

Projektbericht | März 2025

Klimaneutrale Industrie im Jahr 2045

Zielbild, zentrale Voraussetzungen und
gesellschaftliche Implikationen

Studie im Auftrag des
NABU – Naturschutzbund Deutschland e. V.

Herausgeberin:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechperson:

Dr. Sascha Samadi
Zukünftige Energie- und Industriesysteme
sascha.samadi@wupperinst.org
Tel. +49 202 2492-107

Autor*innen:

Alexander Jülich
Dr. Sascha Samadi
Ylva Kloo
Svenja Theisen
Dr. Georg Holtz
Dr. Christoph Sievering

Aktualisierte Berichtsfassung vom 14.03.2025 mit einer Korrektur in Abb. 8-4.

Dieser Bericht ist Ergebnis des Projekts „Klimaneutrale Industrie im Jahr 2045 – Zielbild, zentrale Voraussetzungen und gesellschaftliche Implikationen“ (KLIND 2045), das im Auftrag des NABU durchgeführt wurde. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Wuppertal Institut (2025). Klimaneutrale Industrie im Jahr 2045 – Zielbild, zentrale Voraussetzungen und gesellschaftliche Implikationen.

Projektlaufzeit: April 2024 – Februar 2025

Der Text dieser Publikation steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).

Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	4
Tabellenverzeichnis	5
Verzeichnis der Info-Kästen	5
Abbildungsverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
1 Einleitung	9
2 Deutschlands Klimaziele und Rolle des Industriesektors	10
3 Zielvision einer klimaneutralen Industrie in Deutschland im Jahr 2045	13
3.1 Vision für den gesamten Industriesektor	13
3.2 Zielvision für die Eisen- und Stahlindustrie	17
3.3 Zielvision für die chemische Industrie	20
3.4 Zielvision für die Zementindustrie	26
4 Beiträge der Industrie-Transformation zu zentralen gesellschaftlichen Zielen	29
4.1 Beitrag zum Erreichen der deutschen und globalen Klimaziele	29
4.2 Sicherung von Beschäftigung und Wertschöpfung	30
4.3 Stärkung der Resilienz der deutschen Wirtschaft	30
4.4 Natur- und Landschaftsschutz	31
5 Strukturwandel der Industrie im Zuge der Transformation	33
5.1 Wachsende Bedeutung der Kreislaufwirtschaft	33
5.2 Bedeutungsgewinn von Transformationstechnologien	37
5.3 Mögliche Veränderungen der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie infolge des Renewables-Pull-Effekts	40
6 Strategien und Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation	44
6.1 Zentrale Strategien für eine erfolgreiche Industrie-Transformation	44
6.2 Wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Industrie-Transformation	46
7 Schlussfolgerungen	56
8 Exkurs: Gegenwärtige Bedeutung des Industriesektors	60
8.1 Bedeutung des Industriesektors für die deutsche Wirtschaft	60
8.2 Energie- und Rohstoff-Bedarf der deutschen Industrie	62
8.3 Anteil der Industrie an den deutschen Treibhausgasemissionen	66
8.4 Fokus auf Branchen mit besonders hohen CO ₂ -Emissionen	67
8.4.1 Eisen- und Stahlindustrie	69
8.4.2 Chemische Industrie	71
8.4.3 Zementindustrie	74
Glossar	76
Literaturverzeichnis	80

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
Abb.	Abbildung
BECCS	CO ₂ -Abscheidung und Speicherung (CCS) mit Biomasse
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BWS	Bruttowertschöpfung
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
CCU	Carbon Capture and Utilization (CO ₂ -Abscheidung und -Nutzung)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
EEV	Endenergieverbrauch
EU	Europäische Union
GW	Gigawatt
HVC	High-Value-Chemicals (hochwertige Chemikalien)
iCCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (CCS) an Industrieanlagen
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
km	Kilometer
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
Mio.	Million
Mrd.	Milliarde
Mt	Megatonne
NABU	Naturschutzbund Deutschland
Pkw	Personenkraftwagen
t	Tonne
Tab.	Tabelle
THG	Treibhausgasemissionen
TWh	Terawattstunde

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Historische Treibhausgasemissionen und Minderungsziele nach Bundes-Klimaschutzgesetz für 2030, 2040 und 2045 (absolute Werte in Mio. t CO ₂ -Äq.)- 10
----------	--

Verzeichnis der Info-Kästen

Info-Kasten 3-1	Mechanisches Recycling und chemisches Recycling-----	22
Info-Kasten 5-1	Definition „Kreislaufwirtschaft“ -----	33
Info-Kasten 6-1	Suffizienz -----	53
Info-Kasten 8-1	Definition „Industrie“ -----	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Projektion der Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie bis 2050 im „Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario“ (MWMS 2024) -----	11
Abb. 2-2	Minderung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor gegenüber 1990 im Jahr 2023 und nach verschiedenen Projektionen bzw. Szenarien im Jahr 2045--	12
Abb. 3-1	Rohstoffbasis für die Kunststoffproduktion in Deutschland im Szenario KND-Umsetzung -----	23
Abb. 3-2	Minderung des Zementklinkerbedarfs bis 2045 durch Maßnahmen im Bau (links) und Optimierung des Bindemittelportfolios (rechts), Szenario KND-Umsetzung--	27
Abb. 5-1	Verwertung von Kunststoffabfällen in der Europäischen Union im Jahr 2020 und nach dem „High Circularity Scenario“ im Jahr 2050 -----	36
Abb. 5-2	Mögliche Verlagerung industrieller Produktion („Green Relocation“) infolge steigender CO ₂ -Preise bei unterschiedlichen Erneuerbaren-Bedingungen-----	41
Abb. 6-1	Strategien zur Erreichung von Klimaneutralität im Industriesektor-----	44
Abb. 6-2	Strombedarf der Industrie durch endenergetischen Stromverbrauch und (indirekt) durch den Bedarf an grünem Wasserstoff im Jahr 2023 und nach drei Szenarien im Jahr 2045 -----	47
Abb. 6-3	Jährlicher Brutto-Zubau der Photovoltaik und der Windenergie an Land in Deutschland von 2017 bis 2024 sowie nach Zielen der Ampel-Regierung in den Jahren 2025 und 2030-----	49
Abb. 6-4	Vorschläge von Agora Energiewende für einen Mix zentraler Politikinstrumente zur Unterstützung der Industrie-Transformation -----	52
Abb. 8-1	Verteilung der Bruttowertschöpfung (BWS, links) und Anzahl der Erwerbstätigen (rechts) in Deutschland nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2023 -----	61
Abb. 8-2	Entwicklung der preisbereinigten Bruttowertschöpfung (BWS) und der Anzahl der Erwerbstätigen im verarbeitenden Gewerbe von 2000 bis 2023 -----	62
Abb. 8-3	Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023 nach Sektoren-----	63
Abb. 8-4	Industrieller Energieverbrauch (ohne stofflichen Verbrauch) nach Branchen im Jahr 2022 (in Petajoule)-----	64
Abb. 8-5	Endenergieverbrauch (EEV) der Industrie nach Energieträgern, 2023 -----	65
Abb. 8-6	Endenergieverbrauch (EEV) der Industrie nach Anwendungsbereichen, 2023 ---	65
Abb. 8-7	Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2023 in sektoraler Abgrenzung nach Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)-----	66
Abb. 8-8	Veränderung der Treibhausgasemissionen aller Sektoren und der Industrie in Deutschland bis 2023 und Zielpfade ab 2024 nach Bundes-Klimaschutzgesetz--	67
Abb. 8-9	Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2022 und Bedeutung der Industrie sowie einzelner Branchen der Grundstoffindustrie -----	68
Abb. 8-10	Produktionsentwicklung in energieintensiven Industriezweigen im Vergleich zur Gesamtindustrie von Januar 2015 bis Dezember 2024-----	69
Abb. 8-11	Entwicklung der Rohstahlproduktion nach Verfahrensart in Deutschland von 2000 bis 2023 -----	70
Abb. 8-12	Prozessschritte und CO ₂ -Emissionen der Rohstahlproduktion (konventionelle Hochofenroute)-----	70
Abb. 8-13	Prozessschritte und CO ₂ -Emissionen der Kunststoff-Wertschöpfungskette-----	72
Abb. 8-14	Prozessschritte und CO ₂ -Emissionen der Ammoniaksynthese als Teil der Dünger-Wertschöpfungskette -----	73
Abb. 8-15	Entwicklung der Zementproduktion in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2023	74
Abb. 8-16	Prozessschritte und direkte CO ₂ -Emissionen der Zementproduktion -----	75

Zusammenfassung

Der Industriesektor stellt eine wichtige Säule der deutschen Wirtschaft dar. Über 7 Millionen Erwerbstätige und damit rund ein Sechstel aller Erwerbstätigen sind gegenwärtig in Deutschland in der Industrie im engeren Sinne (im „verarbeitenden Gewerbe“) beschäftigt. Die Industrie ist in Deutschland für rund 20 % der gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung verantwortlich, ein deutlich höherer Anteil als in vielen anderen europäischen Ländern. Damit sichert der Industriesektor in Deutschland in großem Umfang Beschäftigung und Wohlstand. Da die Industrie hierzulande zudem in großer Breite vertreten ist – von der Grundstoffindustrie bis zur weiterverarbeitenden Industrie – stärkt sie die strategische Unabhängigkeit Deutschlands. Gleichzeitig profitiert die deutsche Industrie vom europäischen Binnenmarkt und einer intensiven europäischen Zusammenarbeit bei Energie- und Transportinfrastrukturen sowie Wertschöpfungsketten.

Gegenwärtig steht die deutsche Industrie vor großen Herausforderungen. Die im Vergleich zu anderen Weltregionen in den letzten Jahren stärker gestiegenen Preise für Erdgas und Strom stellen insbesondere für die energieintensiven Branchen eine Belastung dar. Wachsende internationale Konkurrenz und zunehmende Handelsbeschränkungen sorgen – auch aufgrund der hohen Exportorientierung der deutschen Industrie – für zusätzliche Schwierigkeiten. Während die Politik diese und weitere dringende Herausforderungen (wie Fachkräftemangel und teils überbordende Bürokratie) adressieren sollte, darf sie gleichzeitig nicht die Notwendigkeit der Transformation der Industrie hin zu Klimaneutralität aus den Augen verlieren.

Knapp ein Viertel der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen entstehen derzeit im Industriesektor. Diese Emissionen müssen in den nächsten Jahren deutlich und kontinuierlich reduziert werden. Das ist zum einen notwendig, damit Deutschland seine selbst gesetzten sowie international zugesagten Klimaziele erreichen kann, zum anderen aber auch, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie angesichts absehbar steigender CO₂-Preise und einer wachsenden Bedeutung grüner Produkte auf den Weltmärkten dauerhaft erhalten zu können.

Und es lohnt sich, die Transformation auch einmal von ihrem Zielpunkt aus zu betrachten: Das einstige Image der „dreckigen“ Industrie wird im Falle einer erfolgreichen Transformation im Jahr 2045 endgültig der Vergangenheit angehören – und das nicht nur, weil dann netto keine Treibhausgase mehr ausgestoßen werden. Auch die lokalen Schadstoffe werden nahezu auf null reduziert. Statt Erdgas, Öl und Kohle wird die Industrie 2045 vor allem Strom verwenden. Rund drei Viertel des Endenergiebedarfs könnten zukünftig durch diesen Energieträger gedeckt werden. Ein großer Teil des restlichen Endenergiebedarfs kann 2045 – ebenfalls emissionsfrei – durch Wasserstoff gedeckt werden.

Die mit der Umstellung des Energiemixes einhergehenden Fortschritte bei der Luftqualität werden bei Beschäftigten und bei Menschen, die in der Nähe von Industrieanlagen wohnen, für deutliche Verbesserungen des Wohlbefindens und der Gesundheit sorgen. So dürften unter anderem Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen im Jahr 2045 seltener auftreten, da durch die Vermeidung der Verbrennung fossiler Brennstoffe die Menge der Luftschadstoffe – wie Schwefeldioxid, Stickoxide und Feinstaub – deutlich reduziert werden kann.

Die erheblichen Potenziale zur Kreislaufführung von Grundstoffen könnten bis 2045 dank Verbesserungen im Produktdesign („Design-for-Recycling“) sowie bei der Trennung und Aufbereitung von Altmaterialien weitgehend erschlossen werden. So könnte 2045 der Großteil der entsorgten Kunststoffe entweder mechanisch oder chemisch recycelt werden. Verbesserungen der Materialeffizienz in der Produktion, eine längere Nutzung von Produkten (unterstützt durch eine stärkere Fokussierung auf die Reparatur defekter Geräte) sowie ein intensiveres Teilen von Produkten (zum Beispiel in Form von Carsharing) könnten zusätzlich den Bedarf an ressourcen- und energieintensiver Primärproduktion von Grundstoffen reduzieren. Gelingt es, diese Fortschritte in Richtung Kreislaufwirtschaft zu realisieren, wird nicht nur Energie eingespart, sondern Umwelt und Natur in Deutschland sowie im Ausland werden durch eine Verminderung des benötigten Rohstoffabbaus – der stets mit ökologischen Beeinträchtigungen einhergeht – geschont.

Durch den Erhalt einer wesentlichen industriellen Basis als Ergänzung zur Dienstleistungsökonomie können zukünftig Arbeitsplätze in traditionellen Industrieregionen erhalten bleiben und die Resilienz der deutschen Wirtschaft gestärkt werden.

Diese positive Vision einer klimaneutralen Industrie kann Wirklichkeit werden, wenn die deutsche und europäische Politik in den nächsten Jahren stabile und förderliche Rahmenbedingungen setzt, die die erheblichen Investitionen in klimaneutrale Anlagen und Infrastrukturen für Unternehmen wirtschaftlich attraktiv machen. Dafür sollte die Politik nicht zuletzt an den folgenden Hebeln ansetzen:

- Die Wettbewerbsnachteile durch relativ hohe Energieträgerpreise, die sich infolge der Beendigung der Pipeline-Erdgasimporte aus Russland gegenüber konkurrierenden Weltregionen ergeben haben, sollten kurzfristig durch politische Instrumente adressiert werden.
- Mittel- bis langfristig werden Deutschland und Europa bei den Energiekosten voraussichtlich nur dann wettbewerbsfähig gegenüber anderen Weltregionen sein können, wenn es gelingt, den Erneuerbaren-Ausbau dynamisch voranzubringen, Flexibilität zu erschließen und den Ausbau der Strom- und Wasserstoff-Infrastruktur europäisch zu koordinieren.
- Solange für Unternehmen die nötigen Investitionen in klimaneutrale Produktionsprozesse aufgrund zu geringer CO₂-Preise im EU-Emissionshandel nicht wirtschaftlich sind, sollte die Politik diese Investitionen über zusätzliche Instrumente anreizen. Neben finanzieller Förderung (wie Investitionszuschüssen oder Klimaschutzverträgen) kommen Maßnahmen wie eine grüne öffentliche Beschaffung oder staatlich vorgegebene Quoten für die Nutzung klimaneutral produzierter Grundstoffe in Frage. Aufgrund der oft mehrere Jahrzehnte langen Nutzungsdauer von Industrieanlagen ist es von zentraler Bedeutung, dass bereits in naher Zukunft neue Investitionen in der Industrie konsequent in Richtung klimaneutraler Anlagen fließen.
- Die deutsche und europäische Politik sollte deutliche Fortschritte bei der Erschließung der Potenziale der Kreislaufwirtschaft anstreben, denn geringere Materialintensitäten und ein konsequentes Recycling von Materialien können – neben positiven Auswirkungen auf Natur und Umwelt – auch Kostenvorteile für die inländische Industrieproduktion darstellen.

1 Einleitung

Eine erfolgreiche Transformation der deutschen Industrie ist sowohl für das Erreichen der deutschen Klimaschutzziele als auch für den Erhalt von Wertschöpfung und gut bezahlten Arbeitsplätzen von zentraler Bedeutung. Gleichzeitig haben die Errichtung und der Betrieb industrieller Anlagen und Infrastrukturen negative Auswirkungen auf die Natur. Dies gilt auch für Anlagen und Infrastrukturen einer zukünftigen klimaneutralen Industrie. Für den NABU als in der Fläche Deutschlands verankerte Natur- und Umweltschutzorganisation ist aufgrund dieser Zusammenhänge ein gutes Verständnis der Potenziale und Voraussetzungen sowie der gesellschaftlichen Implikationen einer Industrie-Transformation von hoher Bedeutung, um nicht zuletzt in Bezug auf zukünftige Industrie- und Infrastrukturvorhaben in der internen sowie externen Kommunikation qualifiziert und differenziert Stellung beziehen zu können.

Der NABU hat daher das Wuppertal Institut beauftragt, mit der vorliegenden Studie darzustellen, wie nach derzeitigem Wissensstand eine Vision für eine klimaneutrale Industrie in Deutschland aussehen könnte, die gute Arbeit und Wohlstand ermöglicht. Die Studie zeigt auf Grundlage der aktuell vorliegenden Fachliteratur auf, welche neuartigen Technologien in einer klimaneutral produzierenden Industrie voraussichtlich eingesetzt werden und welche infrastrukturellen, regulatorischen und gesellschaftlichen Voraussetzungen für ein Gelingen dieser Transformation erforderlich sind. Zudem wird dargelegt, welche für die Gesellschaft relevanten Implikationen mit einer erfolgreichen Industrie-Transformation einhergehen könnten, beispielsweise in Bezug auf Beschäftigung und Resilienz.

Im folgenden *Kapitel 2* wird zunächst auf die Erfordernisse des Klimaschutzes und damit auf den wesentlichen Treiber für die Industrie-Transformation eingegangen.

Kapitel 3 stellt anschließend eine Vision dar, wie eine klimaneutrale Industrie im Jahr 2045 aussehen könnte – welche neuartigen Technologien und Prozesse zum Einsatz kommen werden, welche Energieträger dominieren werden, welche Infrastrukturen genutzt werden und was sich für Beschäftigte gegenüber heute ändern wird. Dabei wird neben einem Blick auf den gesamten Industriesektor zusätzlich auch auf die drei gegenwärtig besonders emissionsintensiven Branchen geblickt: die Eisen- und Stahlindustrie, die chemische Industrie und die Zementindustrie.

Kapitel 4 geht in der Folge näher darauf ein, welche Beiträge eine erfolgreiche Industrie-Transformation zum Klimaschutz und zu weiteren zentralen gesellschaftlichen Zielen wie Beschäftigung, Resilienz und Naturschutz leisten kann.

Die Transformation der Industrie wird in den kommenden zwei Jahrzehnten einhergehen mit strukturellen Veränderungen des Sektors. Auf wichtige absehbare Veränderungen, wie eine wachsende Bedeutung der Kreislaufwirtschaft, geht *Kapitel 5* ein.

Kapitel 6 verdeutlicht anschließend, dass die Vision einer klimaneutralen Industrie im Jahr 2045 kein „Selbstläufer“ ist, sondern für ihre Umsetzung bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein müssen – und diese Voraussetzungen in den nächsten Jahren nicht zuletzt durch entschlossenes politisches Handeln geschaffen werden müssen.

Kapitel 7 fasst die wesentlichen Schlussfolgerungen der Studie zusammen, während das abschließende *Kapitel 8* einen Exkurs zur gegenwärtigen Bedeutung des Industriesektors für Deutschland bietet.

2 Deutschlands Klimaziele und Rolle des Industriesektors

Deutschland hat sich das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 gesetzt und im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verankert. Das KSG trat Ende 2019 in Kraft und ist seither das zentrale Element der nationalen Klimapolitik. Ziel des KSG ist es, als Zwischenschritt zur Treibhausgasneutralität die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis zum Jahr 2030 um mindestens 65 % und bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 % (jeweils gegenüber dem Jahr 1990) zu reduzieren. Bis zum Jahr 2030 werden im KSG auch sektorspezifische Ziele formuliert (siehe Tabelle 2-1), die in der Summe dafür sorgen sollen, dass die insgesamt für 2030 vorgesehene Emissionsminderung von mindestens 65 % erreicht werden kann.¹

Tab. 2-1 Historische Treibhausgasemissionen und Minderungsziele nach Bundes-Klimaschutzgesetz für 2030, 2040 und 2045 (absolute Werte in Mio. t CO₂-Äq.)

	1990	2021	2022	2023	KSG-Ziele für 2030		KSG-Ziel für 2040	KSG-Ziel für 2045
Energiewirtschaft	475	246	257	205	108	– 77 %	-	-
Industrie	278	182	168	155	118	– 57 %	-	-
Gebäude	210	119	111	102	67	– 69 %	-	-
Verkehr	163	144	147	146	85	– 49 %	-	-
Landwirtschaft	83	62	61	60	56	– 31 %	-	-
Abfallwirtschaft & Sonstiges	42	6	6	6	4	– 88 %	-	-
Gesamtsumme	1251	760	750	673	438	– 65 %	– 88 %	Netto-THG-Neutralität

Hinweise: Dargestellt werden in der Tabelle die im Bundes-Klimaschutzgesetz aufgeführten Zielwerte für 2030, keine angepassten Werte, die sich aus einer Über- oder Untererfüllung historischer Jahre ergeben können. KSG = Bundes-Klimaschutzgesetz; Netto-THG-Neutralität = Netto-Treibhausgasneutralität

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) und UBA (2024a).

Für den Sektor Industrie ist nach KSG eine Minderung gegenüber 1990 um 57 % von 278 auf 118 Mio. t CO₂-Äq. zu erreichen. In den vergangenen Jahren hat der Industriesektor seine im KSG festgelegten jährlichen Höchstgrenzen einhalten können. Im Jahr 2021 gelang dies allerdings nur sehr knapp und in den Jahren 2022 und 2023 waren im Wesentlichen die konjunkturelle Schwäche und insbesondere der starke Rückgang der energieintensiven Produktion für die deutlichen Emissionsminderungen der Industrie ursächlich (UBA 2024a, b).

Der im Auftrag der Bundesregierung erstellte „Projektionsbericht 2024“ (UBA 2024c) hält eine Zielerreichung des Industriesektors bis 2030 mit den politisch bisher bereits beschlossenen Maßnahmen für möglich. Allerdings wird in dieser

¹ Stellen die vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen jährlichen Projektionsberichte zweimal in Folge fest, dass bei aggregierter Betrachtung aller Sektoren die Summe der Treibhausgasemissionen in den Jahren 2021 bis einschließlich 2030 die Summe der im KSG maximal vorgesehenen Gesamtemissionen überschreitet, so legt das KSG fest, dass die Bundesregierung Maßnahmen zu beschließen hat, die die Einhaltung der Summe der Jahresemissionsgesamtmengen für diese Jahre sicherstellen. Konkrete Maßnahmen sollen dann nach KSG „insbesondere“ diejenigen Bundesministerien vorschlagen, „in deren Zuständigkeitsbereich die Sektoren liegen, die zur Überschreitung beitragen“.

Projektion unter anderem angenommen, dass in den nächsten Jahren die staatliche Finanzierung für klimapolitische Maßnahmen, wie die Klimaschutzverträge, wie ursprünglich geplant erfolgt. Angesichts der angespannten Lage des Bundeshaushalts muss diese Annahme als unsicher angesehen werden. Zudem wird in dem Bericht ein CO₂-Zertifikatspreis angenommen, der von 82 € pro Tonne im Jahr 2024 auf 122 € pro Tonne im Jahr 2030 steigt. Tatsächlich lag der Preis im Jahr 2024 aber meist nur zwischen 60 und 70 € pro Tonne (Ember 2025). Sollte der Preis auch in den nächsten Jahren niedriger liegen als im Projektionsbericht angenommen, so könnte dies die Realisierung von Emissionsminderungen im Industriesektor erschweren (Expertenrat für Klimafragen 2024).

