Autoren EconSight: Kai Gramke, Dr. Jochen Spuck:  
Teil V Kapitel 01.1, 01.2, 01.3, 01.4, 01.5, 01.6 (nicht Kasten 32) und 01.7  
(zusammen mit TwinEconomics).

Autoren GWS: Dr. Christian Lutz, Maximilian Banning, Dr. Ulrike Lehr, Dr. Marc Ingo Wolter:  
Kästen 6, 20, 26 und 27 sowie Teil IV Kapitel 01 (zusammen mit Prognos und TwinEconomics),  
02.1, 02.2 (zusammen mit Prognos und TwinEconomics), 02.3 (zusammen mit TwinEconomics),  
03 (zusammen mit Prognos) sowie in Kapitel 04 Seiten 189–195, 219–223, 238–241 und 256–260.

Autoren TwinEconomics: Dr. Roman Bertenrath, Manuel Fritsch, Dr. Anna Kleissner, Dr. Karl Lichtblau, Dr. Philipp Schade, Benita Zink: Teil IV Kapitel 01 (zusammen mit Prognos und GWS), 02.2 (zusammen mit Prognos und GWS), 02.3 (zusammen mit GWS) sowie in Kapitel 04 Seiten 196–211, 223–233, 241–251, 260–269 und in Teil V Kapitel 01.7 (zusammen mit EconSight).

## **Impressum**

Alle Angaben dieser Publikation beziehen sich ohne jede Diskriminierungsabsicht  
grundsätzlich auf alle Geschlechter.

### **Herausgeber**

**vbw**  
Vereinigung der Bayerischen  
Wirtschaft e. V.

Max-Joseph-Straße 5  
80333 München

www.vbw-bayern.de

### **Umsetzung**

gr\_consult gmbh  
vbw@gr-consult.de

### **Druck**

Druck & Medien Schreiber  
Oberhaching

**vbw**

Vereinigung der Bayerischen  
Wirtschaft e. V.

Max-Joseph-Straße 5  
80333 München

T 089-551 78-100  
F 089-551 78-111  
info@vbw-bayern.de

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