Die 2030-Zielerreichung des Industriesektors sollte daher keinesfalls als sicher bzw. als „Selbstläufer“ angesehen werden. Auch der Expertenrat für Klimafragen (2024) befürchtet bis 2030 eine Zielverfehlung. Zudem macht der Projektionsbericht deutlich, dass der Industriesektor (wie auch die anderen Sektoren) ohne zusätzliche klimapolitische Maßnahmen bis 2045 seine Emissionen bei weitem nicht ausreichend reduzieren wird, um zum Ziel der Klimaneutralität beizutragen. Die Treibhausgasemissionen der Industrie würden demnach 2045 noch bei rund 50 Mio. t CO₂-Äq. liegen (siehe Abbildung 2-1), und damit nur rund 80 % niedriger als im Jahr 1990.²

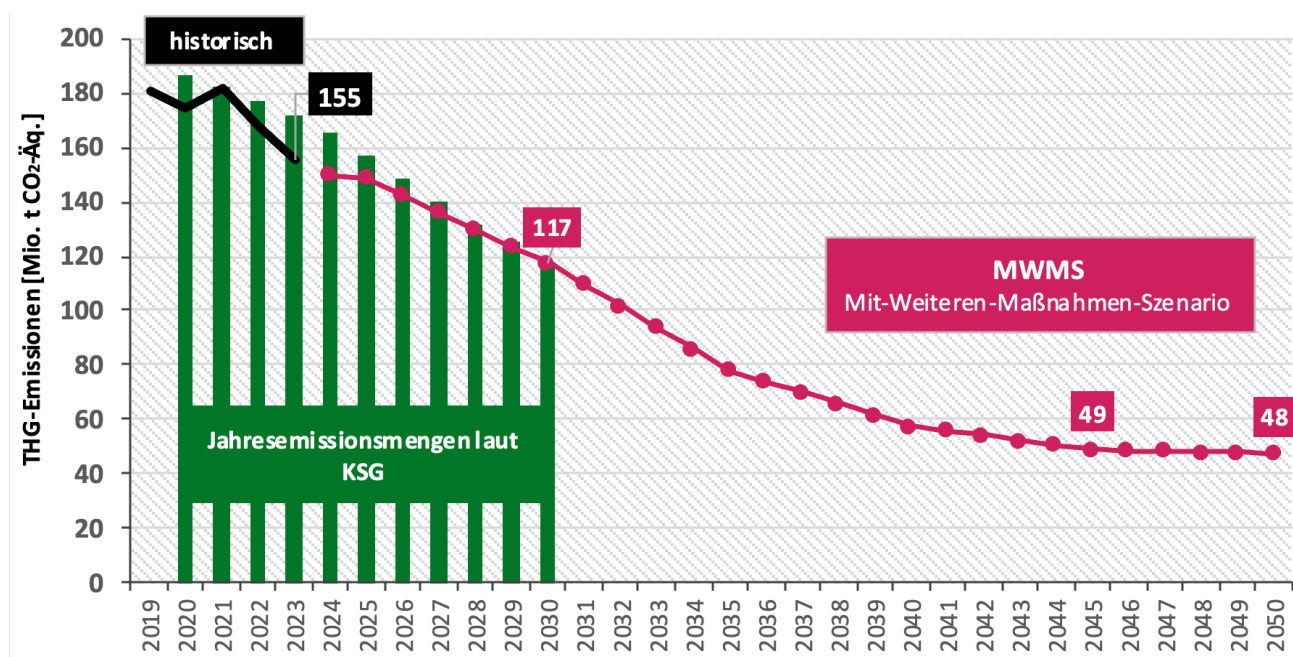


Abb. 2-1 Projektion der Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie bis 2050 im „Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario“ (MWMS 2024)

Hinweis: KSG = Bundes-Klimaschutzgesetz

Quelle: UBA (2024c).

² Abbildung 2-1 zeigt das ambitioniertere Szenario des Projektionsberichts 2024, nämlich das Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS). In diesem Szenario werden neben den bis Ende Juli 2023 beschlossenen klimapolitischen Maßnahmen auch Maßnahmen bis dahin berücksichtigt, „die eine realistische Chance haben, verabschiedet zu werden; dazu gehören auch verabschiedete Ziele, für die eine realistische Chance besteht, dass entsprechende Instrumente verabschiedet werden.“ Im Szenario „Mit-Maßnahmen-Szenario“ (MMS), das nur Instrumente berücksichtigt, die bis Ende Juli 2023 umgesetzt oder im politischen Prozess angenommen wurden, werden 2045 von der Industrie noch 52 Mio. t CO₂-Äq. ausgestoßen.

Für die Zeit nach 2030 gibt das aktuelle KSG zwar keine sektorspezifischen Zielwerte mehr vor. Aus heutiger Sicht ist aber klar, dass eine Minderung der Emissionen der Industrie bis 2045 um lediglich rund 80 % gegenüber 1990 nicht ausreichend sein wird, um bis dahin Klimaneutralität zu erreichen. Aktuelle Szenariostudien (FZ Jülich 2023, Fraunhofer ISI et al. 2024, Agora Think Tanks et al. 2024) halten stattdessen bis 2045 einen Rückgang der Treibhausgasemissionen im Industriesektor um mindestens rund 90 % für notwendig. Möglicherweise bedarf es sogar – mittels der Realisierung so genannter „negativer Emissionen“ im Industriesektor, insbesondere über die stoffliche Nutzung von Biomasse in der chemischen Industrie sowie die Abscheidung und Speicherung von biomassebasiertem CO₂ – einer Senkung der Emissionen um über 100 %, um das Ziel der Treibhausgasneutralität für Deutschland zu erreichen (siehe Abbildung 2-2).³

Eine Minderung der Emissionen des Sektors um 90 bis 100 % gegenüber 1990 würde ab 2024 und bis 2045 eine durchschnittliche jährliche Emissionsminderung von rund 6 bis 7 Mt CO₂-Äq. erfordern – ein etwa dreimal so großer Rückgang, wie er zwischen 2010 und 2023 durchschnittlich pro Jahr realisiert werden konnte (minus 2,3 Mt CO₂-Äq. pro Jahr). Zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen sind folglich (auch) im Industriesektor in den nächsten Jahren unerlässlich.

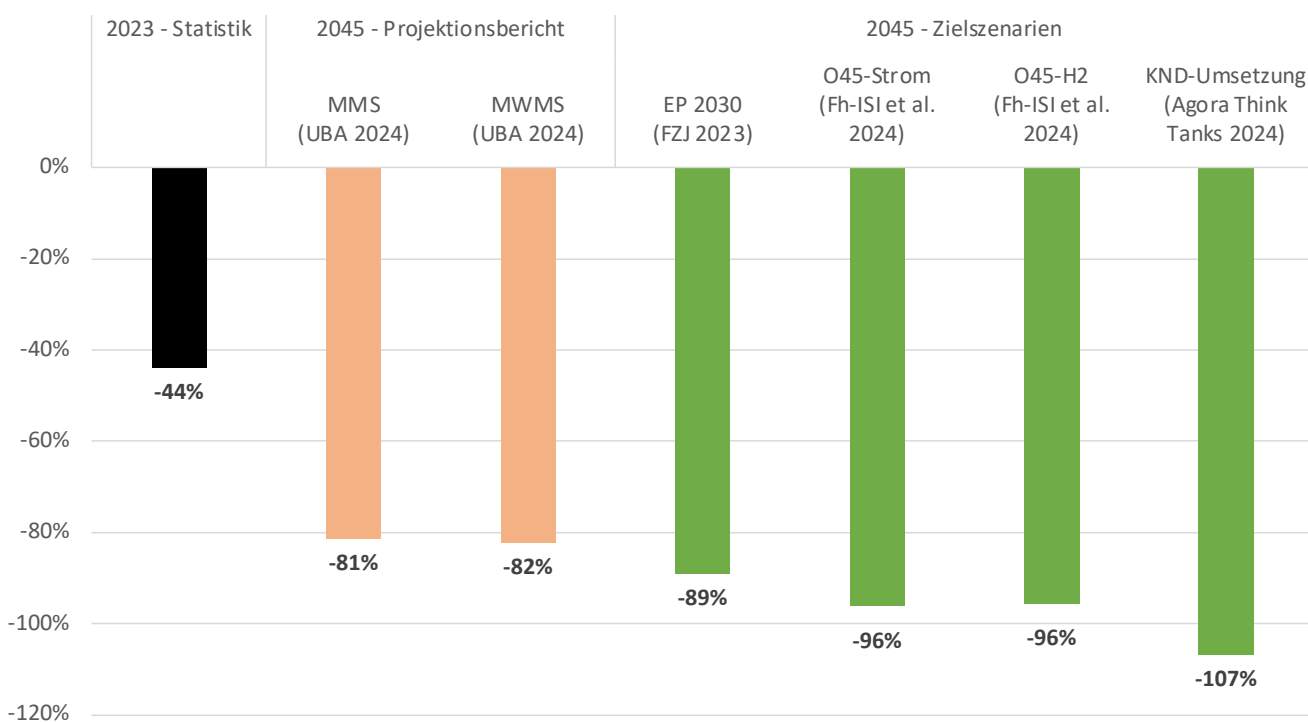


Abb. 2-2 Minderung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor gegenüber 1990 im Jahr 2023 und nach verschiedenen Projektionen bzw. Szenarien im Jahr 2045

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf UBA (2024a, c), FZ Jülich (2023), Fraunhofer ISI et al. (2024) und Agora Think Tanks et al. (2024).

³ Eine Minderung der Emissionen im Industriesektor bis 2045 um lediglich rund 90 % (gegenüber 1990), wie im Szenario Energieperspektiven 2030 (EP 2030) (FZ Jülich 2023), ist nach heutigem Kenntnisstand nur dann mit Klimaneutralität vereinbar, wenn es gelingt, in Deutschland bereits bis 2045 beträchtliche Mengen an CO₂ aus der Luft abzuscheiden („Direct Air Capture“) und dauerhaft geologisch zu speichern, um die Restemissionen der Industrie sowie die Restemissionen aus weiteren Sektoren (vor allem der Landwirtschaft) durch negative Emissionen zu kompensieren.

3 Zielvision einer klimaneutralen Industrie in Deutschland im Jahr 2045

In diesem Kapitel wird eine nach heutigem Kenntnisstand plausible Vision einer klimaneutralen Industrie in Deutschland im Jahr 2045 beschrieben. Hierfür wird zunächst in Abschnitt 3.1 eine Vision für den zukünftigen (gesamten) Industriesektor entwickelt, bevor in den Abschnitten 3.2 (Eisen- und Stahlindustrie), 3.3 (chemische Industrie) und 3.4 (Zementindustrie) ein genauerer Blick auf drei Branchen der Industrie geworfen wird, die aufgrund ihrer gegenwärtig besonders hohen CO₂-Emissionen vor besonderen und jeweils spezifischen Herausforderungen stehen.

Die in diesem Kapitel dargelegte Vision einer klimaneutralen Industrie orientiert sich dabei im Wesentlichen an dem Zielzustand des Industriesektors, der im aktuellen Szenario „KND-Umsetzung“ (Agora Think Tanks et al. 2024) bis 2045 erreicht wird.

Leser*innen, die sich vor der Beschäftigung mit einer Zukunftsvision für die deutsche Industrie gerne zunächst mit der *gegenwärtigen* Struktur dieser Industrie und speziell ihrer Rolle für Beschäftigung, Wertschöpfung und Treibhausgasemissionen auseinandersetzen möchten, können zunächst in den Exkurs „Gegenwärtige Bedeutung des Industriesektors“ am Ende des vorliegenden Berichts (Kapitel 8) schauen.

3.1 Vision für den gesamten Industriesektor

Im Jahr 2045 ist die Industrie in Deutschland klimaneutral. Geringfügige Treibhausgasemissionen der industriellen Produktion, die sich auch im Jahr 2045 technisch nicht vermeiden lassen, werden innerhalb des Sektors mit Hilfe so genannter negativer Emissionen kompensiert.⁴ Wesentlicher Treiber für diese Entwicklung war der Europäische Emissionshandel, über den die letzten Emissionszertifikate bereits Ende der 2030er Jahre vergeben wurden (Packroff 2024). Im Industriesektor werden 2045 sogar mehr negative Emissionen erzielt als Restemissionen entstehen, so dass die Industrie einen Teil der Restemissionen anderer Sektoren (insbesondere der Landwirtschaft) kompensieren kann.

Das einstige Image der „dreckigen“ Industrie gehört 2045 endgültig der Vergangenheit an – und das nicht nur, weil sie netto keine Treibhausgase mehr ausstößt. Auch die lokalen Schadstoffemissionen wurden nahezu auf null reduziert: Statt Erdgas, Öl und Kohle verwendet die Industrie 2045 vor allem Strom – rund drei Viertel des Endenergiebedarfs des Industriesektors werden nun durch diesen Energieträger gedeckt, während der Anteil Anfang der 2020er Jahre noch bei 30 % lag. Insbesondere

⁴ Negative Emissionen werden dabei insbesondere durch die stoffliche Nutzung von Biomasse in der chemischen Industrie erreicht: „Dabei wird inländische Biomasse genutzt, um über den Zwischenschritt Methanol chemische Grundstoffe herzustellen und fossiles Erdöl als Kohlenstoffquelle zu ersetzen. Ein Großteil des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs wird stofflich in Methanol und den darauf aufbauenden Chemieprodukten (temporär) gebunden. Mittels Recyclingmethoden wird der gebundene Kohlenstoff insbesondere bei Kunststoffprodukten anschließend möglichst lange im Kreislauf geführt. Am Ende des Lebenszyklus sorgt der Einsatz von CCS im Rahmen der thermischen Abfallbehandlung dafür, dass der Kohlenstoff langfristigen geologischen Speichern zugeführt wird. In Summe werden so dauerhaft Negativemissionen generiert.“ (Agora Think Tanks et al. 2024, S. 136). Zudem werden in der Zielvision weitere negative Emissionen in der Industrie durch die Verbrennung von Biomasse und die Abscheidung und geologische Speicherung des entstehenden CO₂ realisiert. Unter anderem in der Zementherstellung wird (auch) zukünftig für die Wärmeerzeugung zum Teil auf Biomasse bzw. auf biomassehaltige Abfälle zurückgegriffen. Die bei der Verbrennung entstehenden CO₂-Emissionen werden – gemeinsam mit den unvermeidbaren Prozessemissionen der Zementherstellung – abgeschieden und dauerhaft geologisch gespeichert.

die schrittweise Elektrifizierung großer Teile der industriellen Wärmeerzeugung ab Mitte der 2020er Jahre sorgte für einen hohen Stromanteil. Ein großer Teil des restlichen Endenergiebedarfs wird – ebenso emissionsfrei – durch Wasserstoff gedeckt.

Auch andere wichtige Veränderungen sind bis zum Jahr 2045 erfolgreich umgesetzt. Dies gilt vor allem für die Versorgung der chemischen Industrie mit klimaneutralem Kohlenstoff, denn trotz aller Fortschritte in Richtung eines verstärkten Recyclings und ressourcenärmerer Konsummuster wird es auch im Jahr 2045 noch eine Nachfrage nach neuen (also nicht recycelten) Kunststoffen geben. Statt dem in der Vergangenheit genutzten (auf fossilen Energieträgern basierenden) Naphtha haben sich 2045 biogene Rohstoffe und das chemische Recycling als zentrale Kohlenstoffquellen etabliert.

Die mit der Umstellung des Energiemixes einhergehenden Fortschritte bei der Luftqualität sorgen bei Beschäftigten und bei Menschen, die in der Nähe von Industrieanlagen wohnen, für deutliche Verbesserungen des Wohlbefindens und der Gesundheit.

Infolge der erfolgreichen Transformation der Industrie profitieren Umwelt und Natur nicht nur durch die Umstellung auf grüne und saubere Energieträger und Stoffströme, sondern auch von den deutlichen Fortschritten, die in Richtung einer Kreislaufwirtschaft gemacht werden. Bis zum Jahr 2045 werden die lange Zeit ungenutzten Potenziale zur Kreislaufführung von Grundstoffen dank Verbesserungen im Produktdesign sowie bei der Trennung und Aufbereitung von Abfällen weitgehend erschlossen. So wird bei dem Design von Produkten stark darauf geachtet, dass die verwendeten Materialien am Ende des Produktlebenszyklus möglichst leicht repariert, wiederverwendet oder recycelt werden können („Design-for-Recycling“ bzw. „Circular Design“). Verbesserungen in der Materialeffizienz der industriellen Produktion, eine tendenziell längere Nutzung von Produkten (unterstützt durch eine stärkere Fokussierung auf die Reparatur defekter Geräte) sowie ein stärkeres Teilen von Produkten (zum Beispiel in Form von Carsharing) begrenzen zusätzlich den Bedarf an ressourcen- und energieintensiver Primärproduktion von Grundstoffen.

Durch diese erheblichen Fortschritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft wird zum einen Energie eingespart, da weniger Rohstoffe benötigt werden und zudem ein größerer Teil der benötigten Materialien über das weniger energieintensive Recycling gedeckt werden kann. Zum anderen werden Ökosysteme in Deutschland und im Ausland dadurch entlastet, dass infolge des geringeren (Primär-) Materialbedarfs deutlich weniger Rohstoffe gefördert und transportiert werden müssen.

Im Jahr 2045 sind in Deutschland nach wie vor viele Menschen in der Industrie beschäftigt, wenn auch die Anzahl der Arbeitsplätze etwas niedriger liegt als Anfang der 2020er Jahre. Dämpfend auf den Arbeitsplatzbedarf in der Industrie haben sich insbesondere die folgenden zwei Entwicklungen ausgewirkt:

- Der Automatisierungsgrad in der Produktion (unterstützt durch künstliche Intelligenz) ist im Jahr 2045 deutlich erhöht.
- Die Exportorientierung der deutschen Wirtschaft hat bereits im Laufe der 2020er und 2030er Jahre abgenommen, da die Konkurrenz auf dem Weltmarkt in vielen Bereichen gestiegen ist und der Welthandel zudem durch protektionistische Maßnahmen eingeschränkt wurde.

Aufgrund des demografischen Wandels – der Anteil der Menschen in Deutschland, die über 67 Jahre sind, liegt 2045 bereits bei 25 % (2022: 20 %) (Statistisches Bundesamt 2025a) – stellt ein moderater Rückgang der Arbeitsplätze im Industriesektor keine für die Gesellschaft nicht zu lösende Herausforderung dar. Die Beschäftigten in der Industrie werden auch im Jahr 2045 gut bezahlt und haben mehr Möglichkeiten als heute, ihre Arbeitszeiten flexibel zu gestalten. (Durch die – demografisch bedingte – anhaltende Fachkräfteknappheit haben die Unternehmen verstärkte Bemühungen unternommen, um für Arbeitskräfte attraktiver zu werden.)

Zudem spielt Flexibilität auch auf einer anderen Ebene eine wichtige Rolle: Die neuen Produktionsprozesse der Industrie können 2045 deutlich flexibler betrieben werden als dies noch in den 2020er Jahren der Fall war. Lastmanagementmaßnahmen der Industrie tragen im Jahr 2045 dazu bei, dass die Stabilität des Stromsystems und damit ein weiterhin hohes Niveau an Versorgungssicherheit gewährleistet werden können (KEI 2024).

Die Mitte der 2020er Jahre teilweise noch befürchtete „Deindustrialisierung“ Deutschlands ist nicht eingetreten. Stattdessen ist es – wesentlich getrieben durch eine vorausschauende Industriepolitik – gelungen, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie unter anderem durch die folgenden Entwicklungen zu erhalten:

- Der Ausbau erneuerbarer Energien hat seit Anfang der 2020er Jahren in Deutschland und Europa deutlich an Dynamik gewonnen, so dass im Jahr 2045 die wirtschaftlich umsetzbaren Erneuerbaren-Potenziale in Europa weitgehend ausgenutzt werden und – in Kombination mit einem europäisch koordinierten Ausbau der Strom- und Wasserstoff-Infrastruktur – für moderate Preise für grünen Strom und grünen Wasserstoff sorgen.
- Durch die politisch unterstützten frühzeitigen Schritte in Deutschland in Richtung einer klimaneutralen Industrie konnten Investitionen angestoßen werden, von denen die Industrie aufgrund der langen Betriebs- und Lebensdauern großer (und kapitalintensiver) Industrieanlagen auch 2045 noch profitieren. Durch eine konsequente und kontinuierliche politische Unterstützung konnte sich so an verschiedenen Industriestandorten Deutschlands eine kritische Masse an Unternehmen bilden, die sich als Vorreiter auf den wachsenden internationalen Märkten für grüne Materialien und Produkte etabliert haben. Durch den hierdurch erlangten Erfahrungsvorsprung bei den klimaneutralen Produktionsprozessen und der frühzeitig erfolgten Kundenbindung haben diese Unternehmen vielfach auch 2045 noch Wettbewerbsvorteile auf den internationalen Märkten.
- Die deutlichen Fortschritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft senken die Energie- und Materialkosten der deutschen Industrie, wodurch bestehende Kostennachteile bei grünen Energieträgern im Vergleich zu einigen anderen Regionen der Welt größtenteils kompensiert werden konnten.
- Politik und Unternehmen in Deutschland setzten weiterhin auf Innovationskraft und hohe Qualitätsstandards. Auf diese Weise gelingt es – wie auch in der Vergangenheit – die teilweise günstigeren Arbeits- und Energiekosten in anderen Teilen der Welt zu kompensieren.
- In den 2020er und 2030er Jahren konnten in Deutschland und der EU deutliche Fortschritte beim Abbau ineffizienter bürokratischer Vorgaben erzielt werden.

- Im gleichen Zeitraum wurden von Politik und Wirtschaft – unter Einbezug gesellschaftlicher Interessen – gemeinsame Anstrengungen unternommen, die für die Industrie-Transformation zentralen Infrastrukturen (insbesondere für den Transport von Wasserstoff, Strom und CO₂) auf- bzw. auszubauen.
- Die Digitalisierung und Automatisierung der Produktionsprozesse konnte seit Mitte der 2020er Jahre deutlich beschleunigt und damit die Effizienz der industriellen Produktion erhöht werden.

Durch den Erhalt einer wesentlichen industriellen Basis als Ergänzung zur Dienstleistungsökonomie konnten Arbeitsplätze in traditionellen Industrieregionen erhalten bleiben und die deutsche Wirtschaft überstand Krisenzeiten durch ihre diversifizierte Struktur und gestärkte Resilienz besser als wirtschaftlich einseitiger ausgerichtete Länder.

Auch wenn industrielle Produktion in Deutschland im Wesentlichen erhalten werden konnte, hat es in den letzten zwei Jahrzehnten einen Strukturwandel gegeben:

- Grundsätzlich werden 2045 größere Mengen an energieintensiven Vor- bzw. Zwischenprodukten (wie Roheisen oder Ammoniak) aus Ländern mit hervorragenden Bedingungen für erneuerbare Energien importiert. Deshalb liegt die Produktion entsprechender Vorprodukte in Deutschland 2045 wesentlich niedriger als noch Anfang der 2020er Jahre. Allerdings entfallen auf die Produktion dieser energieintensiven Vorprodukte nur relativ geringe Anteile der industriellen Wertschöpfung und auch der Beschäftigung. Für Wertschöpfung und Beschäftigung ist der Erhalt der weiterverarbeitenden Industrie daher wesentlich relevanter als der Erhalt der Herstellung energieintensiver Vorprodukte. Durch eine günstigere Beschaffung auf dem Weltmarkt (gegenüber einem Bezug dieser energieintensiven Vorprodukte aus Deutschland) werden weiterverarbeitende Industrien in ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit gestärkt und industrielle Beschäftigung und Bruttowertschöpfung können sogar unter dem Strich profitieren. Eine problematische Abhängigkeit vom Ausland besteht bei diesen Importen energieintensiver Vorprodukte zudem nicht, da sie im Jahr 2045 diversifiziert aus verschiedenen Ländern und Weltregionen importiert werden – angestoßen auch durch frühzeitige, politisch unterstützte und faire Handels-Partnerschaften mit anderen Ländern.⁵
- Gleichzeitig sind im Laufe der 2020er und 2030er Jahre Arbeitsplätze in der fossilen Energiewirtschaft (insbesondere bei der Förderung von Kohle und dem Betrieb von Kohlekraftwerken) sowie in der Automobil- bzw. Automobilzuliefererindustrie verloren gegangen – zum einen, weil sich der Bedarf an Komponenten durch die Umstellung auf Elektroautos reduziert hat, zum anderen, weil sich im Bereich der Elektromobilität eine höhere Konkurrenz durch andere Länder, insbesondere China, entwickelt hat.

Die in diesen Bereichen abgebauten Arbeitsplätze konnten bis 2045 aber in großen Teilen durch eine deutlich stärkere nationale und internationale Nachfrage nach

⁵ Bei der Umsetzung der Industrie-Transformation wurde dabei von Anfang an darauf geachtet, dass die mit der Transformation verbundenen Wechselwirkungen auf der globalen Ebene (insbesondere in den Ländern des Globalen Südens) erkannt und wo eben möglich flankierende Maßnahmen zum Ausgleich eingeführt wurden.

Energiewende-Gütern wie Elektrolyseuren und Windenergieanlagen kompensiert werden (siehe Abschnitt 5-2). Gleichzeitig wurden bis 2045 zahlreiche neue Arbeitsplätze im Bereich der Recycling-Wirtschaft (bei der Trennung, Sortierung und Wiederaufbereitung genutzter Produkte bzw. Materialien) und bei der Bereitstellung von Systemdienstleistungen geschaffen. Auch die CO₂-Abscheidung und Speicherung und die im Laufe der 2030er und vor allem 2040er Jahre an Bedeutung gewinnende Nutzung von Technologien zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre schaffen neue Arbeitsplätze (unter anderem) in der Industrie.

Die Politik hat diese Entwicklungen durch verschiedene Maßnahmen unterstützt. Von besonderer Bedeutung war dabei die Etablierung von grünen Leitmärkten und eine progressive, auf grüne Technologien ausgerichtete Ansiedlungspolitik.

3.2 Zielvision für die Eisen- und Stahlindustrie

Im Jahr 2045 beruht die Eisen- und Stahlerzeugung in Deutschland ausschließlich auf klimaneutralen Energieträgern und Reduktionsmitteln, insbesondere auf grünem Wasserstoff und grünem Strom. Bereits im Laufe der 2030er Jahre wurden die letzten Hochöfen abgeschaltet, da sich deren Weiterbetrieb angesichts steigender CO₂-Preise im EU-Emissionshandel für die Stahlunternehmen nicht mehr lohnte. Statt Hochöfen stehen nun an den gleichen Standorten Direktreduktionsanlagen, die mit grünem Wasserstoff (teilweise ergänzt durch biogene Gase) betrieben werden. Die Stahl-Standorte gehörten zu den ersten Standorten, die an das Ende der 2020er und Anfang der 2030er Jahre errichtete Wasserstoff-Kernnetz angeschlossen wurden. Den größten Teil ihres Wasserstoffbedarfs decken die Standorte über diese Pipeline-Zugänge, ein kleinerer Teil wird aber auch in unmittelbarer Nähe der Standorte durch eigene Elektrolyseure gedeckt.

Dank einer weitgehenden Erschließung der Erneuerbaren-Potenziale in Deutschland und anderen europäischen Ländern sowie einer gut ausgebauten europäischen Stromnetz- und Pipeline-Infrastruktur ist die Stahlindustrie 2045 in der Lage, grünen Strom und grünen Wasserstoff zu Preisen zu beziehen, die eine wettbewerbsfähige Produktion in Deutschland ermöglichen. Der von der Stahlindustrie nachgefragte grüne Wasserstoff wird 2045 sowohl an verschiedenen Standorten in ganz Deutschland (mit einem Fokus auf Norddeutschland) erzeugt und in das Netz eingespeist als auch durch Pipeline-Importe aus anderen europäischen Ländern (wie Dänemark, Spanien oder Frankreich) und Nordafrika (wie Marokko) ergänzt.

Neben der Reduktion von Eisenerz in inländischen Direktreduktionsanlagen importiert Deutschland im Jahr 2045 zusätzlich auch direktreduziertes „grünes“ Eisen aus Ländern, die über hervorragende Erneuerbaren-Bedingungen verfügen und grünen Wasserstoff und somit auch grünes Eisen günstiger herstellen können als Deutschland und Europa (Bilici et al. 2024). Das importierte grüne Eisen, für das es 2045 einen globalen Markt mit Lieferanten aus verschiedenen Regionen der Welt gibt, wird anschließend in Deutschland in Elektrolichtbogenöfen oder elektrischen Einschmelzern zu Stahl weiterverarbeitet. Das grüne Eisen kann dabei im Wesentlichen mit der gleichen Infrastruktur importiert werden wie derzeit herkömmliches Eisenerz bzw. Eisenerzpellets, die für die inländische Reduktion von Eisen importiert werden müssen – gegenwärtig vor allem in Hochöfen, 2045 in Direktreduktionsanlagen.

Der Import von direktreduziertem Eisen lohnt sich im Jahr 2045 für die deutschen Stahlhersteller insbesondere in solchen Zeiten, in denen die Wasserstoff-Preise hierzulande besonders hoch sind, was beispielsweise im Winter während längerer „Dunkelflauten“ (Zeiträume geringer Stromerzeugung aus Wind- und Photovoltaik-Anlagen) der Fall sein kann. Ein Import kann zudem auch konjunkturelle Gründe haben, wenn eine besonders hohe Stahlnachfrage auftritt und die bestehenden inländischen Direktreduktionsanlagen vollständig ausgelastet sind – hierdurch ergeben sich flexible und auf die Situation angepasste Rohstoffbeschaffungsstrategien, die nicht zuletzt die Resilienz und Produktionssicherheit erhöhen.

Trotz der gegenüber anderen Weltregionen höheren Kosten für grünen Wasserstoff und grünen Strom ist die Stahlherstellung in Deutschland im Jahr 2045 wettbewerbsfähig. Dies liegt zum einen daran, dass die geografische Nähe der Stahlhersteller zu einer Vielzahl an stahlverarbeitenden Unternehmen in Deutschland und den Nachbarländern zu niedrigen Transportkosten führt und eine zeitlich relativ flexible Belieferung der Kunden ermöglicht. Zum anderen setzen die deutschen Hersteller auch im Jahr 2045 in starkem Maße auf qualitativ hochwertige Spezialstähle, die keinem ähnlich harten globalen Preiswettbewerb ausgesetzt sind wie Massenstähle, die etwa in der Baubranche Verwendung finden.

Im Jahr 2045 beruht zudem mit 45 % ein bedeutender Anteil des in Deutschland produzierten Stahls auf dem Recycling von Stahlschrott (2022 noch 30 %). Der erhöhte Sekundärstahl-Anteil mindert nicht nur den Bedarf an Primärrohstoffen, sondern reduziert auch den Energieverbrauch und die Umweltbelastung. Der höhere Recycling-Anteil kann realisiert werden, indem ein Großteil des in Deutschland anfallenden Stahlschrotts in Deutschland verarbeitet wird und die Sammlung, Trennung und Aufbereitung von Stahlschrott verbessert wird (wodurch einerseits mehr Schrott zu Verfügung steht und andererseits auch Verunreinigungen des Stahlschrotts reduziert werden). Zugleich können hierdurch auch Importabhängigkeiten von Rohstoffen gesenkt und die Resilienz der Stahlindustrie erhöht werden.

Der Arbeitskräftebedarf der Stahlindustrie wird bis 2045 von verschiedenen Entwicklungen beeinflusst. Aufgrund des teilweisen Imports von direktreduziertem Eisen, des erhöhten Einsatzes von Stahlschrott sowie einer zunehmenden Automatisierung sinkt der Arbeitskräftebedarf in der heimischen Roheisenerzeugung. Gleichzeitig liegt die Stahlnachfrage 2045 in Deutschland niedriger als in den 2010er Jahren. Zum einen ist die deutsche Wirtschaft im Jahr 2045 weniger exportorientiert (vor allem hat es infolge zunehmender internationaler Konkurrenz bereits seit den 2020er Jahren einen Rückgang der Pkw-Exporte gegeben), zum anderen wirken sich Bemühungen für eine verlängerte Nutzungsdauer von Fahrzeugen, Anlagen und Geräten auf die Stahlnachfrage aus. Teilweise kompensiert werden diese Effekte durch einen höheren Arbeitskräftebedarf bei der Sekundärstahlerzeugung sowie insbesondere bei dem arbeitsintensiven Recycling und Aufbereiten des Stahlschrotts.

Durch den hohen Automatisierungsgrad ist die Arbeitsbelastung in der Stahlindustrie im Jahr 2045 niedriger als in den 2020er Jahren, und durch den Verzicht auf die Verwendung von Kokskohle ist auch die Belastung durch Luftverschmutzung am Arbeitsplatz kein Thema mehr.

Unsicherheiten

Sollte es nicht gelingen, die erneuerbaren Energien in Deutschland und anderen europäischen Ländern sowie die europäische Energieinfrastruktur so weit auszubauen, dass sich zukünftig wettbewerbsfähige Energiepreise für die Industrie ergeben, so könnte die Roheisenproduktion bis 2045 weitgehend aus Deutschland verschwinden (siehe Abschnitt 5.3 zum Renewables-Pull-Effekt). Hohe Strompreise würden zugleich auch das Risiko erhöhen, dass große Teile der Stahlerzeugung (insbesondere der Sekundärstahlerzeugung) aus Deutschland abwandern und sich ebenfalls an den neuen Standorten der Roheisenerzeugung niederlassen. Dies wiederum würde die Attraktivität des Standorts Deutschland für die stahlverarbeitende Industrie mindern. Deutlich geringere Produktionsniveaus in Branchen wie der Automobilindustrie oder dem Anlagenbau hätten erhebliche Auswirkungen auf die industrielle Wertschöpfung und die Anzahl der Arbeitsplätze in Deutschland. Folglich ist es von großer Bedeutung, dass es zukünftig gelingt, über einen starken Ausbau der erneuerbaren Energien die Preise für Strom auf einem moderaten Niveau zu halten und zudem die Attraktivität Deutschlands bei anderen Standortfaktoren (zum Beispiel der Verfügbarkeit von Fachkräften, der Rechtssicherheit und dem Ausmaß an Bürokratie) zu stärken.

Im Gegensatz zur Prozessumstellung auf Direktreduktionsanlagen sind andere disruptive Technologien, wie zum Beispiel direkte Eisenerz-Elektrolyseprozesse zur Stahlerzeugung, gegenwärtig noch nicht so weit entwickelt, dass sie absehbar in den nächsten – für die Transformation der Stahlindustrie kritischen – Jahren großtechnisch zur Verfügung stehen werden (Agora Industry et al. 2024). Diese Technologien könnten aber zur Mitte des Jahrhunderts oder in anderen Weltregionen eine Rolle spielen, in denen die Transformation der Stahlindustrie zum Teil ein bis zwei Jahrzehnte später durchgeführt wird. Im Falle der Elektrolyseverfahren hätte dies zur Folge, dass der Wasserstoffbedarf der Stahlindustrie deutlich sinken, der (direkte) Strombedarf aber erheblich steigen würde. Da das Wasserstoff(kern)netz jedoch bereits bis 2032 aufgebaut werden soll und die Stahlindustrie als eine frühzeitige (Groß-) Abnehmerin für Wasserstoff gilt, besteht bei einer solchen Entwicklung die Gefahr von "stranded assets", also die Gefahr, dass sich Wasserstoff-Pipelines nach ihrem Bau als doch nicht benötigt und damit als Fehlinvestition herausstellen könnten. Gleichzeitig besteht in einem solchen Fall die Gefahr, dass das Stromnetz für die Prozessumstellung und Leistungsabfrage nicht in erforderlichem Maß ausgebaut wurde.

Eine weitere Unsicherheit besteht darin, dass Erdgas möglicherweise nicht nur Übergangsweise, sondern langfristig (dann eventuell in Verbindung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung, CCS) für die Direktreduktion von Eisen eingesetzt werden könnte. Der längerfristige Einsatz von Erdgas ist jedoch auch in Kombination mit CCS als kritisch zu betrachten. Zum einen entstehen bei der Abscheidung Restemissionen, die bei einer wasserstoffbasierten Erzeugung nicht anfallen. Zum anderen ist die Förderung von Erdgas vielfach mit erheblichen Treibhausgasemissionen (so genannten „Vorketten-Emissionen“) verbunden (Agora Industry et al. 2024). Diesbezüglich gibt es Überlegungen, die auf den Einsatz von synthetischem Erdgas abzielen, das an Standorten mit sehr guten Erneuerbaren-Bedingungen aus Wasserstoff gewonnen wird und für das (zuvor zum Beispiel an Direktreduktionsanlagen) abgeschiedene

CO₂ verwendet wird. Die Kosten für die Umsetzung eines solchen Konzepts sind derzeit noch sehr unsicher, es könnte sich aber vor allem dann als wirtschaftlich erweisen, wenn sich der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur deutlich verzögern sollte oder die zukünftigen Preise für Wasserstoff sehr hoch liegen sollten.

3.3 Zielvision für die chemische Industrie

2045 gibt es nach wie vor eine bedeutende chemische Industrie in Deutschland, die einen Beitrag zu Beschäftigung und Wohlstand leistet und zu einer resilienten Versorgung der weiterverarbeitenden Industrie mit chemischen Produkten beiträgt. Die deutsche chemische Industrie gilt international als Vorreiterin beim Umstieg auf eine klimaneutrale Produktion und profitiert von dem Export grüner Produkte. Der Umstieg hin zu einer klimaneutralen Produktion wurde ermöglicht durch das Zusammenspiel aus intensiven Forschungsbemühungen der chemischen Industrie und förderlichen politischen Rahmenbedingungen, die frühzeitige Investitionen in klimaneutrale Produktionsanlagen ermöglicht bzw. abgesichert haben.

Die chemische Industrie⁶ in Deutschland sieht im Jahr 2045 in vielerlei Hinsicht anders aus als Mitte der 2020er Jahre. Um eine klimaneutrale chemische Industrie zu erreichen, wurden in den letzten zwei Jahrzehnten die Rohstoffe für die Produktion chemischer Grundstoffe, die Produktionsprozesse sowie natürlich auch die im Produktionsprozess eingesetzten Energieträger grundlegend umgestellt. Mitte der 2020er Jahre stellten die fossil-basierten Rohstoffe Naphtha und Erdgas in der Petrochemie und Polymerchemie sowie bei den Verfahren der Ammoniak- und Düngemittelproduktion die wesentliche Grundlage dar. Dieser Einsatz fossiler Ressourcen führte sowohl über die gesamte Produktionskette als auch am Ende des Lebenszyklus der Produkte (insbesondere bei der Entsorgung der Kunststoffabfälle) zu fossil-basierten CO₂-Emissionen.

Im Jahr 2045 werden in Deutschland stattdessen nicht-fossile Rohstoffe zur Herstellung chemischer Grundstoffe eingesetzt. Hierzu gehören insbesondere recycelte Kunststoffabfälle, Biomasse sowie durch Elektrolyse erzeugter grüner Wasserstoff. Jeder dieser Rohstoffe ist mit Einschränkungen wie begrenzter Verfügbarkeit, hohem Energiebedarf für die Bereitstellung oder hohen Kosten verbunden. Daher werden 2045 alle genannten Rohstoffe verwendet, das heißt es gibt nicht den *einen* grünen Rohstoff für die klimaneutrale chemische Industrie.

Bedeutungsgewinn des Recyclings – Kunststoffabfälle als Ausgangsmaterial

Im Jahr 2045 ist es gerade für die chemische Industrie von entscheidender Bedeutung, Material- und Kohlenstoffverluste zu vermeiden und den Kohlenstoff durch eine Kreislaufrückführung so weit wie möglich im System zu halten. Denn wenn eine Tonne Kunststoff am Ende ihres Lebenszyklus verbrannt wird, verursacht dies aufgrund des im Kunststoff enthaltenen Kohlenstoffs knapp drei Tonnen CO₂-Emissionen, was ungefähr der Menge an CO₂-Emissionen entspricht, die während der

⁶ Im weiteren Verlauf des vorliegenden Berichts wird bei der Detailbetrachtung der chemischen Industrie auf denjenigen Teil der Branche fokussiert, der chemische Grundstoffe wie beispielsweise Ethylen, Propylen, Methanol, Ammoniak oder Chlor herstellt. Auf diese grundstoffchemische Produktion wird fokussiert, da die chemische Industrie in diesem Bereich mit Abstand den höchsten Energieaufwand und die höchsten CO₂-Emissionen aufweist.

Herstellungsphase des Kunststoffs entsteht (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019). Das Recycling von Kunststoffen ist daher im Jahr 2045 ein zentrales Puzzleteil, um Emissionen und Kohlenstoffverluste zu vermeiden.

Mechanisches Recycling, das bereits seit Jahrzehnten genutzt wird, wird im Jahr 2045 intensiver und so weit wie möglich eingesetzt, unterstützt durch ein vielfach für Recycling optimiertes Produktdesign und eine verbesserte Sammlung und Sortierung von entsorgten Kunststoffen. Dennoch gibt es auch im Jahr 2045 Kunststoffaltmaterialströme, die nicht mechanisch recycelt werden können. Für diese Altmaterialströme wird im Jahr 2045 chemisches Recycling eingesetzt. Das chemische Recycling ist ressourcen- und energieintensiver als das mechanische Recycling, führt aber im Gegensatz zum mechanischen Recycling zu Grundstoffen, die dieselbe Qualität aufweisen wie neue Grundstoffe und folglich zur Herstellung neuer hochwertiger Chemikalien verwendet werden können. Dabei werden im Jahr 2045 verschiedene Verfahren zum chemischen Recycling eingesetzt, die für unterschiedliche Kunststoffaltmaterialströme (insbesondere sortenreine gegenüber gemischten Strömen) besser oder schlechter geeignet sind (siehe Info-Kasten 3-1).

Gewisse CO₂-Emissionen, die sich bei diesen Recycling-Verfahren nicht vermeiden lassen, werden 2045 an verschiedenen Standorten abgeschieden und über ein CO₂-Pipelinennetz in eine langfristige geologische Speicherung überführt. Da nachhaltig erzeugte Biomasse bis 2045 eine wichtige Rohstoffquelle der chemischen Industrie darstellt (s. unten), ist das beim chemischen Recycling von Kunststoffen abgeschiedene und geologisch gespeicherte CO₂ in Teilen biogenen Ursprungs und hilft damit, negative Emissionen zu realisieren.

Info-Kasten 3-1 Mechanisches Recycling und chemisches Recycling

Es ist von zentraler Bedeutung, dass vorhandene Materialien am Ende ihrer Nutzungsdauer recycelt werden, wo immer dies möglich ist. So lässt sich der mit der Herstellung neuer Materialien verbundene Rohstoff- und Energieverbrauch so weit wie möglich vermeiden. Generell gilt dabei: Sofern es möglich ist, neue Produkte durch mechanische Verwertung herzustellen, ist dies aus stofflicher, energetischer und wirtschaftlicher Sicht anderen alternativen Produktionsverfahren eindeutig vorzuziehen. Das mechanische Recycling spielt daher in der Zielvision eine wichtige Rolle. Um das volle Potenzial des mechanischen Recyclings auszuschöpfen, müssen die bestehenden Prozesse des mechanischen Recyclings und der Aufbereitung, einschließlich der Abfalltrennung, Sammlung, Sortierung, Vorbehandlung und Verwertung von Kunststoffabfällen, optimiert werden. Durch die Umsetzung von „Design-for-Recycling“-Maßnahmen wird ein effizientes mechanisches Recycling bereits zu Beginn des Lebenszyklus von Kunststoffprodukten mitgedacht. Beispiele für solche Maßnahmen sind die einfache Demontage zur Materialsortierung, die Verwendung von Einzelpolymeren anstelle von Mischungen und die Vermeidung von Zusatzstoffen, die das Recycling erschweren.

Chemisches Recycling ist eine *Ergänzung* zum mechanischen Recycling und sollte dieses auf keinen Fall ersetzen. Der Einsatz des chemischen Recyclings sollte sich auf solche Kunststoffabfälle beschränken, für die eine mechanische Verwertung nicht möglich ist und die ansonsten einer thermischen Verwertung zugeführt werden würden. Dies gilt zum Beispiel für stark verunreinigte oder gemischte Abfälle und für Kunststoffanwendungen, die bereits mehrfach mechanisch verwertet wurden und für dieses Verfahren nicht mehr geeignet sind. Das chemische Recycling ist dabei in der Regel ressourcen- und energieintensiver als das mechanische Recycling, aber im Gegensatz zum mechanischen Recycling können neue Produkte von gleicher Qualität (wie bei der Produktion auf Basis von Primärgrundstoffen) hergestellt werden.

Es gibt verschiedene Verfahren für das chemische Recycling von Kunststoffabfällen: Bei der Solvolyse (oder Depolymerisation) werden die Polymere wieder in ihre Monomere umgewandelt. Dieses Verfahren kann für bestimmte, meist sortenreine Kunststoffaltmaterialströme geeignet sein. Stärker gemischte Ströme können durch Pyrolyse verarbeitet werden, bei der die chemischen Verbindungen in den Kunststoffaltmaterialien in Abwesenheit von Sauerstoff thermisch gespalten werden. Nach einer entsprechenden Nachbehandlung kann das entstehende Pyrolyseöl als Naphtha-Ersatzstoff in herkömmlichen Steamcrackern zur Herstellung neuer hochwertiger Chemikalien verwendet werden. Andere Kunststoffaltmaterialströme eignen sich möglicherweise besser für die Vergasung, bei der diese stattdessen zu einem Synthesegas umgewandelt werden, das zu Methanol synthetisiert werden kann. Bei diesem Verfahren kann zusätzlicher Wasserstoff hinzugefügt werden, um Kohlenstoffverluste in Form von CO₂-Emissionen zu reduzieren. Die Vergasung erfordert höhere Temperaturen und damit mehr Energie als die Pyrolyse, eignet sich aber für Kunststoffaltmaterialströme mit schlechter Qualität und Zusammensetzung. Das gewonnene Methanol kann anschließend zu so genannten „high value chemicals“ (HVC, wie Ethylen, Propylen und Benzol) weiterverarbeitet werden, die die Grundlage für viele Produkte der chemischen Industrie darstellen.

In der Summe können im Jahr 2045 knapp 40 % des Kohlenstoffbedarfs der chemischen Industrie durch das Recycling von Kunststoffaltmaterialien bedient werden, ein um ein Vielfaches höherer Anteil als noch Anfang der 2020er Jahre (siehe Abbildung 3-1). Dank der auch im Jahr 2045 noch in Deutschland vertretenen Grundstoffindustrie können die aus dem chemischen Recycling gewonnenen Grundstoffe unmittelbar zur Weiterverarbeitung genutzt werden.

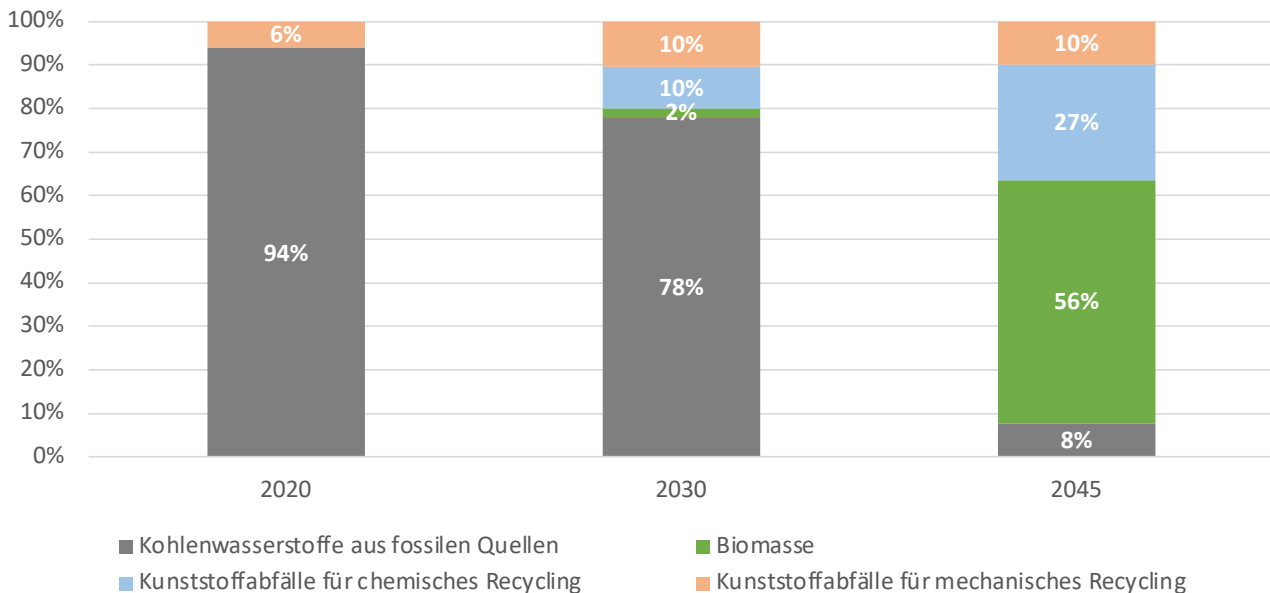


Abb. 3-1 Rohstoffbasis für die Kunststoffproduktion in Deutschland im Szenario KND-Umsetzung

Hinweis: Im Szenario KND-Umsetzung läuft die Nutzung fossiler Quellen als Rohstoffbasis in der chemischen Industrie erst zwischen 2045 und 2050 vollständig aus.

Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben von Agora Think Tanks et al. (2024).

Biomasse als wichtige Kohlenstoffquelle der klimaneutralen chemischen Industrie

Trotz des deutlich gesteigerten Recyclings lassen sich auch im Jahr 2045 Material- und Kohlenstoffverluste nicht vollständig vermeiden, sowohl bei Recyclingprozessen als auch bei der Entsorgung von Produkten und Materialien. Darüber hinaus werden einige Materialien über lange Zeiträume hinweg verwendet, zum Beispiel für Gebäude, Rohrleitungen und andere Infrastrukturen. Es wird daher auch im Jahr 2045 seitens der chemischen Industrie neuer Kohlenstoff benötigt. Da die Nutzung fossiler Rohstoffe im Jahr 2045 ausgeschlossen wird, gibt es hauptsächlich zwei Quellen für neuen (das heißt nicht aus dem Recycling gewonnenen) Kohlenstoff: Biomasse und CO₂ aus der Luft. Aufgrund des sehr hohen Energiebedarfs für die Herstellung chemischer Grundstoffe über die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre wird diese Route im Jahr 2045 in Deutschland aber nicht in größerem Maßstab eingesetzt. Entsprechende chemische Grundstoffe werden stattdessen vor allem in Regionen der Welt produziert, die über hervorragende Bedingungen für erneuerbare Energien verfügen. Aus diesen Regionen werden sie in andere Weltregionen exportiert.

Folglich wird in Deutschland im Jahr 2045 in erster Linie auf Biomasse gesetzt, um den Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie – in Ergänzung zum Recycling – zu decken. Zu den biogenen Rohstoffen im Jahr 2045 gehören nachhaltig erzeugte

Energiepflanzen (das heißt Pflanzen, die reich an Zucker, Stärke oder Ölen sind) und biogene Reststoffe, wie land- oder forstwirtschaftliche Rückstände. Diese werden zum Teil in Zucker umgewandelt und zu so genannten „Drop-in-Chemikalien“ verarbeitet, die mit ihren konventionellen Gegenständen identisch sind. Eine weitere wichtige Option für die Verarbeitung von Biomasse ist die Vergasung, über die zunächst Methanol hergestellt wird, bevor dieses dann zu Kunststoffen weiterverarbeitet wird („Methanol-Route“). Ein entscheidender Punkt bei der Verwendung von Biomasse ist die Sicherstellung, dass die Biomasse nachhaltig gewonnen wird und nicht zu negativen ökologischen Auswirkungen oder indirekt erhöhten Emissionen führt (Agora Think Tanks 2024, S. 122-124). Das bei der Umwandlung der Biomasse entstehende CO₂ wird 2045 an vielen Standorten abgeschieden und in eine geologische Speicherung überführt, was zu negativen Emissionen führt, die einen Teil der unvermeidbaren Emissionen (insbesondere aus der Landwirtschaft) kompensieren.

In der hier beschriebenen Vision wird also davon ausgegangen, dass in Deutschland der nicht durch Recycling gedeckte Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie 2045 überwiegend über Biomasse bedient wird. Dies ist möglich, weil bis 2045 ein großer Teil (nahezu ein Viertel) der nachhaltig verfügbaren Biomasse in Deutschland stofflich in der chemischen Industrie verwendet wird. Auch die energetische Nutzung von Biomasse im Industriesektor liegt deutlich höher als Anfang der 2020er Jahre. Eine solch starke Nutzung von Biomasse in der Industrie im Jahr 2045 ist trotz des begrenzten Potenzials nachhaltiger Biomasse in Deutschland möglich, indem deutlich weniger Biomasse (als noch in den 2020er Jahren) zur Wärmebereitstellung in Gebäuden und zur Strom- und Wärmeerzeugung in der Energiewirtschaft eingesetzt wird. In diesen Sektoren sind verschiedene klimaneutrale Alternativen verfügbar. Eine starke Verwendung der begrenzten Biomasse im Industriesektor und speziell in der chemischen Industrie wurde seit Mitte der 2020er Jahre aus Gründen des Klimaschutzes und der strategischen Unabhängigkeit der deutschen Industrie verfolgt.

Umstellung des Energiebedarfs der chemischen Industrie – Elektrifizierung als Schlüssel

Die Bereitstellung von Strom und Wärme für die Produktionsprozesse der chemischen Industrie erfolgt im Jahr 2045 klimaneutral und zu großen Teilen auf Basis von erneuerbarem Strom. Bei der Wärmeerzeugung kommen Elektrokessel und industrielle Wärmepumpen zum Einsatz. Die in den Steamcrackern benötigte Wärme wird im Jahr 2045 teilweise auch durch Strom bereitgestellt. Aufgrund der hohen Betriebskosten elektrischer Steamcracker werden zusätzlich auch noch konventionelle Steamcracker eingesetzt, die jedoch Mitte des Jahrhunderts nur noch mit nicht-fossilen Rohstoffen betrieben werden (insbesondere mit Pyrolyseöl aus dem chemischen Recycling) und zum Teil durch die biomassebasierte Methanol-Route ersetzt werden. Ein Großteil der im Produktionsprozess der Steamcracker entstehenden CO₂-Emissionen werden abgeschieden und anschließend einer geologischen Speicherung zugeführt. Auch an dieser Stelle können durch die CO₂-Abscheidung und -Speicherung negative Emissionen realisiert werden – soweit der Kohlenstoff dieser im Steamcracker eingesetzten Rohstoffe biogenen oder atmosphärischen Ursprungs ist.

Im Jahr 2045 benötigen die deutschen Chemiecluster deutlich größere Mengen an Strom und erneuerbaren Brennstoffen (insbesondere Wasserstoff), um die fossilen Brennstoffe und fossilen Rohstoffe zu ersetzen.

Fokussierung auf die in Deutschland verfügbaren Rohstoffe

Die Umstellung der Rohstoffbasis der chemischen Industrie in Deutschland primär auf Kunststoffabfälle und Biomasse ermöglicht es Deutschland, auch 2045 noch eine bedeutende chemische Industrie im Land zu haben. Dabei profitiert die chemische Industrie in Deutschland von dem guten Zugang zu Kunststoffabfällen, der sich aus dem großen westeuropäischen Markt bzw. der hohen Bevölkerungsdichte ergibt. Die vergleichsweise teure Produktion von Kunststoffen auf Basis von Biomasse ist im Jahr 2045 wirtschaftlich, weil die Kosten für die Nutzung fossiler Rohstoffe bis dahin deutlich erhöht wurden und die politischen Rahmenbedingungen auch den Aspekt der Resilienz bzw. Unabhängigkeit vom Ausland honorieren.

Die besonders energieintensive Produktion grüner Grundstoffe auf Basis von aus der Atmosphäre abgeschiedenem CO₂ und grünem Wasserstoff findet hingegen in anderen Teilen der Welt statt, die bessere Bedingungen für erneuerbare Energien aufweisen. Auch die energieintensive Ammoniakproduktion erfolgt in Deutschland im Jahr 2045 in deutlich kleinerem Maße als zu Beginn der 2020er Jahre, da sich die klimaneutrale Produktion auf Basis von grünem Wasserstoff in Deutschland im Jahr 2045 nicht lohnt. Aufgrund von Resilienz-Überlegungen (Ammoniak ist der zentrale Ausgangsstoff für Düngemittel) und mit Hilfe staatlicher Unterstützung werden aber auch 2045 noch gewisse Mengen an Ammoniak in Deutschland hergestellt.

Infrastruktur

Die Umstellung der chemischen Industrie auf neue Ausgangsstoffe und Produktionsverfahren stellt neue Anforderungen an die Infrastruktur. Zum einen besteht im Jahr 2045 ein hoher Bedarf an Wasserstoff für das chemische Recycling, die Aufwertung von Synthesegas aus der Biomasse-Gasifizierung und für die Erzeugung von Prozessdampf. Daher sind Anschlüsse an ein Wasserstoff-Netz für Standorte der chemischen Industrie erforderlich. Einige Standorte, insbesondere solche mit Steamcrackern und Anlagen zum chemischen Recycling, sind zusätzlich auch an ein CO₂-Pipeline-Netz angeschlossen, um das in diesen Anwendungen unvermeidbare CO₂ dauerhaft zu speichern und (aufgrund des zum Teil biomassebasierten Ursprungs der Rohstoffe) langfristig relevante Mengen an negativen Emissionen zu realisieren, die für das Erreichen von Klimaneutralität notwendig sein werden. Die Verwertung von Kunststoffabfällen und Biomasse erfordert zudem geeignete Sammel- und Transportinfrastrukturen, mit eher dezentralen und regionalen Strukturen. Darüber hinaus wird die Nachfrage nach Strom deutlich steigen, so dass neben dem (auch für andere Industriebranchen und Sektoren benötigten) Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung auch ausreichend dimensionierte Netzanschlüsse an den Standorten der chemischen Industrie erforderlich sind.

Unsicherheiten

Ähnlich wie im Stahlsektor besteht ein kritischer Punkt für die Industrie darin, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und gleichzeitig den Weg zu einer klimaneutralen Produktion einzuschlagen. Es wird insbesondere ein funktionierendes Geschäftsmodell für die Zeit gefunden werden müssen, in der konventionelle fossile und „grüne“ Produktion nebeneinander existieren. Chemische Produkte werden heute als Waren auf einem globalen Markt gehandelt, und während die „grünen“ und die konventionellen Produkte funktionell identisch sind, wird die „grüne“ Produktion erheblich

teurer sein, solange es nicht einen ausreichend hohen und global umfassenden CO₂-Preis gibt. Der Aufpreis müsste wahrscheinlich von den Verbraucher*innen getragen werden, was sowohl eine entsprechende Zahlungsbereitschaft erfordert, als auch Möglichkeiten zur Überprüfung, ob das Produkt tatsächlich „grün“ ist.

Unklar ist auch deswegen, ob die chemische Industrie in Deutschland trotz der grundsätzlichen Kostennachteile bei grünen Energieträgern und Rohstoffen gegenüber bestimmten anderen Weltregionen im Jahr 2045 eine ähnlich große Rolle spielen wird wie zu Beginn der 2020er Jahre. Dies hängt unter anderem von den zukünftigen industrie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen, dem Ausmaß staatlicher Unterstützungsmaßnahmen insbesondere während der Transformation, dem Ausmaß der Herauentwicklung eines globalen Marktes für klimaneutrale chemische Grundstoffe sowie der langfristigen Entwicklung der Produktionskosten verschiedener klimaneutraler Technologie-Routen ab. Die neuartigen Technologien werden gegenwärtig vielfach noch nicht in größerem Maße eingesetzt, weswegen ihre genauen Kosten und zukünftigen Kostensenkungspotenziale unsicher sind.

3.4 Zielvision für die Zementindustrie

Zemente⁷ und Betone sind auch im Jahr 2045 wichtige Baustoffe, die jedoch stärker als noch Mitte der 2020er Jahre durch andere Baustoffe (wie beispielsweise Holz) ergänzt werden.

Die Herstellung und Nutzung von Zementen in Betonen ist im Jahr 2045 dahingehend optimiert, dass leistungsfähige Betonbauten mit einer möglichst geringen Menge von energie- und CO₂-intensivem Zementklinker ermöglicht werden. Dies umfasst Schritte entlang der gesamten Wertschöpfungskette des Betonbaus: So erfolgt der Einsatz von Betonen dank verbesserter Planung von Gebäuden und Infrastruktur sowie innovativen Verfahren (wie Gradientenbeton und Hohlkörperdecken) materialeffizienter als noch in den 2020er Jahren, sodass die gleiche Bauleistung mit weniger Beton erbracht werden kann. Zudem erfolgt der Einsatz von Zementen in Betonen effizient mit Blick auf den energie- und CO₂-intensiven Zementklinker, unter anderem mit Hilfe innovativer Betonzusatzmittel und einer weiter optimierten Zusammensetzung von Betonen (zum Beispiel optimierte Korngrößenverteilung verschiedener Betonbestandteile). Schließlich wird für die Herstellung von Zementen im Jahr 2045 auch eine Vielzahl von weiteren (über Zementklinker hinausgehenden) Hauptbestandteilen eingesetzt – insbesondere kalzinierte Tone sind zentral.

Zementklinker wird jedoch auch im Jahr 2045 weiterhin benötigt. Die erforderliche Menge liegt in Deutschland aber rund 40 bis 50 % unter der zu Beginn der 2020er Jahre nachgefragten Menge (bei nahezu gleicher Bautätigkeit, siehe Abbildung 3-2).⁸

⁷ Im Folgenden wird „Zemente“ aus Gründen der Lesbarkeit sowohl für Zemente unter Verwendung konventionell hergestellten Zementklinkers als auch für neue Bindemittel verwendet. „Neue Bindemittel“ sind zementartige Bindemittel, die in Betonen analog zu Zementen eingesetzt werden, jedoch entweder keinen konventionellen Zementklinker enthalten oder diesen in gänzlich anderen Verfahren herstellen. Wo es aus inhaltlichen Gründen sinnvoll ist, wird jedoch genauer spezifiziert.

⁸ Aufgrund der starken Innovationsdynamik im Zement- und Betonsektor ist diese Einschätzung mit hohen Unsicherheiten verbunden.

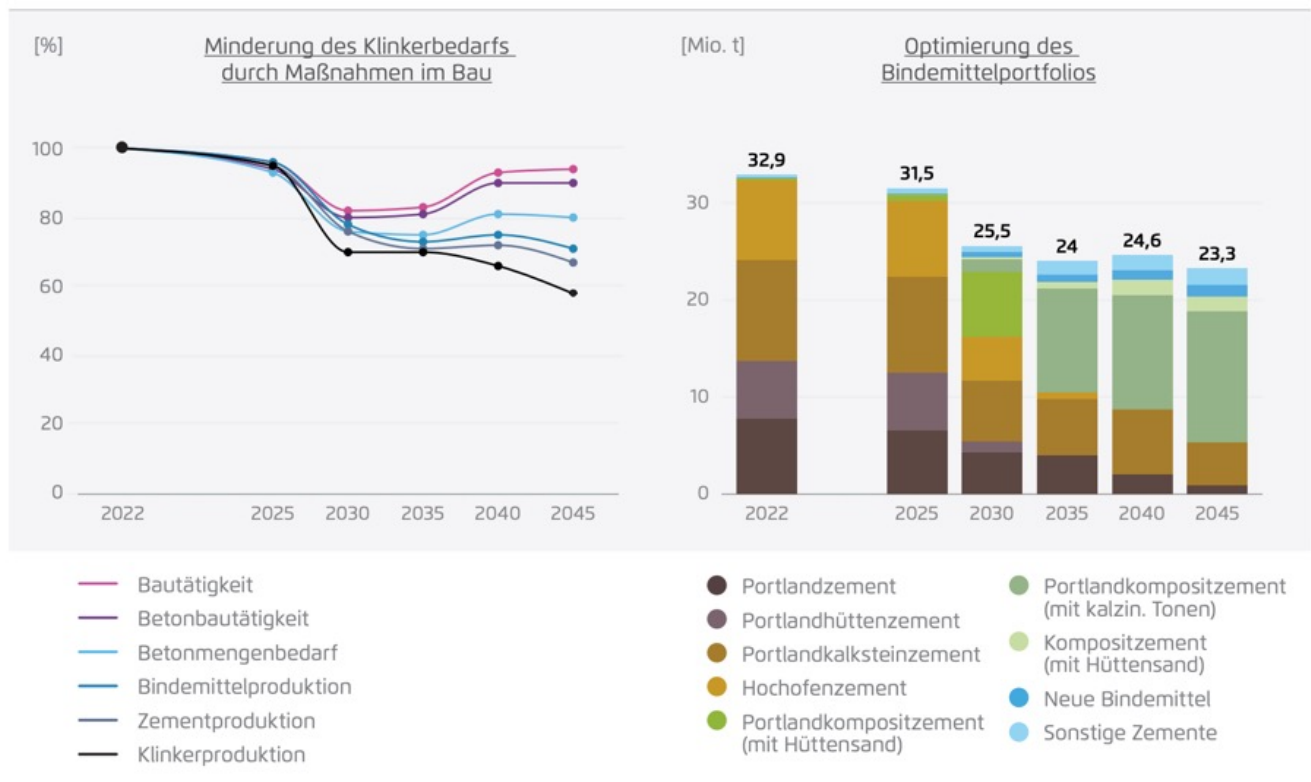


Abb. 3-2 Minderung des Zementklinkerbedarfs bis 2045 durch Maßnahmen im Bau (links) und Optimierung des Bindemittelportfolios (rechts), Szenario KND-Umsetzung

Quelle: Agora Think Tanks et al. (2024), unter Verwendung der CC BY Lizenz.

Für die Herstellung von Zementklinker wird auch im Jahr 2045 Prozesswärme auf einem hohen Temperaturniveau benötigt – das Material muss auf ca. 1650 °C erhitzt werden. Diese Prozesswärme wird im Jahr 2045 überwiegend durch abfallbasierte Brennstoffe erzeugt. Hierfür werden nur solche Abfälle genutzt, die nicht anderweitig recycelt werden können – auch nicht durch innovative Verfahren wie chemisches Recycling. Die Verbrennungsaschen werden zu einem Teil des Zementklinkers und somit stofflich genutzt, eine Deponierung ist nicht erforderlich. Die genutzten Abfallstoffe enthalten auch biogenen Kohlenstoff. Dort, wo regional nicht genügend abfallbasierte Brennstoffe verfügbar sind, wird ergänzend nachhaltig erzeugte Biomasse eingesetzt (was im Zusammenspiel mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) negative Emissionen ermöglicht, siehe unten) oder aber die Prozesswärmebereitstellung ist (teil-)elektrifiziert.

Mit der für die Zementklinkerherstellung notwendigen Entsäuerung des Kalksteins gehen relevante prozessbedingte, nicht-vermeidbare CO₂-Emissionen einher. Da der Zementklinkerbedarf 2045 zwar deutlich reduziert, aber immer noch in relevanter Größenordnung gegeben ist, spielt die Abscheidung und Speicherung von CO₂ eine wichtige Rolle, um auch in der Zementindustrie Klimaneutralität erreichen zu können. Das abgeschiedene CO₂ wird im Jahr 2045 durch eine leistungsfähige CO₂-Pipeline-Infrastruktur von den in ganz Deutschland verteilten Zementwerken zu verschiedenen Nordsee-Häfen transportiert, wo es über Schiffe zu verschiedenen geologischen CO₂-Lagerstätten unter der Nordsee gebracht wird.

Das energiebedingt entstehende CO₂ der Zementherstellung stammt 2045 nicht mehr aus fossilen Energieträgern, sondern nur noch aus Ersatzbrennstoffen (vor allem Abfällen) oder biogenen Brennstoffen. Auch dieses energiebedingte CO₂ wird im Jahr 2045 zusammen mit dem prozessbedingten CO₂ durch den Einsatz von CCS weitgehend abgefangen und dauerhaft geologisch gespeichert. Durch den Einsatz biogener Brennstoffe und aufgrund biogener Kohlenstoffanteile in den als Brennstoff genutzten Abfallstoffen können durch die CO₂-Abscheidung und -Speicherung sogar negative Emissionen erzielt werden, so dass die Zementindustrie 2045 trotz unvermeidbarer Restemissionen (aus technischen und ökonomischen Gründen können nicht 100 % des entstehenden CO₂ abgeschieden werden) unter dem Strich sogar leicht negative Emissionen aufweist.

Trotz der bis 2045 erreichten deutlichen Fortschritte bei der Reduktion des Zement- und Betonbedarfs und der Umstellung auf eine CO₂-ärmere Zementherstellung müssten ohne CO₂-Abscheidung und -Speicherung mangels alternativer Möglichkeiten der Emissionsvermeidung rund 10 Mt CO₂ zusätzlich in die Atmosphäre emittiert werden. Dies entspricht etwa der Hälfte der Anfang der 2020er Jahre jährlich entstandenen CO₂-Emissionen der Zementindustrie und rund 6 % der damaligen gesamten Treibhausgasemissionen des Industriesektors.

Aufgrund des rückläufigen Zementklinkerbedarfs ist im Jahr 2045 die Anzahl der Zementwerke kleiner als Mitte der 2020er Jahre. Unter anderem haben die geographische Lage der Zementwerke und die damit zusammenhängenden Kosten für den Anschluss an das CO₂-Pipelinennetz darüber entschieden, welche Standorte auch 2045 noch in Betrieb sind. Bezüglich der Anzahl der Beschäftigten in der Zementindustrie hat zwar auf der einen Seite der Rückgang der Produktion und eine zunehmende Automatisierung einen mindernden Effekt gehabt, dieser wurde aber teilweise kompensiert (wenn auch mit einem teils abweichenden Bedarf an Qualifikationsprofilen) durch die zusätzliche Anlagentechnik, die 2045 an den Standorten aufgrund der notwendigen CO₂-Abscheidung betrieben wird. Zudem wurden bis 2045 zusätzliche Arbeitsplätze und Wertschöpfung im Bereich des Transports und der Speicherung von CO₂ geschaffen, ebenso bei der Herstellung von weiteren (über Zementklinker hinausgehenden) Hauptbestandteilen, vor allem von kalzinierten Tonen.

Unsicherheiten

Die zukünftigen Potenziale neuer Bindemittel und Betone, bei deren Produktion deutlich weniger CO₂ entsteht als bei der Herstellung von konventionellem Zementklinker und Beton, sind aus heutiger Sicht sehr schwierig abzuschätzen. Die hier angenommenen Potenziale könnten sich beispielsweise bis 2045 als zu pessimistisch erweisen. Ähnliches gilt für neue, betonsparende Bautechniken.

4 Beiträge der Industrie-Transformation zu zentralen gesellschaftlichen Zielen

In diesem Kapitel wird (qualitativ) dargestellt, welche Auswirkungen eine erfolgreiche Industrie-Transformation auf verschiedene gesellschaftlich relevante Bereiche und Ziele haben könnte. Dabei wird in Abschnitt 4.1 auf den potenziellen Beitrag der Transformation auf das Erreichen der deutschen und globalen Klimaschutzziele eingegangen, bevor in Abschnitt 4.2 der Beitrag zur Sicherung von Beschäftigung und Wertschöpfung thematisiert wird. In Abschnitt 4.3 wird diskutiert, inwieweit eine erfolgreiche Industrie-Transformation auch die Resilienz der deutschen Wirtschaft stärken kann, bevor abschließend in Abschnitt 4.4 auf die Auswirkungen der Transformation auf den Natur- und Landschaftsschutz eingegangen wird.

4.1 Beitrag zum Erreichen der deutschen und globalen Klimaziele

Wie im Exkurs (Kapitel 8) dargestellt, machen die direkten Treibhausgasemissionen des Industriesektors gegenwärtig rund ein Viertel der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen aus. Eine erfolgreiche Transformation der deutschen Industrie in Richtung klimaneutraler Produktionsprozesse ist daher von großer Bedeutung und unabdingbar für das Erreichen des Ziels der Klimaneutralität bis 2045.

Bei einem reinen Blick auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen Deutschlands ließe sich darauf verweisen, dass entscheidend für die Eindämmung des Klimawandels primär die zügige Reduktion der *globalen* Treibhausgasemissionen ist. Zwar machten im Jahr 2023 die direkten Treibhausgasemissionen der deutschen Industrie nur rund 0,3 % der gesamten globalen Treibhausgasemissionen aus (und ca. 1,4 % der Emissionen der weltweiten Industrieproduktion) (JRC 2024, UBA 2024a), aber erstens ist für den globalen Klimaschutz der Beitrag aller Länder und Sektoren wichtig, und zweitens ist zu berücksichtigen, dass eine erfolgreiche Transformation der deutschen Industrie in Richtung Klimaneutralität auch positive Auswirkungen auf die Reduktion industrieller Emissionen in anderen Ländern der Welt haben kann.

So könnte Deutschland zum einen in anderen Ländern der Welt als Inspirationsgeber in klima- und industriepolitischen Diskussionen dienen, wenn hierzulande gezeigt werden kann, dass ein Industrieland wie Deutschland die Treibhausgasemissionen seiner Industrie zügig und konsequent in Richtung Netto-Null senken kann, ohne auf eine starke Industrie verzichten zu müssen. Zum anderen können neue, klimaneutrale Technologien und Prozesse für den Industriesektor, die in Deutschland – einhergehend mit einem nicht unerheblichen Investitionsaufwand – frühzeitig eingesetzt und im Zuge einer zunehmenden Verbreitung und Hochskalierung weiterentwickelt werden, anschließend in hoher Qualität und (aufgrund von Lerneffekten) zu günstigeren Kosten auch in anderen Ländern eingesetzt werden.⁹ Aufgrund dieser Zusammenhänge ist davon auszugehen, dass die Bemühungen in Deutschland zur Transformation der heimischen Industrie auch relevante positive Auswirkungen auf die Minderung industrieller Treibhausgasemissionen im Rest der Welt haben wird.

⁹ In ähnlicher Weise hat Deutschland insbesondere in den 2000er und 2010er Jahre mit dem frühzeitigen Zubau von Wind- und Solarenergie wesentlich dazu beigetragen, die Kosten dieser Technologien weltweit zu senken und den Ausbau in anderen Ländern – zum Nutzen des globalen Klimaschutzes – dadurch zu beschleunigen (Buchholz et al. 2019).

4.2 Sicherung von Beschäftigung und Wertschöpfung

Die Umstellung der deutschen Industrie auf eine klimaneutrale Produktion ist eine zentrale Voraussetzung dafür, dass industrielle Beschäftigung und Wertschöpfung in Deutschland langfristig gesichert werden können. Denn die industrielle Produktion auf Basis fossiler Energieträger wird insbesondere aufgrund der immer weiter abnehmenden und nach gegenwärtiger Regulierung bereits um das Jahr 2040 null erreichenden Menge an Zertifikaten im europäischen Emissionshandel (Packroff 2024) immer teurer. Falls der Umstieg auf klimaneutrale Produktionsprozesse unterbleiben sollte, würde die deutsche Industrie folglich aufgrund des absehbar weiter steigenden CO₂-Preises ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit verlieren.

Eine Lockerung oder sogar Beendigung des europäischen Emissionshandels ist dabei keine Option. Zum einen ist ein solcher Schritt politisch gegenwärtig nicht absehbar und wäre angesichts der dramatischen Folgen eines ungebremsten Klimawandels auch nicht zu verantworten. Zum anderen gilt: Selbst wenn die deutsche Industrie zukünftig keine CO₂-Kosten mehr zu tragen hätte, wäre es angesichts der (relativ zu vielen anderen Weltregionen) hohen Kosten fossiler Energieträger und hohen Arbeitskosten sowie der in den letzten Jahrzehnten gewachsenen konkurrierenden Produktionskapazitäten im Ausland (nicht zuletzt in China) äußerst fragwürdig, ob sie ihre Wettbewerbsfähigkeit erhalten könnte.

Die Transformation der deutschen Industrie in Richtung Klimaneutralität ist folglich die einzige realistische Chance, um mittel- bis langfristig industrielle Beschäftigung und Wertschöpfung in Deutschland zu erhalten. Verschiedene techno-ökonomische Szenariostudien halten es für möglich, dass Deutschland auch in einer klimaneutralen Zukunft ein starker Industriestandort bleibt (Agora Think Tanks et al. 2024, Fraunhofer ISI et al. 2024, BCG/BDI 2021). Die Studien machen aber auch deutlich, dass dies kein Automatismus ist, sondern förderliche Rahmenbedingungen seitens der Politik gesetzt werden müssen, um industrielle Produktion in Deutschland zu erhalten (siehe auch Abschnitt 6.2). Hierzu gehört nicht zuletzt ein dynamischer weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa, ausreichend schnell verfügbare Wasserstoff- und CO₂-Pipelinenetze und eine enge Kooperation mit den europäischen Nachbarländern – unter anderem beim Aufbau der benötigten Infrastrukturen und bei der optimalen Nutzung der europaweit vorhandenen Erneuerbaren-Potenziale.

4.3 Stärkung der Resilienz der deutschen Wirtschaft

Ein klimaneutrales Deutschland ist grundsätzlich auch ohne eine starke Industrie denkbar. Mit Verweis auf die vielfach besseren Erneuerbaren-Bedingungen in anderen Weltregionen könnte argumentiert werden, dass sich insbesondere die energieintensiven Industriezweige in einer klimaneutralen Zukunft besser aus Deutschland zurückziehen sollten. Abgesehen von den negativen Auswirkungen eines solchen Rückzugs auf Beschäftigung und gesellschaftlichen Zusammenhalt ist einer solchen Argumentation entgegenzuhalten: Eine starke und diversifizierte inländische Industrie, die auch weiterhin energieintensive Grundstoffe produziert, stärkt die Resilienz der deutschen Wirtschaft gegenüber zukünftigen externen Schocks. So wäre die weiterverarbeitende Industrie in Deutschland bei nur noch sehr eingeschränkter heimischer Grundstoffproduktion weitgehend von Grundstoffimporten abhängig, die in

Krisensituationen über kurze oder auch längere Zeiträume eingeschränkt sein könnten – mit potenziell sehr negativen Auswirkungen auf die deutsche Wirtschaft.

Mehrere Hauptstrategien für eine erfolgreiche Industrie-Transformation stärken in besonderer Weise die Resilienz der deutschen Wirtschaft: Die Umstellung großer Teile des Prozesswärmebedarfs von fossilen (ganz überwiegend importierten) Energieträgern auf inländisch (und europäisch) erzeugten erneuerbaren Strom senkt die Abhängigkeit Deutschlands vom außereuropäischen Ausland. Und insbesondere Fortschritte bei der Kreislaufwirtschaft fördern in hohem Maße die Resilienz: Minderungen des Primärmaterialbedarfs durch mehr Materialeffizienz, längere und intensivere Produktnutzungen und das konsequente Recycling von Altmaterialien kann den Bedarf an importierten Ressourcen drastisch reduzieren und somit die strategische Unabhängigkeit Deutschlands stärken.

4.4 Natur- und Landschaftsschutz

Die Auswirkungen der Industrie-Transformation auf den Natur- und Landschaftsschutz sind vielschichtig und wurden bisher noch nicht systematisch untersucht. Im Folgenden werden daher die grundsätzlich zu erwartenden Auswirkungen qualitativ beschrieben. Eine detaillierte Bewertung ist auch deshalb schwierig, weil die genaue Umsetzung der Industrie-Transformation in starkem Maße über die Intensität der Auswirkungen entscheiden wird.

Positive Auswirkungen: Der wichtige Beitrag einer erfolgreichen Industrie-Transformation auf die Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland und weltweit (siehe Abschnitt 4.1) kann den Klimawandel deutlich abschwächen und somit indirekt zum Schutz von Ökosystemen beitragen, die von steigenden Temperaturen, Extremwetterereignissen und anderen Folgen der Erderwärmung bedroht sind. Zudem reduziert der Umstieg auf erneuerbare Energien und klimaneutrale Produktionsprozesse die Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzung, was sich positiv auf Flora und Fauna auswirkt. Durch die Reduzierung von Umweltbelastungen, die mit der Gewinnung und dem Transport fossiler Energieträger einhergehen, werden Ökosysteme geschützt bzw. bereits belastete Ökosysteme können sich erholen.

Negative Auswirkungen bzw. Herausforderungen: Der für die Deckung des industriellen Energiebedarfs notwendige weitere Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere der Wind- und Solarenergie, kann zu Konflikten mit dem Naturschutz führen und Lebensräume bzw. Ökosysteme beeinträchtigen. Auch die Errichtung neuer Industrieanlagen und Infrastrukturen für klimaneutrale Technologien kann Auswirkungen auf Lebensräume und Ökosysteme haben. Zudem erfordert die Herstellung von Windenergieanlagen, Photovoltaik-Anlagen, Batterien und anderen grünen Technologien den Abbau von Rohstoffen in erheblichem Umfang, was Ökosysteme belastet – auch wenn dadurch auf der anderen Seite der Abbau fossiler Energieträger vermindert wird. Einige klimaneutrale Technologien, wie die Wasserstoffproduktion, können zudem zu einem erhöhten Wasserbedarf führen und negative Auswirkungen auf lokale oder regionale Wasserressourcen haben.

Um die potenziellen negativen Effekte der Industrie-Transformation auf den Natur- und Landschaftsschutz zu minimieren, wird es in den kommenden Jahren von großer Bedeutung sein, bei der politischen Ausgestaltung der Energie- und Industrie-

Transformation die Belange des Naturschutzes stets zu berücksichtigen. So sollte bei dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien, der Errichtung klimaneutraler industrieller Produktionsanlagen sowie bei dem Aufbau der notwendigen Infrastruktur (unter anderem hinsichtlich des Wasserstoff- und CO₂-Netzes) stets geprüft werden, wie negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft minimiert werden können.

Hierfür sind nicht zuletzt die folgenden Instrumente und Strategien von Bedeutung:

- **Integrierte und koordinierte Planung:** Bei der Standortwahl für neue Industrieanlagen, Infrastrukturen und Erneuerbare-Energien-Anlagen sollten Naturschutzbelange von Anfang an einbezogen werden.
- **Flächeneffizienz:** Die Mehrfachnutzung von Flächen sollte gefördert werden, beispielsweise indem Industriebrachen bei der Standortwahl neuer Industrieanlagen primär in den Blick genommen werden.
- **Umwidmung vorhandener Infrastrukturen:** Vorhandene Infrastrukturen (zum Beispiel Pipelines oder Hafenanlagen) sollten soweit wie möglich weiter genutzt werden, um den Bedarf an neuen Investitionen „auf der grünen Wiese“ zu reduzieren.
- **Biodiversitätsförderung:** Maßnahmen zur Förderung der biologischen Vielfalt sollten soweit wie möglich in Industrieprojekte integriert werden, wie beispielsweise die Schaffung von Biotopverbünden.
- **Kreislaufwirtschaft:** Die Materialeffizienz und die Wiederverwendung von Ressourcen sollten gestärkt werden, um den Abbau von Primärrohstoffen so weit wie möglich zu reduzieren.
- **Suffizienz:** Politische Rahmenbedingungen sollten so angepasst werden, dass sie suffiziente Lebensstile befördern, um nicht nur Energie, sondern auch Ressourcen einzusparen (siehe auch Info-Kasten 6.1).
- **Wassermanagement:** Wassersparende Technologien in der Industrie sollten entwickelt und implementiert werden.
- **Naturverträgliche Energiewende:** Die Auswahl von Windenergieflächen sollte sorgfältig erfolgen und Dachflächen- bzw. gebäudeintegrierter Photovoltaik sowie Agri-Photovoltaik sollte grundsätzlich gegenüber Freiflächen-Photovoltaik priorisiert werden, um den Flächenverbrauch zu minimieren.
- **Kompensationsmaßnahmen:** Für unvermeidbare Eingriffe in die Natur im Zuge der Industrie-Transformation sollten ökologische Ausgleichsmaßnahmen durchgeführt werden.

Die Transformation zur klimaneutralen Industrie bis 2045 stellt eine enorme Herausforderung dar, bietet aber auch Chancen für einen nachhaltigen Umbau der Wirtschaft. Durch sorgfältige Planung und die Berücksichtigung von Natur- und Landschaftsschutzaspekten kann Deutschland nicht nur seine Klimaziele erreichen, sondern auch zu einem Vorreiter für naturverträgliche Industrieentwicklung werden.

5 Strukturwandel der Industrie im Zuge der Transformation

Auf dem Weg zur Umsetzung der in Kapitel 3 beschriebenen Vision einer klimaneutralen Industrie ist zu beachten, dass sich der Industriesektor in den kommenden zwei Jahrzehnten in verschiedener Hinsicht verändern wird. Daher wird in diesem Kapitel auf wichtige absehbare strukturelle Veränderungen eingegangen. Zum einen ist bis 2045 gegenüber heute mit einem erheblichen Bedeutungsgewinn der Kreislaufwirtschaft zu rechnen (Abschnitt 5.1). Auch verschiedene für das Erreichen von Klimaneutralität unverzichtbare Technologien (wie Batterien oder Elektrolyseure) werden auf den internationalen Märkten wesentlich an Bedeutung gewinnen, wovon zum Teil auch die deutsche Industrie profitieren könnte (Abschnitt 5.2). Auf der anderen Seite ist es durchaus möglich, dass sich in Deutschland in den kommenden Jahren deutliche Produktionsrückgänge in einzelnen energieintensiven Branchen ergeben werden, nicht zuletzt infolge einer schlechteren internationalen Wettbewerbsfähigkeit aufgrund des so genannten „Renewables-Pull“-Effekts, also der Tatsache, dass in einigen Regionen der Welt die Kosten für die Bereitstellung grüner Energieträger für die industrielle Produktion deutlich niedriger liegen als in Deutschland (Abschnitt 5.3).

5.1 Wachsende Bedeutung der Kreislaufwirtschaft

Die Stärkung der Kreislaufwirtschaft (Definition siehe Info-Kasten 5-1) gilt als wichtige Strategie, um die deutsche Industrie langfristig klimaneutral und resilient zu gestalten. Insbesondere in der Grundstoffindustrie können Kreislaufstrategien einen signifikanten Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen leisten, da durch die Schließung von Stoffkreisläufen die Ressourcen- und Energieeffizienz deutlich gesteigert und gleichzeitig der Anteil der besonders energieintensiven Primärproduktion gesenkt werden kann.

Info-Kasten 5-1 Definition „Kreislaufwirtschaft“

Die Kreislaufwirtschaft zielt auf die Entwicklung eines Wirtschaftssystems ab, das Klimabelastungen und Ressourcenverbrauch minimiert, indem es den Lebenszyklus von Produkten verlängert und Abfälle auf ein Minimum reduziert.

Die in Abbildung 6-1 (siehe Kapitel 6) aufgeführten Strategien im Bereich „Minderung der Nachfrage nach Primärmaterialien“ sind für Fortschritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft zentral. Konkret kann das Design von Produkten so angepasst werden, dass diese deutlich stärker als heute auf eine lange Lebensdauer, einfache Reparierbarkeit und hohe Recyclingfähigkeit ausgelegt werden. Produkte könnten zudem intensiver genutzt (zum Beispiel durch „Car-Sharing“) oder wiederverwendet werden (zum Beispiel durch den Verkauf auf Gebrauchtmärkten). Defekte Produkte könnten verstärkt repariert und am Ende ihrer Lebensdauer aufbereitet und einem möglichst umfassenden Recycling von Materialien zugeführt werden.

Durch Fortschritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft können Treibhausgasemissionen reduziert werden, indem der Bedarf an Primärrohstoffen, Zwischen- und Endprodukten – und den damit verbundenen Produktionsprozessen – vermindert wird. Die Herstellung von recycelten Grundstoffen (wie zum Beispiel Sekundärstahl) geht zudem in der Regel mit einem niedrigeren Energiebedarf und deutlich niedrigeren CO₂-Emissionen gegenüber der Produktion von Primärgrundstoffen einher.

Vorliegende Studien (BMU 2021, DIHK 2024) gehen davon aus, dass die Kreislaufwirtschaft in Deutschland – wie auch weltweit – aufgrund des zunehmenden Drucks zur Minderung von Treibhausgasemissionen und wachsender Bemühungen zur Reduktion des Bedarfs an kritischen Ressourcen zukünftig eine deutlich größere Rolle spielen wird. Insbesondere Dienstleistungen und Infrastruktur im Bereich der Abfallsammlung, des Abfalltransports und der Abfalltrennung sowie Verfahren zur stofflichen Verwertung von Abfällen könnten an Bedeutung gewinnen. Konkret wird erwartet, dass zukünftig unter anderem das Recycling von Batterien und verstärktes mechanisches sowie chemisches Recycling von Kunststoffen eine wichtige Rolle in der deutschen Wirtschaft spielen werden.

Einer aktuellen Studie der Deutschen Industrie- und Handelskammer (DIHK 2024) zufolge sehen die deutschen Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes die Entwicklung hin zu einer zirkulären Wirtschaft mehrheitlich (54 %) primär als eine Chance für ihr bisheriges Geschäftsmodell. Die befragten Unternehmen halten dabei durch Fortschritte in der Kreislaufwirtschaft Material- und Kosteneinsparungen sowie eine höhere Resilienz des eigenen Unternehmens für möglich. Zudem sehen sie in der Kreislaufwirtschaft die Möglichkeit, ihre Beiträge zum Umwelt- und Klimaschutz zu erhöhen. Einige Unternehmen gehen zudem davon aus, dass durch eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft neue Geschäftsmodelle für sie entstehen können.

Durch Fortschritte in Richtung einer verstärkten Kreislaufführung von Ressourcen kann die deutsche Wirtschaft zukünftig zum einen resilienter hinsichtlich globaler Störungen von Lieferketten werden, zum anderen können entsprechende Fortschritte dazu führen, Teile der industriellen Produktion überhaupt noch in Deutschland zu halten. Eine stärkere Fokussierung auf die Kreislaufwirtschaft könnte auch dazu führen, dass einer Verlagerung insbesondere der energieintensiven Industrie ins Ausland entgegengewirkt wird. Eine solche Verlagerung von Teilen der Industrie wird aufgrund der auch perspektivisch voraussichtlich niedrigeren „grünen“ Energiekosten in vielen anderen Regionen der Welt für plausibel gehalten (siehe Abschnitt 5.3). Eine stärkere Fokussierung auf das weniger energieintensive Recycling vorhandener Grundstoffe könnte die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Grundstoffindustrie und in der Folge auch der nachgelagerten Wertschöpfungsstufen erhöhen.

In den besonders energie- und CO₂-intensiven Branchen der Stahl-, Chemie- und Zementindustrie können Fortschritte in der Kreislaufführung von Materialien zu besonders hohen Emissionsminderungen führen. Im Folgenden werden daher die Potenziale zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft in diesen Branchen hervorgehoben.

Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie

Die Stahlindustrie ist traditionell stark von Primärrohstoffen und energieintensiven Prozessen abhängig – gleichzeitig findet mit der etablierten Sekundärstahlroute bereits eine Kreislaufwirtschaft in relevantem Umfang statt, die in Deutschland gegenwärtig bereits rund 30 % der produzierten Stahlmenge ausmacht (WV Stahl 2024). Stahl kann grundsätzlich beliebig oft recycelt werden und mit jeder neu produzierten Tonne Primärstahl steigt – früher oder später – auch die verfügbare Menge an Stahlschrott. Durch weitere Maßnahmen könnte die Stahlindustrie aber noch einen deutlich größeren Schritt in Richtung einer Kreislaufwirtschaft leisten:

- **Produktlebenszyklus-Verlängerung:** Durch die Entwicklung von langlebigeren Produkten und besseren Wartungsstrategien kann die Notwendigkeit für neue Stahlprodukte verringert werden.
- **Design-for-Recycling:** Produkte können so gestaltet werden, dass sie am Ende ihres Lebenszyklus einfacher zerlegt und recycelt werden können, was die Materialrückgewinnung maximiert und Abfälle minimiert.

Eine wesentliche Herausforderung im Recycling von Stahlschrott besteht in der Qualität der Schrotte, denn Verunreinigungen beispielsweise durch Kupfer können erhebliche Auswirkungen auf die Materialeigenschaften des recycelten Stahls haben, weshalb ein Großteil der verfügbaren Stahlschrotte nur für minderwertige Stahlgüten eingesetzt werden kann und nur auf diese Anwendungen beschränkt ist. Verbesserte Sammel-, Sortier- und Aufbereitungsprozesse, sowie verbindliche Standards könnten dabei helfen, dieses als „Downcycling“ bezeichnete Recycling zu minimieren und mehr Stahlschrott auch für höherwertige Stahlgüten zur Verfügung zu stellen. Aufgrund einer für Deutschland erwarteten sinkenden Stahlnachfrage und einem verbesserten Recycling kann der Anteil der Sekundärstahlproduktion vorliegenden Szenarien zufolge zukünftig gesteigert werden – auch wenn nur in einem gewissen Maße.

Kreislaufwirtschaft in der chemischen Industrie

Vorliegende Studien sehen ein beträchtliches Potenzial für ein – gegenüber heute – deutlich verstärktes Recycling von Kunststoffen (UBA 2021, Agora Industry 2022). Auf diese Weise ließen sich der Energiebedarf sowie der (Primär-) Rohstoffbedarf der chemischen Industrie deutlich verringern und auch Minderungen der Treibhausgasemissionen erzielen. Generell gilt – wie bereits in Info-Kasten 3-1 erwähnt: Wann immer es möglich ist, neue Kunststoffe durch mechanisches (werkstoffliches) Recycling herzustellen, ist dies sowohl aus stofflicher als auch aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht alternativen Produktionswegen vorzuziehen. Ein verstärktes mechanisches Recycling spielt daher im Zielbild der chemischen Industrie eine zentrale Rolle, auch wenn das Recycling im engeren Sinne nicht zur chemischen Industrie, wie sie heute definiert ist, gehört. Um das volle Potenzial des mechanischen Recyclings auszuschöpfen, müssen die bestehenden Recycling-Verfahren, einschließlich der Abfalltrennung, Sammlung, Sortierung, Vorbehandlung und Verwertung von Kunststoffabfällen, optimiert werden. Durch die Umsetzung von „Design-for-Recycling“-Maßnahmen kann ein effizientes mechanisches Recycling bereits zu Beginn des Lebenszyklus von Kunststoffprodukten mitgedacht werden. Beispiele für derartige Maßnahmen sind die einfache Demontage für die Materialsortierung, die Verwendung einzelner Polymere anstelle von Mischungen, durchsichtige oder hellere Kunststoffe und die Vermeidung von Zusatzstoffen, die das Recycling erschweren.

Für Kunststoffaltmaterialströme, die nicht mechanisch recycelt werden können, sollte zukünftig möglichst auf chemisches Recycling gesetzt werden. Das chemische Recycling ist zwar in der Regel ressourcen- und energieintensiver als das mechanische Recycling, aber im Gegensatz zum mechanischen Recycling können hierbei stets neue Produkte von gleicher Qualität (wie bei der Produktion auf Basis von Primärgrundstoffen) hergestellt werden (siehe auch Info-Kasten 3-1).

Eine Studie im Auftrag von Agora Industrie aus dem Jahr 2022 (Agora Industry 2022) identifiziert für Europa bis 2050 ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Recyclingraten von Kunststoffabfällen. In dem „High Circularity“-Szenario der Studie wird 2050 ein Großteil der anfallenden Kunststoffabfälle entweder mechanisch oder chemische recycelt, mit einer etwa hälftigen Aufteilung beider Recycling-Methoden (vgl. Abbildung 5-1). In einem solchen Szenario müssten im Jahr 2050 deutlich geringere Mengen thermisch verwertet werden als dies heute der Fall ist.¹⁰

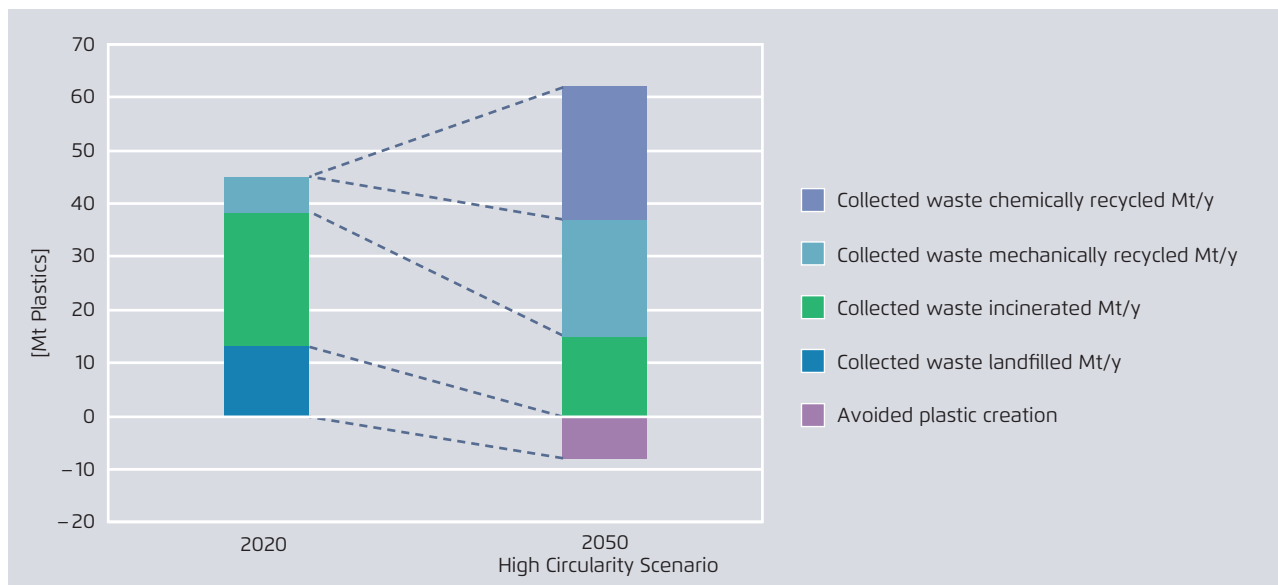


Abb. 5-1 Verwertung von Kunststoffabfällen in der Europäischen Union im Jahr 2020 und nach dem „High Circularity Szenario“ im Jahr 2050

Quelle: Agora Industry (2022), unter Verwendung der CC BY Lizenz.

Kreislaufwirtschaft in der Zementindustrie

Die Zementindustrie ist eine der größten Quellen für industrielle nicht-vermeidbare CO₂-Emissionen. Durch die Implementierung von Kreislaufwirtschaftsstrategien können diese Emissionen erheblich gesenkt werden:

- **Ersatzstoffe und Recycling:** Der Einsatz von Sekundärrohstoffen wie Flugasche, Hüttensand und recyceltem Beton als Ersatz für Zementklinker kann die CO₂-Intensität der Zementproduktion senken. Diese Materialien benötigen weniger Energie zur Verarbeitung und tragen zur Verringerung der Abhängigkeit von natürlichen Rohstoffen bei.
- **Kohlenstoffabscheidung und -nutzung (CCU):** CO₂, das bei der Zementproduktion entsteht, kann eingefangen und für die Herstellung anderer Produkte wie synthetische Kraftstoffe oder Chemikalien genutzt werden. Dies verringert die Nettoemissionen der Zementindustrie. Die Auswirkungen auf die Nettoemissionen des Gesamtsystems hängen von Substitutionseffekten ab und müssen im konkreten Fall betrachtet werden.

¹⁰ Ohne Maßnahmen zur Steigerung der Recyclinganteile könnten der Studie zufolge in der EU die CO₂-Emissionen der Kunststoffverbrennung von gegenwärtig rund 70 Mt CO₂ auf bis zu 112 Mt im Jahr 2050 ansteigen. Die Autor*innen der Studie ergänzen in Hinblick auf die zukünftige Bedeutung des chemischen Recyclings: „Absent large-scale chemical recycling, it is difficult to see how to eliminate these CO₂ emissions in a climate-neutral way.“ (Agora Industry 2022, S. 36)

- Lebensdauerverlängerung und Wiederverwendung: Durch die Verbesserung der Lebensdauer von Betonbauwerken und die Förderung von Rückbau- und Wiederverwendungstechnologien können Materialien effizienter genutzt und Abfälle reduziert werden.

5.2 Bedeutungsgewinn von Transformationstechnologien

Bestimmte Technologien werden für die in den kommenden Jahren und Jahrzehnten anstehende Transformation der deutschen, europäischen und globalen Wirtschaft in Richtung Klimaneutralität von hoher Bedeutung sein. Laut einer Studie von Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut (Prognos et al. 2023) spielen auf dem Weg zur Klimaneutralität sieben Schlüsselindustrien eine besonders große Rolle: Photovoltaik, Windkraft, Lithium-Ionen-Batterien für Elektromobilität, Permanentmagnete für Elektromobilität und Windkraft, Elektrolyseure für grünen Wasserstoff, Wärmepumpen, sowie grüne Stahlerzeugungsanlagen (Direktreduktionsanlagen). Die Weltmärkte für diese Technologien werden voraussichtlich stark wachsen (UBA 2024d). Für Deutschland – wie auch für andere Länder – stellt sich die Frage, welche Rolle es zukünftig auf den Weltmärkten für solche Klimaschutztechnologien einnehmen wird. Hohe Marktanteile bei diesen Technologien könnten zukünftig wesentlich zu Wertschöpfung und Arbeitsplätzen beitragen und mögliche Verluste in anderen Bereichen (wie der fossilen Energiewirtschaft) kompensieren. Darüber hinaus könnte eine starke Stellung Deutschlands bei diesen Zukunftstechnologien die Unabhängigkeit vom Ausland in perspektivisch wichtiger werdenden Bereichen der Wirtschaft stärken (siehe auch Abschnitt 4.3 zu Resilienz).

Deutschland spielt bei der Produktion und dem Export von Umweltschutzgütern gegenwärtig eine bedeutende Rolle und hatte im Jahr 2020, verglichen mit seinem Anteil an der globalen Wirtschaftsleistung (4,5 %), mit 8,5 % einen deutlich überproportionalen Anteil des globalen Marktes für grüne Technologien. Für die vergangenen Jahre stellt eine Studie des UBA (2024d) fest: „Trotz zunehmenden Wettbewerbsdrucks im In- und Ausland haben deutsche Unternehmen ihre gute Position auf den internationalen Märkten für potenzielle Umweltschutzgüter in langer Frist behaupten und hohe Handelsbilanzüberschüsse erzielen können.“ In den vergangenen Jahren überstieg in Deutschland das Produktionswachstum im Bereich der Umweltschutzgüter deutlich das Wachstum in der gesamten Industrieproduktion. Insgesamt wird rund 6 % der Industrieproduktion Deutschlands den Umweltschutzgütern zugesprochen (Jahr 2021), knapp die Hälfte davon sind Klimaschutzgüter. Diese Klimaschutzgüter werden in Güter zur Energieeffizienz und Güter zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen unterteilt (UBA 2024d). In der letztgenannten Kategorie dominieren die Technologien Windenergie und Photovoltaik.

Deutschlands traditionelle Stärke im Bereich des Maschinenbaus ist eine Erklärung für die gute Position Deutschlands im Bereich der Umweltschutzgüter. So hat der Sektor Maschinenbau (inkl. Reparatur und Installation von Maschinen und Anlagen) 2020 in Deutschland knapp 30 % des Umsatzes mit Umweltschutzgütern und Umweltschutzdienstleistungen ausgemacht. Zu der starken Stellung Deutschlands bei Umweltschutzgütern hat aber auch beigetragen, dass deutsche Unternehmen auf ihrem Heimatmarkt schon relativ früh mit hohen umweltpolitischen Standards und anspruchsvollen Klimaschutzzielen konfrontiert waren (KfW Research 2021).

Eine 2021 erschienene Studie von Roland Berger im Auftrag des Bundesumweltministeriums (BMU 2021) erwartet in sieben in der Studie unterschiedenen Leitmärkten der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz bis zum Jahr 2030 ein starkes weiteres Wachstum in Deutschland. Der Studie zufolge werden insbesondere für den Leitmarkt „Umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie“ hohe jährliche Wachstumsraten von knapp 12 % pro Jahr zwischen 2020 und 2030 erwartet.

Gleichzeitig weist KfW Research (2021) darauf hin, dass Deutschland in den vergangenen Jahren kontinuierlich Marktanteile beim Export von Umweltgütern verloren hat, insbesondere an China und Südkorea. Auch bei den globalen Patentanmeldungen im Bereich der Umweltgüter hat Deutschland seit 1990 deutlich an Anteilen verloren, auch wenn der Anteil Deutschlands – gemessen an der Wirtschaftsleistung – weiterhin überdurchschnittlich hoch ist (KfW Research 2021). Nach Auffassung von KfW Research (2021) ist es für eine fortgesetzte starke Position Deutschlands bei den Umweltgütern von hoher Bedeutung, „dass der Staat durch Rahmensetzung und Förderung zusätzliche Anreize für Innovationen im Umwelt- und Klimaschutz schafft“.

Bei welchen Technologien Deutschland konkret mittel- bis langfristig gute Chancen haben wird, eine bedeutende Rolle auf den globalen Märkten zu spielen, ist zwar schwierig vorherzusehen, aber auf Basis der bisherigen Stärken Deutschlands lassen sich zumindest vielversprechende Bereiche identifizieren. Im Folgenden wird für vier ausgewählte Schlüsseltechnologien der Energiewende diskutiert, welche Chancen Deutschland aus heutiger Sicht hat, am erwarteten starken globalen Wachstum dieser Technologien in den kommenden Jahren und Jahrzehnten zu profitieren.

Windenergieanlagen stellen derzeit den wichtigsten Posten bei den deutschen Klimaschutzgütern dar und entsprechende Anlagen und Komponenten werden in bedeutendem Maße exportiert. Knapp 125.000 Menschen waren 2022 nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA 2024e) in der Windenergiebranche beschäftigt – 2016 waren es noch rund 168.000. Vor dem Hintergrund der in den nächsten Jahren erwarteten Belebung des heimischen Marktes für Onshore- wie auch für Offshore-Anlagen (Bundesverband WindEnergie 2025a, b), könnte die Bedeutung der Windenergie für die deutsche Wirtschaft wieder steigen und die Wettbewerbsbedingungen für die deutschen Hersteller von Windenergieanlagen und Komponenten könnten sich in der Folge verbessern.

Bei Gütern im Bereich der *Photovoltaik* ist Deutschland im Gegensatz zur Windenergie gegenwärtig Nettoimporteur. Auf europäischer Ebene finden allerdings derzeit Bemühungen statt, die hohe Abhängigkeit von chinesischen Unternehmen in diesem Bereich zu mindern. So wird im Net-Zero Industry Act der Europäischen Union für die Produktion von Photovoltaik-Modulen und weiteren Transformationstechnologien das Ziel gesetzt, dass bis 2030 in Europa Produktionskapazitäten aufgebaut werden, die 40 % des europäischen Bedarfs decken können. Deutschland könnte bei einem entsprechenden (Wieder-) Aufbau dieser Branche in Europa eine zentrale Rolle spielen, denn Deutschland ist beispielsweise weiterhin ein wichtiger Standort für die Photovoltaik-Forschung. Ohne längerfristige staatliche Förderung, die die gesamte Wertschöpfungskette der Photovoltaik in den Blick nimmt, wird aber allgemein erwartet, dass es deutsche und europäische Modulhersteller schwer haben werden, sich am Markt zu behaupten, da sie aufgrund höherer Kosten im

Preiswettbewerb mit asiatischen (vor allem chinesischen) Unternehmen nicht mithalten können – von Nischenbereichen mit hoher Innovationskraft abgesehen.

Batterien gelten als weitere Technologie mit hohen Wachstumsraten in den kommenden Jahren und Jahrzehnten (Wolf/Lüken 2024), getrieben durch eine erwartete stark steigende Nachfrage insbesondere nach Elektroautos, aber auch nach stationären Batterien für Haushalte, Gewerbe und Stromnetze. In der Zellfertigung spielen deutsche Firmen weltweit zwar bislang keine nennenswerte Rolle, in der Entwicklung und Produktion von Komponenten für Batteriesysteme sind einige deutsche Unternehmen weltweit aber führend. Gleiches gilt für die Weiterverwendung und das Recycling von Batterien.

Grundsätzlich ist es denkbar, dass zukünftig auch die Zellfertigung in Deutschland an Bedeutung gewinnen wird. Dabei könnte die Industrie in Deutschland von dem erwähnten Zielen im Net-Zero Industry Act der EU profitieren, sofern in den nächsten Jahren tatsächlich ausreichende staatliche Fördermittel bereitgestellt werden, um diese Ziele erreichbar zu machen. Deutschland könnte mit seiner bedeutenden Automobilindustrie und seinem breiten Technologie-Know-How im Batteriebereich ein wichtiger europäischer Markt für die Batteriefertigung werden. Allerdings haben asiatische Hersteller in den letzten Jahren einen deutlichen Erfahrungsvorsprung in der Produktion gewonnen und auch die relativ hohen Energiekosten in Deutschland könnten – angesichts der hohen Energieintensität der Batterieherstellung – für Produktionsstandorte im europäischen Ausland (mit zukünftig teilweise auch niedrigeren Kosten für erneuerbare Energien) sprechen.

Angesichts der stark wachsenden Nachfrage nach Batterien und der bei gegenwärtig dominierenden Batterietechnologien hohen Abhängigkeit von Rohstoffimporten wird es für Deutschland und Europa in den nächsten Jahren wichtig sein, Lieferketten zu diversifizieren und neue Batterietechnologien mit einem geringeren Bedarf an kritischen Ressourcen weiter zu erforschen. Zudem kann zukünftig das Recycling von Batterien innerhalb Deutschlands bzw. Europas einen wichtigen Baustein für eine europäische Kreislaufwirtschaft und eine hohe Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Hersteller darstellen (RWTH/PwC 2023).

Der im Zuge der Transformation erwartete erhebliche Bedarf an grünem Wasserstoff (und seinen Derivaten) insbesondere in der Industrie, in Kraftwerken und im Verkehr wird in den kommenden Jahren auch die Nachfrage nach *Elektrolyseuren* deutlich steigen lassen. Deutsche Hersteller von Elektrolyseuren gehören gegenwärtig zu den weltweiten Marktführern (Brudermüller et al. 2023). Auch bei dieser Technologie kommen den deutschen Herstellern die traditionelle Kompetenz im Bereich Maschinenbau sowie die vergleichsweise ambitionierten Pläne für den Hochlauf der heimischen und europäischen grünen Wasserstoffwirtschaft entgegen. Zuletzt haben allerdings strategische Fördermaßnahmen in den USA und China den internationalen Wettbewerb um Elektrolysetechnologien verschärft. Brudermüller et al. (2023) argumentieren, dass sich Deutschland auch längerfristig als ein führender Anbieter für Elektrolyseur-Technologie etablieren könnte, wenn nicht zuletzt seitens der Politik in den nächsten Jahren bestimmte Rahmenbedingungen gesetzt werden. Hierzu zählt unter anderem die Schaffung einer einfachen Regulatorik für den Betrieb von Elektrolyseuren.

5.3 Mögliche Veränderungen der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie infolge des Renewables-Pull-Effekts

Annahmen zur Entwicklung der wirtschaftlichen Struktur einzelner Länder über längere Zeiträume sind grundsätzlich mit hohen Unsicherheiten verbunden. Unter anderem prägen die Höhe des BIP-Wachstums, Veränderungen bei Technologien und bei Nachfragepräferenzen sowie Verschiebungen in der relativen Wettbewerbsfähigkeit einzelner Länder die zukünftige Struktur einer Volkswirtschaft. Diese Größen sind über mehrere Jahrzehnte schwierig zu prognostizieren. Im Zuge der aus Gründen des Klimaschutzes notwendigen Transformation des Industriesektors könnten in den nächsten Jahren und Jahrzehnten insbesondere Verschiebungen der relativen Wettbewerbsfähigkeit einzelner Länder bzw. Weltregionen eine größere Rolle spielen und auch auf den Umfang und die Struktur der industriellen Produktion in Deutschland einen bedeutenden Einfluss nehmen.

Insbesondere für die energieintensive Industrie – nicht zuletzt für die Branchen der Grundstoffindustrie wie Stahl, Chemie, Aluminium, Glas und Papier – sind die Energiekosten ein zentraler Standortfaktor. Bisher beruht die industrielle Produktion weltweit überwiegend auf fossilen Energieträgern. Diese wurden und werden international gehandelt und weisen insbesondere im Fall von Erdöl und Kohle relativ geringe Transportkosten auf, wodurch die Preisdifferenzen zwischen Weltregionen vergleichsweise niedrig sind. Bei Erdgas wiederum hatte Deutschland bis vor ein paar Jahren durch die hauptsächliche Belieferung per Pipeline-Netz aus Russland im Vergleich zu einzelnen anderen Weltregionen ein niedriges bis moderates Preisniveau.

Dieses im Vergleich zu anderen (konkurrierenden) Weltregionen relativ moderate Preisniveau bei fossilen Energieträgern hat in den vergangenen Jahrzehnten dazu beigetragen, dass Deutschland gegenwärtig eine starke industrielle Produktionsbasis aufweist.¹¹ Angesichts der hohen Bedeutung wettbewerbsfähiger Energiepreise für die energieintensive Industrie wird seit einigen Jahren in Wissenschaft, Industrie und Politik die Frage diskutiert, welche Folgen der erwartete (schrittweise) Umstieg der industriellen Produktion auf erneuerbare Energien auf die weltweite Verteilung der industriellen Produktion haben könnte.

Die für eine erfolgreiche Transformation in Richtung einer klimaneutralen Industrie zentralen Energieträger Strom und Wasserstoff (jeweils auf Basis erneuerbarer Energien gewonnen, also „grün“) können zwar grundsätzlich in allen Regionen der Welt erzeugt werden, allerdings aufgrund abweichender Bedingungen für erneuerbare Energien und unterschiedlicher Flächenverfügbarkeiten zu teils sehr unterschiedlichen Kosten. Im Vergleich zu fossilen Energieträgern können Strom und Wasserstoff auch deutlich schwieriger bzw. nur mit größeren Verlusten und höheren Kosten über längere Distanzen transportiert werden (Day 2022). Da Deutschland im Vergleich zu einigen anderen Ländern bzw. Weltregionen nicht über optimale Bedingungen für erneuerbare Energien und nur begrenzte Flächen verfügt, könnte sich die

¹¹ Die ausgeprägten und relativ plötzlichen Preisanstiege insbesondere bei Erdgas und Strom im Laufe des Jahres 2022 infolge der geopolitischen Auswirkungen des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine haben zuletzt wesentlich zu einem Rückgang der industriellen Produktion in Deutschland beigetragen. Laut Statistischem Bundesamt ging die Produktion in den energieintensiven Industriezweigen zwischen Ende 2021 und Ende 2024 um rund 22 % zurück (Statistisches Bundesamt 2025b).

Wettbewerbsfähigkeit der Produktion energieintensiver Produkte in Deutschland in den kommenden Jahren und Jahrzehnten verschlechtern.

Der Effekt, dass Standorte mit relativ geringen (Grenz-)Kosten von grünen Energieträgern bzw. grünen Rohstoffen für die energieintensive Produktion industrieller Güter zukünftig – auch als Folge zunehmender Klimaschutzpolitischer Bemühungen – an Attraktivität gewinnen dürften, wird als „*Renewables-Pull-Effekt*“ bezeichnet. Kommt es infolge dieses Effekts zu Verlagerungen industrieller Produktion von Standorten mit relativ hohen Erneuerbaren-Kosten zu Standorten mit relativ niedrigen Erneuerbaren-Kosten, so wird auch von „*Green Relocation*“ gesprochen.

Abbildung 5-2 skizziert in Form eines vereinfachten Zwei-Länder-Modells den *Renewables-Pull-Effekt* und die Möglichkeit von „*Green Relocation*“: Die Bezugskosten für fossile Energieträger sind in den beiden dargestellten Ländern A und B annahmegemäß gleich, da diese auf internationalen Märkten gehandelt werden. In Land B sind die Bedingungen für die Nutzung erneuerbarer Energien annahmegemäß aber deutlich besser als in Land A, was in der Ausgangssituation (in der die Produktion auf Basis fossiler Energieträger in beiden Ländern kostengünstiger ist als die Produktion auf Basis erneuerbarer Energien) jedoch keine Relevanz hat. Eine angenommene Einführung bzw. Erhöhung des CO₂-Preises in beiden Ländern kann aber einen Anreiz zur Verlagerung industrieller Produktion von Land A zu Land B schaffen, sofern infolgedessen die Kosten der Produktion mit fossilem Energieeinsatz die Kosten der Produktion unter Einsatz erneuerbarer Energien in dem Land mit besonders guten Bedingungen für erneuerbare Energien (Land B) überschreiten.

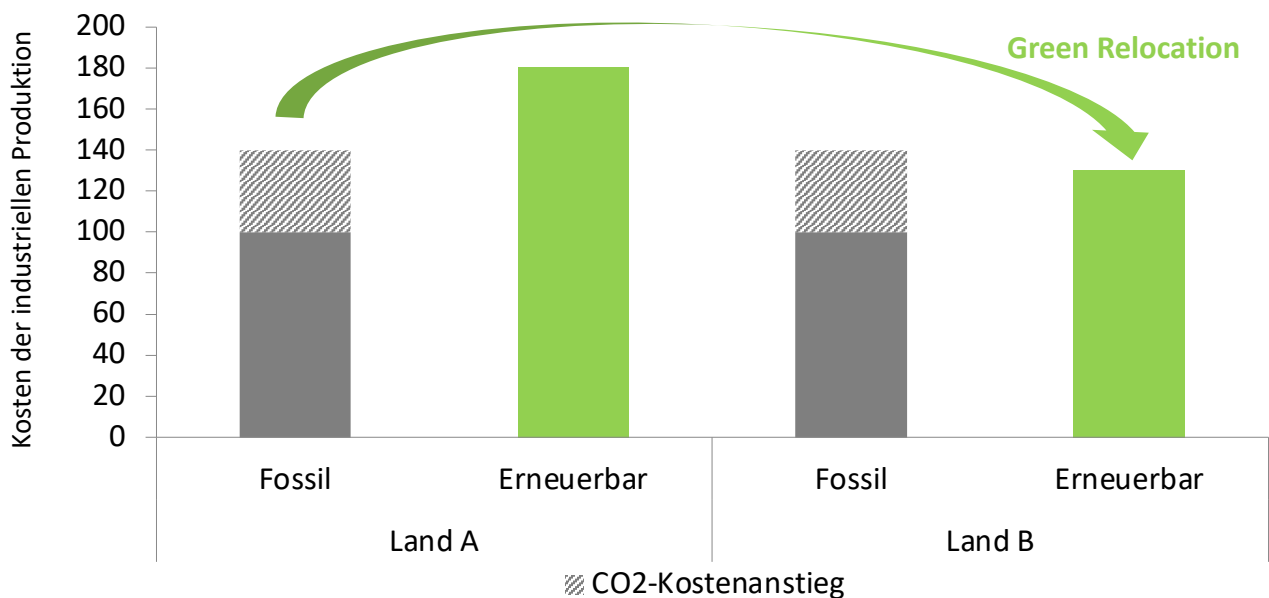


Abb. 5-2 Mögliche Verlagerung industrieller Produktion („*Green Relocation*“) infolge steigender CO₂-Preise bei unterschiedlichen Erneuerbaren-Bedingungen

Quelle: Samadi et al. (2023).

Es gibt auch tatsächlich Anzeichen dafür, dass für Unternehmen einzelner Branchen der energieintensiven Industrie in den letzten Jahren bei Neuinvestitionen die günstige Verfügbarkeit grüner Energieträger ein wesentliches Kriterium für die Standortentscheidung gewesen ist (Samadi et al. 2023).

Insbesondere wird vielfach erwartet (Agora Industry and Wuppertal Institute 2023, Trollip et al. 2022, Wang et al. 2023, Gielen et al. 2020, Bilici et al. 2024), dass der sehr energieintensive Prozess der Umwandlung von Eisenerz zu Eisen zukünftig verstärkt in Regionen mit sehr guten Bedingungen für erneuerbare Energien auf Basis von grünem Wasserstoff stattfinden wird. Das Zwischenprodukt Eisenschwamm kann anschließend – für die Weiterverarbeitung zu Stahl – zu relativ geringen Transportkosten in andere Länder bzw. Weltregionen verschifft werden.

Ein Verlagerungsdruck für Deutschland wird infolge des Renewables-Pull-Effekts aber auch für weitere Grundstoffe als plausibel angesehen, insbesondere für solche Grundstoffe, deren Produktion besonders energieintensiv ist und die relativ leicht über längere Distanzen transportiert werden können. Hierzu zählen neben Eisenschwamm unter anderem Aluminium, Ammoniak und weitere Grundstoffchemikalien.

Auf der anderen Seite sind zwar die Energiekosten für die energieintensive Grundstoffindustrie ein wesentlicher Standortfaktor, allerdings nicht der einzige. Zu den weiteren relevanten Standortfaktoren zählen die politische Stabilität eines Landes, stabile rechtliche Rahmenbedingungen, die Nähe zu Kunden und Lieferanten, die Verfügbarkeit von Fachkräften und eine leistungsfähige Forschungsinfrastruktur. Bei vielen dieser Standortfaktoren weist Deutschland gegenüber anderen Ländern und Weltregionen komparative Vorteile auf.

Nicht zuletzt aufgrund der Komplexität unternehmerischer Standortentscheidungen sind Vorhersagen zum längerfristigen Ausmaß von Green-Relocation-Effekten mit hohen Unsicherheiten behaftet. In diesem Zusammenhang ist auch unklar, wie tiefgehend zukünftig Verlagerungen infolge unterschiedlicher Erneuerbarer-Kosten in den industriellen Wertschöpfungsketten auftreten werden. So könnten zukünftig beispielsweise bei einigen Grundstoffen nur die besonders energieintensiven ersten Prozessschritte ins Ausland verlagert werden und frühe Zwischenprodukte (zum Beispiel Eisenschwamm) nach Deutschland importiert werden. Allerdings ist auch denkbar, dass zusätzliche Prozessschritte (wie die Stahlerzeugung) verlagert werden, auch wenn in diesen späteren und weniger energieintensiven Prozessschritten die Kostenvorteile durch günstigere erneuerbare Energien im Ausland geringer ausgeprägt sind (Verpoort et al. 2024). Schließlich kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass ebenfalls Teile der weiterverarbeitenden Industrie den abgewanderten Grundstoffindustrien folgen und ebenfalls ins Ausland abwandern – eine Art „Worst-Case“-Szenario für die deutsche Industrie.

Prominente aktuelle Energie- und Klimaschutzszenarien für Deutschland (wie Agora Think Tanks et al. 2024, Fraunhofer ISI et al. 2024) nehmen überwiegend keine sehr weitgehenden Green-Relocation-Effekte für Deutschland an und sind insofern bezüglich der zukünftigen industriellen Wertschöpfung in Deutschland möglicherweise optimistisch, hinsichtlich der zukünftigen Herausforderung der Versorgung der energieintensiven Industrie mit (vor allem grünen) Energieträgern hingegen

möglicherweise pessimistisch. Ähnliches gilt für die Beschreibungen einer möglichen klimaneutralen Industrie im Jahr 2045 in Deutschland in der vorliegenden Studie. Die angenommene starke industrielle Produktion in Deutschland setzt voraus, dass es in den nächsten Jahren und Jahrzehnten gelingen wird, nicht zuletzt durch eine kosteneffiziente Erschließung der vorhandenen deutschen und europäischen Erneuerbaren-Potenziale und die allgemeine Stärkung relevanter Standortfaktoren mindestens große Teile der gegenwärtig in Deutschland betriebenen industriellen Produktion auch bis 2045 zu halten.

6 Strategien und Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation

In diesem Kapitel werden zunächst in Abschnitt 6.1 verschiedene Strategien zur Transformation des Industriesektors vorgestellt, auf die in aktuellen Klimaschutzszenarien zurückgegriffen wird und die für das Erreichen der in Kapitel 3 beschriebenen Vision einer klimaneutralen Industrie von zentraler Bedeutung sind. Anschließend werden in Abschnitt 6.2 wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Industrie-Transformation beschrieben, die nicht zuletzt durch entschlossene politische Weichenstellungen in den kommenden Jahren erfüllt werden müssen, um rechtzeitig eine klimaneutrale Industrie realisieren zu können. Zu diesen Voraussetzungen gehört ein dynamischer weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien, ein Aus- und Umbau verschiedener Infrastrukturen, veränderte politische Rahmenbedingungen für die Anreizung von Investitionen in klimaneutrale Anlagen sowie eine ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz für den Transformationsprozess.

6.1 Zentrale Strategien für eine erfolgreiche Industrie-Transformation

Abbildung 6-1 gibt einen Überblick über zehn Schlüsselstrategien für weitgehende Treibhausgasminderungen im Industriesektor. In vorliegenden Klimaschutzszenarien werden stets die meisten dieser Strategien (oder auch alle) kombiniert, um eine (mindestens weitgehend) klimaneutrale Industrie erreichen zu können. Im Folgenden wird jede dieser zehn Strategien kurz erläutert.¹²

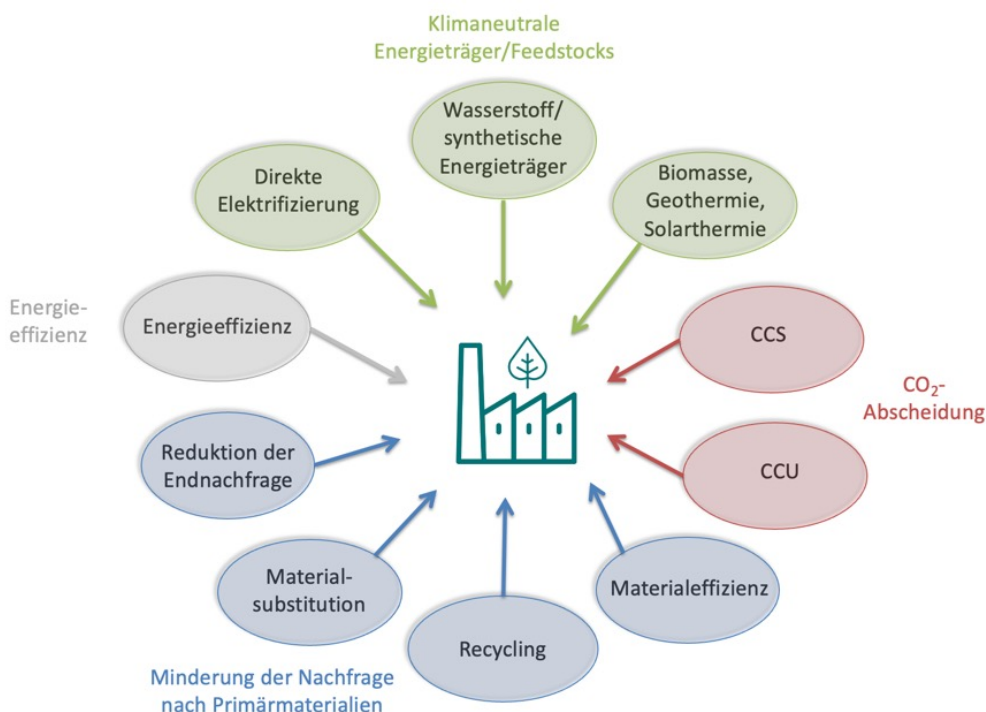


Abb. 6-1 Strategien zur Erreichung von Klimaneutralität im Industriesektor

Quelle: Samadi und Barthel (2020), mit Anpassungen.

¹² Diese Erläuterung der Strategien ist Samadi und Barthel (2020) entnommen.

Die Strategie der *direkten Elektrifizierung* zielt darauf ab, die Nutzung fossiler Brennstoffe durch die direkte Nutzung von Elektrizität zu ersetzen. Unter der Voraussetzung, dass der Strom aus erneuerbaren Energien stammt, können die Treibhausgasemissionen stark reduziert oder ganz vermieden werden. Diese Strategie spielt in allen Endenergiesektoren eine wichtige Rolle in Klimaschutzszenarien und ist auf einen schnellen weiteren Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien angewiesen. Über alle Branchen der Industrie hinweg kann beispielsweise die Erzeugung von Nieder- bis Hochtemperaturwärme über so genannte „Power-to-Heat“-Anwendungen weitgehend auf die Nutzung von Strom umgestellt werden.

Es wird erwartet, dass *klimaneutraler Wasserstoff und synthetische Energieträger* eine wichtige Rolle bei der Erzielung tiefgreifender Emissionsminderungen in der Grundstoffindustrie spielen werden. Die Realisierung einer klimaneutralen Primärstahlproduktion kann zum Beispiel den Wasserstoff-Einsatz in Direktreduktionsanlagen erfordern. Zudem könnte Wasserstoff in Zukunft in der chemischen Industrie in großen Mengen als Rohstoff („Feedstock“) genutzt werden. Auch klimaneutrale synthetische Kraftstoffe könnten im industriellen Bereich eine Rolle spielen, entweder als Energieträger oder als Rohstoff.

Eine Minderung der Treibhausgasemissionen kann auch durch den Ersatz fossiler Energieträger durch die direkte Nutzung erneuerbarer Energien in der Form von *Biomasse, Geothermie oder Solarthermie* erreicht werden. Wichtige potenzielle Einsatzgebiete für Biomasse in der Industrie sind die Bereitstellung von Wärme und die Nutzung als Rohstoff für die chemische Grundstoffindustrie. Zukünftige Anwendungen können auch die Nutzung von Biomasse in Kombination mit CCS in Industrieanlagen zur Erzielung negativer Emissionen (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) oder ein anteiliger Einsatz von Biomethan als klimaneutraler Kohlenstofflieferant bei der wasserstoffbasierten Stahlproduktion sein. Es ist jedoch zu beachten, dass das nachhaltige Biomassepotenzial begrenzt und die genaue Höhe dieses Potenzials umstritten ist. Je nach Anwendungsbereich und örtlichen Gegebenheiten können fossile Energieträger in der industriellen Wärmebereitstellung auch durch Geothermie oder Solarthermie verdrängt werden.

Die *Steigerung der Energieeffizienz* ist eine wichtige ergänzende Strategie für eine weitgehende Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Industrie. Die Realisierung von Energieeffizienzpotenzialen in Querschnittstechnologien wie Motoren und Pumpen sowie in branchenspezifischen Prozessen kann den Druck zum Ausbau der erneuerbaren Energien bzw. allgemein zur Nutzung anderer Strategien zur Treibhausgasreduzierung verringern.

Die *Abscheidung und dauerhafte Speicherung von energie- oder prozessbedingtem CO₂ (CCS)* kann prinzipiell an verschiedenen Industrieanlagen eingesetzt werden. Unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit eignen sich für den CCS-Einsatz vor allem solche Anlagen, in denen relativ große Mengen an CO₂ in hoher Konzentration entstehen. Für die Sicherstellung ausreichender gesellschaftlicher Akzeptanz für die Umsetzung von CCS dürfte es ratsam sein, CO₂ nur oder zumindest primär nur dort abzuscheiden, wo es nach gegenwärtigem Kenntnisstand keine anderen Optionen zur Emissionsvermeidung gibt. Dies trifft insbesondere auf einen Großteil der gegenwärtigen CO₂-Emissionen der Zement- und der Kalkindustrie sowie der Müllverbrennungsanlagen zu.

Bei der *CO₂-Abscheidung und -Nutzung* (Carbon Capture and Use, CCU) wird CO₂ aus industriellen Prozessen abgetrennt und als Rohstoff für die Produktion bestimmter Produkte verwendet. Wie bei CCS ist die CO₂-Abscheidung an großen Punktquellen denkbar, zum Beispiel bei der Zementherstellung. Mögliche CCU-Anwendungen sind synthetische Kraftstoffe und chemische Produkte (zum Beispiel Kunststoffe und kohlenstoffhaltige Düngemittel), die auch in einer klimaneutralen Welt weiterhin auf Kohlenstoff angewiesen sein werden. Wenn aber der fossile Kohlenstoff, der in neuen Produkten verwendet wird, nicht kontinuierlich im Kreis geführt (zum Beispiel durch chemisches Recycling) oder schließlich dauerhaft gespeichert werden kann, fallen am Ende der Lebensdauer der Produkte dennoch fossile CO₂-Emissionen an. Insofern ist die CCU-Strategie nur in begrenztem Maße mit Klimaneutralität vereinbar.

Die Strategie der *Steigerung der Materialeffizienz* zielt darauf ab, bestimmte Funktionen von Materialien mit weniger Materialeinsatz zu erfüllen. Wenn dies gelingt, kann die Strategie die Nachfrage nach der energie- und CO₂-intensiven Produktion von Grundstoffen reduzieren. Das Ziel der Erhöhung der Materialeffizienz kann auf verschiedene Weise erreicht werden. So können Materialverluste im Herstellungsprozess vermieden, die Materialintensität von Produkten verringert oder aber Produkte intensiver genutzt werden.

Schritte hin zu einer *Stärkung des Recyclings* im Sinne einer weitgehenden Wiederverwendung bereits produzierter (und genutzter) Materialien könnten einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen der Grundstoffindustrie leisten. Die Realisierung hoher Recyclingraten erfordert jedoch Änderungen im Produktdesign, eine angemessene Demontage der Produkte am Ende ihrer jeweiligen Lebensdauer und eine verbesserte Recyclinglogistik.

Materialsubstitution kann in einigen Fällen die Emissionsintensität von Produkten und Dienstleistungen mindern. Ein Beispiel ist die Verwendung von Holz im Gebäudbau. Gebäude, die Beton und Stahl teilweise durch Holz ersetzen, weisen geringere Lebenszyklusemissionen auf. Einschränkungen in der nachhaltigen Verfügbarkeit alternativer Materialien sowie zum Teil unzureichende Materialeigenschaften stellen jedoch Grenzen dieser Strategie dar.

Die Nachfrage nach Industrieprodukten, einschließlich energieintensiver Grundstoffe, könnte im Vergleich zu einer „Business-as-Usual“-Entwicklung durch eine bewusste *Reduktion der Nachfrage der Endverbraucherinnen und Endverbraucher* nach Gütern und Dienstleistungen verringert werden. Ein Rückgang des Mobilitätsbedarfs könnte beispielsweise die benötigte Anzahl an Fahrzeugen und die damit einhergehende Stahlnachfrage mindern.

6.2 Wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Industrie-Transformation

Das Gelingen der Transformation des Industriesektors bis zum Jahr 2045 ist von einer Reihe von Voraussetzungen abhängig. Einige dieser Voraussetzungen werden in diesem Abschnitt hervorgehoben, um zu verdeutlichen, in welchen Bereichen in den kommenden Jahren Anpassungen von besonders großer Bedeutung sind, um die Industrie-Transformation zum Erfolg zu führen.

Beschleunigter Ausbau erneuerbarer Energien

Um im Industriesektor Klimaneutralität erreichen zu können, wird der gegenwärtige Einsatz fossiler Energieträger in industriellen Prozessen weitgehend durch Strom bzw. Wasserstoff ersetzt werden müssen. Diese Energieträger müssen dabei zunehmend CO₂-arm und schließlich (weitgehend) CO₂-frei erzeugt werden, um die Vision einer klimaneutralen Grundstoffindustrie Wirklichkeit werden zu lassen. Ein hoher Strombedarf entsteht beispielsweise bei der Umstellung der Dampferzeugung insbesondere in der Grundstoffindustrie auf Strom (über Power-to-Heat-Technologien wie Elektrodenkessel und Hochtemperatur-Wärmepumpen) und bei einer Umstellung der gegenwärtigen Primärstahlerzeugung von Hochöfen hin zu Direktreduktionsanlagen, die mit grünem Wasserstoff betrieben werden, und Elektrolichtbogenöfen bzw. Einschmelzern, die jeweils große Mengen an Strom benötigen.

Abbildung 6-2 zeigt, dass nach aktuellen Klimaneutralitätsszenarien bis 2045 gegenüber 2023 mit einer Verdreifachung bis Verfünfachung des Strombedarfs der Industrie zu rechnen ist, wenn auch der indirekte Strombedarf berücksichtigt wird, der durch die Nachfrage der Industrie nach Wasserstoff entsteht.¹³

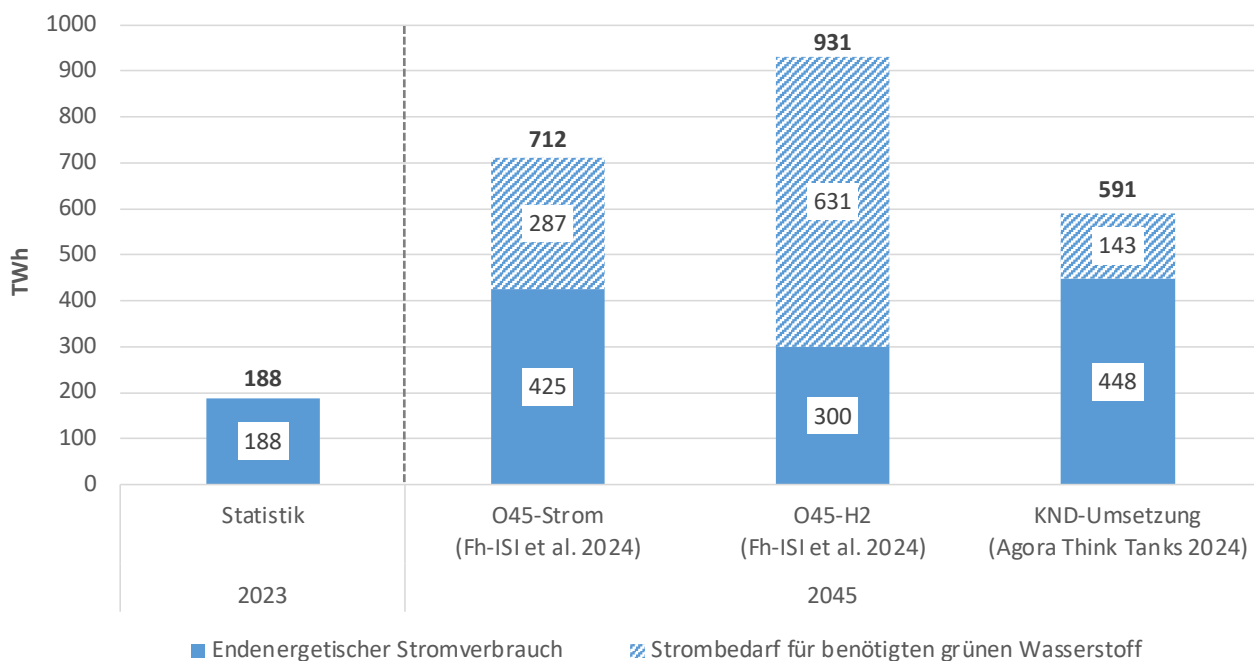


Abb. 6-2 Strombedarf der Industrie durch endenergetischen Stromverbrauch und (indirekt) durch den Bedarf an grünem Wasserstoff im Jahr 2023 und nach drei Szenarien im Jahr 2045

Hinweise: Der indirekte Strombedarf durch den benötigten grünen Wasserstoff fällt nicht zwingend (vollständig) in Deutschland an, sondern kann – soweit zukünftig Wasserstoff importiert wird – auch im Ausland anfallen. O45-Strom und O45-H2 sind zwei aktuelle „Orientierungsszenarien“ des Projekts „Langfristszenarien“ (Fraunhofer ISI et al. 2024) und KND-Umsetzung ist das aktuelle Szenario aus der Reihe „Klimaneutrales Deutschland“ (Agora Think Tanks et al. 2024).

Quellen: Eigene Darstellung nach Zahlen der AG Energiebilanzen (2024) und den aufgeführten Szenariostudien.

¹³ Dabei ist zu beachten, dass die betrachteten Szenarien einen weitgehenden Verbleib der energieintensiven Grundstoffindustrie in Deutschland unterstellen. Sollte – zum Beispiel infolge des Renewables-Pull-Effekts – die inländische Produktion energieintensiver Grundstoffe wie Stahl, Aluminium oder Grundstoffchemikalien im Jahr 2045 deutlich niedriger liegen als gegenwärtig, so würde 2045 auch der direkte und indirekte Strombedarf der Industrie deutlich geringer ausfallen.

Bereits der direkte Strombedarf steigt in allen drei betrachteten Szenarien bis 2045 deutlich an, in zwei der drei Szenarien um mehr als das doppelte gegenüber heute, auf rund 420 bis 450 TWh. Das dritte Szenario (O45-H2) sieht einen moderateren Anstieg des endenergetischen Strombedarfs auf 300 TWh bis 2045 vor, was auf die in diesem Szenario angenommene stärkere Fokussierung auf die Nutzung von Wasserstoff zurückzuführen ist. In diesem Szenario ist jedoch entsprechend der Strombedarf für die elektrolytische Erzeugung des industriell benötigten Wasserstoffs sehr hoch und liegt bei rund 630 TWh, sofern ein elektrischer Wirkungsgrad der Elektrolyse von 70 % angenommen wird. In den anderen beiden dargestellten Szenarien liegt der Strombedarf für den industriell benötigten Wasserstoff bei 287 TWh (O45-Strom) bzw. 143 TWh (KND-Umsetzung). Auch dieser indirekte Strombedarf muss zukünftig über erneuerbare Energien gedeckt werden, entweder in Deutschland oder (im Falle des Imports von grünem Wasserstoff) im Ausland. Die Szenarien nehmen an, dass zumindest ein Teil des gesamten Wasserstoffbedarfs 2045 inländisch erzeugt werden wird, im Szenario KND-Umsetzung liegt dieser Anteil zum Beispiel bei rund einem Drittel.

Es ist daher von großer Bedeutung für das Gelingen der Transformation der Grundstoffindustrie (wie auch für die erfolgreiche Transformation in den anderen Sektoren), dass grüner Strom und klimafreundlicher Wasserstoff zukünftig in ausreichenden Mengen und zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung stehen werden. Dies erfordert nicht zuletzt einen weiteren deutlichen Ausbau der Kapazitäten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in den nächsten Jahren und Jahrzehnten. Aktuelle Klimaschutzszenarien nehmen an, dass bis 2045 ungefähr die von der Bundesregierung formulierten Ausbauziele für Windenergie und Photovoltaik-Anlagen realisiert werden müssen, um zukünftig eine ausreichende Menge an grünem Strom zur Verfügung zu haben. Die folgende Abbildung 6-3 zeigt, dass in den letzten Jahren der Zubau insbesondere bei Photovoltaik gegenüber den Vorjahren deutlich gesteigert werden konnte.

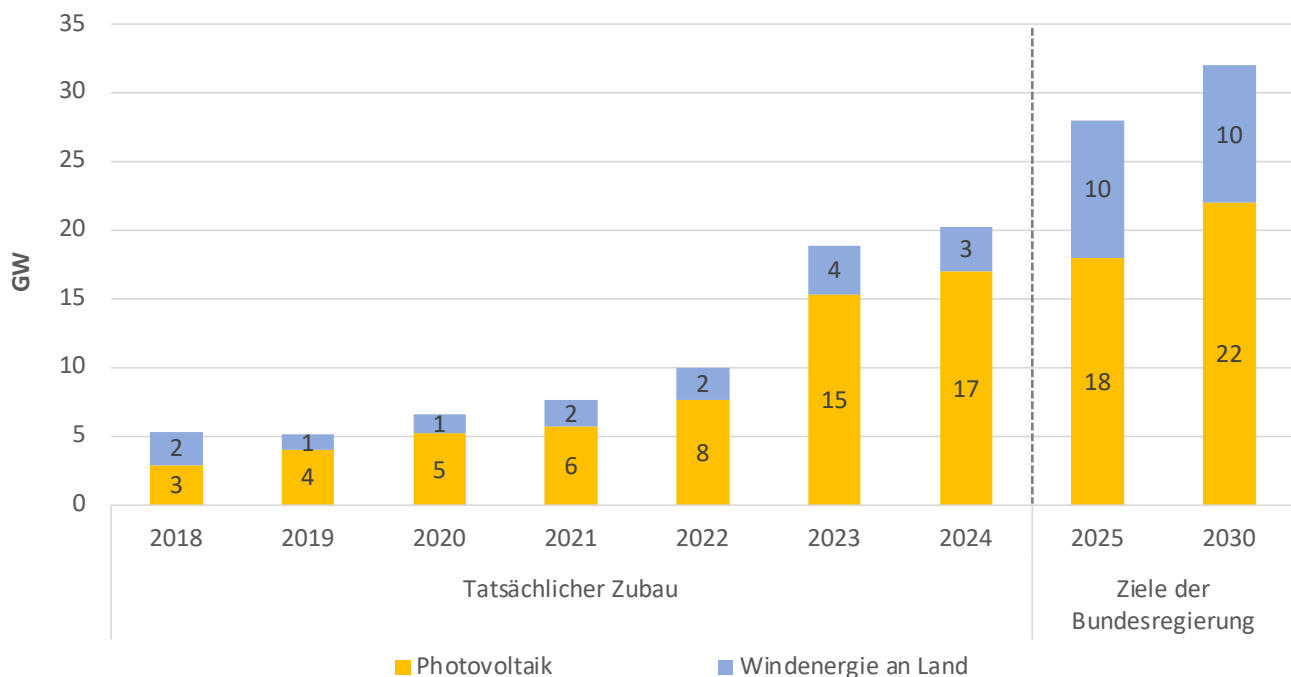


Abb. 6-3 Jährlicher Brutto-Zubau der Photovoltaik und der Windenergie an Land in Deutschland von 2017 bis 2024 sowie nach Zielen der Ampel-Regierung in den Jahren 2025 und 2030

Quellen: Eigene Darstellung nach Zahlen des Bundesverband WindEnergie (2025c) und der Bundesnetzagentur (2025).

Bei der Windenergie an Land zeigt sich in den Zubauraten zwar bis 2024 noch keine ähnliche Dynamik wie bei der Photovoltaik, jedoch ist die Anzahl der genehmigten Windenergieanlagen in den Jahren 2023 und insbesondere 2024 sehr stark gestiegen, so dass ab 2025 mit einem deutlichen Anstieg des Zubaus von Windenergie-Anlagen an Land gerechnet wird. Die von der Ampel-Regierung formulierten jährlichen Zubauziele könnten ab 2026 erreicht werden (Bundesverband WindEnergie 2025a).

Auch bei der Offshore-Windenergie – aus Gründen der Übersicht nicht in der Abbildung dargestellt – wird in den kommenden Jahren ein deutlich stärkerer Zubau notwendig sein, um bis 2030 das Zwischenziel der Bundesregierung (mindestens 30 GW installierte Kapazität) erreichen zu können. Der Bundesverband WindEnergie (2025b) geht davon aus, dass das 30-GW-Ziel mit einem Jahr Verzögerung im Jahr 2031 erreicht werden kann.

Aus- und Umbau verschiedener Infrastrukturen

Eine weitere zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche Transformation der Industrie ist die rechtzeitige Bereitstellung der für einen klimaneutralen Betrieb benötigten Infrastruktur. Von besonderer Bedeutung sind dabei nach heutigem Wissensstand:

■ Stromnetze

Neue Technologien, die Strom in großen Mengen direkt nutzen (zum Beispiel Elektrodenkessel, elektrische Steamcracker und zusätzliche Elektrolichtbogenöfen in der Stahlerzeugung), werden – abgesehen vom Bedarf an ausreichender Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien (siehe oben) – auch Verstärkungen der standortnahen Verteilnetze und möglicherweise auch der Übertragungsnetze erfordern.

Der Aus- und Umbau des Strom-Übertragungsnetzes schreitet voran und hat in den vergangenen Jahren – nachdem die Umsetzung lange Zeit deutlich hinter den Plänen zurückblieb – an Dynamik gewonnen (Bundesnetzagentur 2024). Ein großer Teil des für ein klimaneutrales Energiesystem benötigten Um- und Ausbaus des Stromnetzes wird in den kommenden Jahren aber noch umgesetzt werden müssen.

■ Wasserstoff-Pipelinennetz und Wasserstoff-Speicher

Technologien, die auf erhebliche Mengen an Wasserstoff angewiesen sind (zum Beispiel die wasserstoffbasierte Stahlproduktion, die Ammoniaksynthese oder das chemische Recycling über Gasifizierung), werden auf eine Wasserstoff-Pipeline-Infrastruktur angewiesen sein, die große Mengen an Wasserstoff aus Gebieten mit günstigen Erzeugungsbedingungen zu den Nachfragestandorten befördern kann. Für eine zuverlässige Versorgung der Industrie (wie auch weiterer Sektoren) mit Wasserstoff werden auch Wasserstoff-Speicher in erheblichem Umfang benötigt. Teilweise können hierfür bestehende Erdgas-Speicher umgerüstet werden, es wird aber auch der Neubau von (untertägigen) Wasserstoff-Speichern notwendig sein. Einer Studie des EWI (2024) zufolge hat Deutschland aufgrund großer bestehender Erdgasspeicherkapazitäten sowie vorteilhafter Salzkavernenpotenziale „gute Ausgangsbedingungen und könnte in Europa ein zentraler Standort für die Wasserstoffspeicherung werden“.

In der laufenden Legislaturperiode wurde mit der Erarbeitung eines Wasserstoff-Kernnetzes und der mittlerweile erfolgten Genehmigung dieses Kernnetzes durch die Bundesnetzagentur ein wichtiger Schritt in Richtung der Realisierung des benötigten Wasserstoff-Pipelinennetzes unternommen. Das genehmigte Kernnetz umfasst Leitungen mit einer Gesamtlänge von etwas über 9.000 km, wovon rund 60 % der Leitungen vom bisherigen Erdgas-Betrieb umgewidmet und die übrigen Leitungen neu gebaut werden (BMWK 2024).

■ CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur

Technologien, die für eine weitgehende Emissionsreduktion voraussichtlich auf CO₂-Abscheidung und -Speicherung angewiesen sein werden (zum Beispiel Zementöfen oder Müllverbrennungsanlagen), werden eine CO₂-Transportinfrastruktur benötigen, durch die das CO₂ zu geeigneten Speicherorten transportiert wird. Diese Infrastruktur kann aus Pipelines bestehen, die für größere CO₂-Mengen die günstigste Transportoption darstellen. Bei Standorten mit begrenzten CO₂-Mengen oder übergangsweise kommen für den

Transport aber auch Binnenschiffe oder Güterzüge in Frage. Sofern marine CO₂-Speicherstandorte genutzt werden, muss zudem der Weitertransport des CO₂ über See ermöglicht werden. Schließlich müssen auch CO₂-Speicher in Deutschland oder dem europäischen Ausland in ausreichendem Maße erschlossen werden.

Die Planungen hinsichtlich der zukünftigen CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur in Deutschland sind bisher noch vergleichsweise unkonkret. Die in Arbeit befindliche Carbon-Management-Strategie der Bundesregierung soll die Grundlage bilden, um anschließend konkrete Schritte in Richtung der Realisierung einer solchen Infrastruktur gehen zu können. Auf Eckpunkte für die Carbon-Management-Strategie hat sich das Kabinett der Ampel-Regierung im Mai 2024 geeinigt (Bundesregierung 2024).

Infrastrukturelle Anpassungen wird es im Zuge der Transformation des Industriesektors auch bei den deutschen Häfen geben, die als „green hubs“ eine zentrale Rolle für den Import klimaneutraler Energieträger und Rohstoffe (zum Beispiel Wasserstoff bzw. Wasserstoff-Derivate), möglicherweise einen verstärkten Import energieintensiver Vorprodukte (wie direktreduziertes Eisen) und den Weitertransport von CO₂ zu Offshore-Lagerstätten spielen werden.

Ohne eine ausreichende Sicherheit, dass die benötigte Infrastruktur rechtzeitig und in erforderlichem Umfang errichtet wird, werden auch Investoren nicht in die für Klimaneutralität benötigten Prozesse und Technologien investieren. Gleichzeitig ist bei der Planung neuer Infrastrukturen eine frühzeitige und enge Einbindung verschiedener gesellschaftlicher Gruppen wichtig, um potenziellen Konflikten um die Errichtung dieser Infrastrukturen möglichst gut vorzubeugen.

Veränderte politische Rahmenbedingungen für die Anreizung der notwendigen Investitionen

Eine klimaneutrale Industrie erfordert zum einen den Übergang zu innovativen, klimaneutralen Produktionsprozessen sowie zum anderen eine parallele Abkehr von fossilen Energieträgern. Aufgrund der häufig sehr langen Investitionszyklen in der Industrie (viele große Industrieanlagen werden mehrere Jahrzehnte lang genutzt) und der langen Vorlaufzeiten für Investitionen in Infrastruktur müssen die für Klimaneutralität bis 2045 notwendigen Veränderungen bereits sehr zeitnah auf den Weg gebracht werden. Folglich werden kurzfristig auch (weitere) Anpassungen der politischen Rahmenbedingungen erfolgen müssen, damit die Transformation des Industriesektors in Deutschland gelingen wird. Einzelne wichtige Instrumente bestehen bereits (nicht zuletzt der EU-Emissionshandel) bzw. wurden auf nationaler Ebene kürzlich implementiert (wie die Förderung „grüner“ Investitionen über Klimaschutzverträge). Wie aber unter anderem der Projektionsbericht 2024 (UBA 2024c) verdeutlicht, reichen diese politischen Instrumente noch bei Weitem nicht aus, um den Industriesektor auf den Pfad der Klimaneutralität zu bringen.

Eine besondere Herausforderung für eine erfolgreiche Transformation der Industrie besteht darin, dass unter anderem aufgrund der benötigten großen Mengen grüner Energieträger die klimaneutrale Produktion (zumindest bei dem CO₂-Preisniveau, das derzeit im EU-Emissionshandel üblich ist) teils deutlich teurer ist als die konventionelle, fossil-basierte Produktion. Dies kann insbesondere für diejenigen

Industriebranchen, die sich (wie die Stahlindustrie und die chemische Industrie) in einem starken internationalen Wettbewerb befinden, zu einem Investitionshemmnis werden. Das seitens der EU derzeit in der Einführung befindliche Instrument des CO₂-Grenzausgleichs (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) soll die deutsche und europäische Industrie vor ausländischen Wettbewerbern schützen, die weiterhin auf CO₂-intensive Produktionsprozesse setzen und ihre Produkte daher günstiger anbieten können. Das Instrument ist allerdings sehr komplex und es wird insbesondere seitens der Industrie befürchtet, dass es in seiner gegenwärtigen Form aufgrund von Lücken und Umgehungsmöglichkeiten nicht oder nur in Teilen die Transformation der deutschen und europäischen Industrie absichern kann (BDI 2024).

Ohne förderliche Rahmenbedingungen wären sowohl die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende als auch der Industriestandort Deutschland gefährdet. Weithin wird für eine erfolgreiche Transformation (unter anderem) des Industriesektors ein Mix aus verschiedenen Politikinstrumente für sinnvoll erachtet. Konkrete Vorschläge für die Weiterentwicklung bestehender und die Einführung neuer Instrumente zur Unterstützung der Industrie-Transformation hat zuletzt unter anderem Agora Energiewende formuliert, siehe Abbildung 6-4 (Agora Think Tanks 2024).

 Marktregulierung	 Preisbasierte Anreize	 Finanzielle Unterstützung
→ Labels für klimafreundliche Grundstoffe	→ EU-ETS I: Auslaufen kostenloser Zuteilung, Einführung CBAM, Ende CO ₂ -Zertifikatsausgabe 2039	→ Klimaschutzverträge: Fortführung und Weiterentwicklung für energieintensive Industrien und KMU
→ Quoten für klimafreundliche Grundstoffe in der öffentlichen Beschaffung, Embodied-Carbon-Standards für Gebäude	→ Preissignale für Substitution fossiler Rohstoffe durch Biomasse und Recycling	→ Investitionsförderung für industrielle Wärmepumpen, Fokus KMU (Förderprogramm, Investitionsprämie)
→ Bedarfsgerechte CO ₂ - und H ₂ -Infrastruktur	→ Reform der Netzentgeltregulierung für Flexibilität	→ Fortführung Strompreiskompensation, Stromsteuersenkung
→ Begleitender Dialog zur Industrietransformation mit Wirtschaft, Politik und Wissenschaft	→ Finanzielle Anreize für den Einsatz klimafreundlicher Grundstoffe bei Endprodukten	→ Stärkung der Forschungs- und Innovationsförderung

Abb. 6-4 Vorschläge von Agora Energiewende für einen Mix zentraler Politikinstrumente zur Unterstützung der Industrie-Transformation

Quelle: Agora Think Tanks (2024), unter Verwendung der CC BY Lizenz.

Info-Kasten 6-1 Suffizienz

Suffizienzmaßnahmen, also eine bewusste Reduktion der Nachfrage nach bestimmten Gütern oder Dienstleistungen, werden in vielen vorliegenden Klimaschutzszenarien nicht oder nur in begrenztem Maße unterstellt. Grundsätzlich kann Suffizienz aber das Erreichen von Klimaneutralität unterstützen und den Druck auf technische Lösungen (zum Beispiel auf die Ausbaugeschwindigkeit bei erneuerbaren Energien oder die CO₂-Abscheidung und -Speicherung für schwer vermeidbares CO₂) reduzieren. So kann eine bewusste Reduktion des Fleischkonsums die Minderung von Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft vereinfachen und beschleunigen und eine Reduktion der Flugreisen die Klimaneutralität des Verkehrssektors leichter und günstiger erreichbar machen.

Die Umsetzung von Suffizienzmaßnahmen kann sich indirekt auch auf die Industrie-Transformation auswirken. Ein suffizienter Lebensstil der Bevölkerung kann beispielsweise die Nachfrage nach bestimmten Industriegütern verringern und damit auch die Produktionsprozesse beeinflussen, unter anderem weil sich der Anteil recycelter Materialien erhöhen kann. Rückwirkungen auf den Industriesektor können sich auch über einen veränderten Lebensmittelkonsum ergeben: Wenn in Zukunft deutlich weniger Fleisch und Fisch gegessen werden sollte, werden weniger landwirtschaftliche Flächen – sowohl für die Viehhaltung selbst als auch für die Futtermittelerzeugung – benötigt. Dadurch ergeben sich neue Potenziale für den Anbau von (nachhaltiger) Biomasse, die als Energieträger oder Rohstoff in der Industrie eingesetzt werden könnte. Auch ein geringerer Bedarf an Wohn- und Bürofläche bzw. eine bessere Verteilung bestehender Flächen kann den Bedarf an Baumaterialien – insbesondere Stahl und Zement – und damit deren Produktion reduzieren. Ein verändertes Mobilitätsverhalten kann wiederum die Nachfrage nach Fahrzeugen reduzieren und damit die notwendige Produktion von Materialien für Fahrzeuge verringern.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Suffizienzmaßnahmen durchaus eine Rolle bei der Transformation der Industrie spielen können, indem sie technische Lösungen ergänzen, Ressourcen schonen und neue Perspektiven für nachhaltiges Wirtschaften aufzeigen. Herausforderungen bei der Umsetzung bestehen aber in Hinblick auf den für breite Suffizienz notwendigen kulturellen Wandel. Suffizienz wird oft (und fälschlicherweise) mit Verlust von Lebensqualität assoziiert. Für den Erfolg von Suffizienz sind daher ein Umdenken und ein kultureller Wandel notwendig, nicht nur bei Individuen, sondern in der Gesellschaft insgesamt. Etablierte Muster, Lebensstile und Denkweisen müssten hinterfragt und teilweise verändert werden.

Gesellschaftliche Akzeptanz

Eine zentrale Voraussetzung für das Erreichen der Klimaneutralität bis 2045 ist die Sicherstellung einer ausreichenden gesellschaftlichen Akzeptanz für dieses Ziel und den Weg dorthin. Für die gesellschaftliche Akzeptanz konkreter Klimaschutzmaßnahmen ist zum einen wichtig, dass Menschen ein Verständnis haben, dass und warum einzelne Maßnahmen für den Klimaschutz sinnvoll sind. Daher sind frühzeitige Informationen und eine sachliche Aufklärung der Bevölkerung für die erfolgreiche Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen von großer Bedeutung. Zum anderen ist auch wichtig, dass die Verteilung der mit einer Maßnahme verbundenen Kosten von der Gesellschaft als gerecht wahrgenommen wird bzw. dass nicht der Eindruck entsteht, dass durch Klimaschutzmaßnahmen soziale Ungleichheit verschärft wird.

Speziell in Bezug auf die Transformation der Industrie ist für die gesellschaftliche Akzeptanz wichtig, dass deutlich wird, dass die mit der Umstellung der industriellen Produktion hin zu „grünen“ Produktionsprozessen verbundenen Mehrkosten zwar in Bezug auf die Produktionskosten einzelner Grundstoffe beträchtlich sein mögen¹⁴, dass sich durch die klimaneutral hergestellten Materialien die Preise für typische Endverbraucher*innen-Produkte aber nur sehr geringfügig erhöhen würden. So rechnet beispielsweise Material Economics (2019) mit materialbedingten Preisaufschlägen bei Autos, Plastikflaschen und Gebäuden von etwa einem Prozent oder weniger.

Hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz gilt die Umsetzung der Abscheidung, des Transports und der Speicherung (CCS) von nicht bzw. schwer vermeidbarem CO₂ als besondere Herausforderung für das Erreichen einer klimaneutralen Industrie. CCS ist ein wichtiger Baustein auf dem Weg zu einer klimaneutralen Industrie, da auch in Zukunft nicht-vermeidbares prozessbedingtes CO₂ entstehen wird (siehe Abschnitt 3.4). Nach heutigem Stand bietet industrielles CCS daher die einzige Möglichkeit, um dieses CO₂ nicht in die Atmosphäre gelangen zu lassen. Allerdings hat CCS mit Akzeptanzproblemen in der Gesellschaft zu kämpfen, insbesondere seit das Verfahren Ende der 2000er und Anfang der 2010er Jahre in Deutschland für die Nutzung mit Kohlekraftwerken diskutiert wurde – also für CO₂, dessen Entstehung durchaus durch die Umstellung auf eine auf erneuerbaren Energien beruhende Stromversorgung gänzlich vermieden werden könnte.

Umfragen des Wuppertal Instituts (Witte et al. 2023) haben ergeben, dass Befragte industrielles CCS (iCCS) eher positiv sehen und negative Bewertungen deutlich weniger ausgeprägt sind, wenn den Befragten die Technologie bekannt ist und sie als sinnvolle bzw. notwendige Maßnahme für den Klimaschutz wahrgenommen wird. Wird iCCS von Befragten jedoch primär als Möglichkeit gesehen, weiterhin fossile Prozesse zu betreiben und die Umstellung auf erneuerbare Energien zu verzögern, so ist die Resonanz eher negativ. Allerdings gaben auch 63 % der Befragten an, nichts über iCCS zu wissen, weswegen unklar ist, wie sich diese dazu positionieren.

Auch Industrie-Akteur*innen betonen in der Befragung, dass in der öffentlichen Diskussion eine Unterscheidung von iCCS und CCS im Stromsektor maßgeblich ist und nur iCCS eine notwendige Maßnahme sei, um neben dem Klimaschutz auch Produktionskapazitäten in Deutschland zu erhalten und Arbeitsplätze sichern zu können.

Bei Umweltschutzverbänden ist die Sicht auf iCCS zwiespalten, da es teilweise Bedenken gibt, dass iCCS dort eingesetzt werden könnte, wo auch andere klimaneutrale Prozesse eingesetzt werden könnten. Von einzelnen Umweltschutzverbänden wird iCCS aber auch komplett abgelehnt. Es bedarf laut den Akteur*innen einer klaren und engen Eingrenzung auf bestimmte industrielle Prozesse, um Schlupflöcher für fossile Energiebereitstellung zu vermeiden und nur wirklich notwendige industrielle Prozesse mit iCCS zu betreiben.

¹⁴ So könnten sich beispielsweise die Herstellungskosten von Stahl durch die Umstellung auf grünen Stahl um 50 bis 70 % erhöhen (Agora Industry et al. 2024).

Für eine mögliche Umsetzung von iCCS bedarf es daher zeitnah klarer gesetzlicher Bestimmungen und Rahmenbedingungen in Deutschland. Eine eindeutige Definition von schwer bzw. nicht-vermeidbarem CO₂ könnte dabei ein zentrales Akzeptanzkriterium sein. Auch die Potenziale zur Realisierung negativer Emissionen bei bestimmten CCS-Anwendungen in der Industrie könnten bei der politischen und gesellschaftlichen Bewertung von iCCS eine Rolle spielen. Die in Arbeit befindliche Carbon-Management-Strategie des Bundes möchte laut den im Mai 2024 vom Kabinett verabschiedeten Eckpunkten die staatliche Förderung für CCS und CCU auf schwer oder nicht vermeidbare Emissionen in der Industrie und der Abfallwirtschaft fokussieren, schließt aber auch die Abscheidung an Erdgaskraftwerken nicht aus, sofern diese ohne staatliche Förderung umgesetzt wird.

7 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden zentrale Schlussfolgerungen aus den vorangegangenen Kapiteln abgeleitet.

■ Eine klimaneutrale Industrie bis 2045 ist möglich

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen oder nahezu klimaneutralen Industrie in Deutschland bis zum Jahr 2045 ist technisch und wirtschaftlich möglich, wie mittlerweile mehrere Studien aufzeigen (unter anderem Agora Think Tanks et al. 2024, Fraunhofer ISI et al. 2024, BCG/BDI 2021). Die hierfür notwendigen Technologien bzw. Prozesse sind grundsätzlich verfügbar oder werden in den kommenden Jahren erprobt und hochskaliert.

■ Vorteile einer erfolgreichen Industrie-Transformation in den Blick nehmen

Eine erfolgreiche Transformation der deutschen Industrie in Richtung Klimaneutralität bei gleichzeitiger Sicherstellung einer auch zukünftig bedeutsamen und Wertschöpfung sichernden industriellen Produktion kann gute bezahlte Arbeitsplätze bewahren und Deutschlands Resilienz angesichts möglicher zukünftiger Einschränkungen oder Verwerfungen im Welthandel stärken. Wenn es Deutschland gelingt, bei der industriellen Transformation eine Pionierrolle einzunehmen, können durch die hiermit verbundene Innovationsdynamik Exportmärkte für klimafreundliche Produkte und Produktionsanlagen erschlossen werden. Außerdem können anderen Ländern Anreize gegeben werden, ihre industrielle Produktion ebenfalls in Richtung Klimaneutralität umzustellen.

■ Strukturwandel antizipieren und gestalten

Die Industrie in Deutschland wird im Jahr 2045 nicht nur auf klimaneutrale Prozesse setzen, sondern auch eine andere Struktur aufweisen als heute. Wahrscheinlich werden bestimmte Vorprodukte, die sehr große Mengen an (grüner) Energie benötigen (zum Beispiel Roheisen und Ammoniak), bis 2045 zumindest in Teilen nicht mehr in Deutschland produziert werden, da sie in anderen Regionen der Welt mit besseren und größeren Erneuerbaren-Potenzialen kostengünstiger hergestellt werden können.

Eine solcher (Teil-)Verlust sehr energieintensiver Produktionsprozesse sollte allerdings nicht mit einer „Deindustrialisierung“ Deutschlands gleichgesetzt werden. Eine solche Produktionsverlagerung kann stattdessen sogar dazu beitragen, dass zukünftig ein großer Teil der industriellen Wertschöpfung in Deutschland verbleiben kann, indem energieintensive Vorprodukte wettbewerbsfähig auf dem Weltmarkt eingekauft werden.

Dabei ist es ratsam, diejenigen Teilbereiche der industriellen Wertschöpfungsketten früh zu identifizieren, bei deren Wegbrechen Dominoeffekte (im Sinne von hierdurch ausgelösten verstärkten Abwanderungstendenzen) zu erwarten sind und deren Verbleib in Deutschland aus Gründen der Resilienz gesichert werden sollte.

Ein entsprechender Strukturwandel kann gleichzeitig eine Chance für andere Länder der Welt sein, stärker als bisher an industriellen Wertschöpfungsketten zu partizipieren. Auch vor dem Hintergrund der berechtigten Interessen von Entwicklungs- und Schwellenländern sollte ein solcher Strukturwandel nicht bekämpft, sondern politisch gestaltet werden – unter einem Einbezug anderer Länder auf Augenhöhe. Eine frühzeitige Kooperation Deutschlands mit anderen Ländern bei der Lieferung energieintensiver Vorprodukte (im Sinne von fairen Partnerschaften) kann auch dazu beitragen, mittel- bis langfristig eine Vielzahl potenzieller Exportländer aufzubauen und damit potenziell problematische Importabhängigkeiten zu vermeiden.

Der Strukturwandel sollte in den von Arbeitsplatzabbau betroffenen Regionen im Sinne eines „gerechten Übergangs“ („just transition“) politisch gestaltet werden. Unter anderem sollten in diesen Regionen möglichst frühzeitig vielversprechende alternative Wirtschaftszweige identifiziert und ihre Entwicklung politisch unterstützt werden. Dazu gehört auch, die Unternehmen in diesen Regionen zu befähigen, ihre Kompetenzen und ihre Kreativität in anderen Bereichen erfolgreich einzusetzen („Empowerment“) und damit Beharrungskräfte gar nicht erst entstehen zu lassen. Ebenso frühzeitig sollten insbesondere in diesen besonders betroffenen Regionen im Zusammenspiel zwischen Politik, Unternehmen und Gewerkschaften Maßnahmen zur Aus- und Umbildung von Arbeitnehmer*innen forciert werden.

■ Entschlossene politische Maßnahmen als Voraussetzungen für eine erfolgreiche Industrie-Transformation

Die Transformation der Industrie ist kein Selbstläufer, sondern erfordert bereits kurzfristig entschlossene politische Maßnahmen, insbesondere auf Bundes- und EU-Ebene. Die Umsetzung des im Februar 2025 in Grundzügen vorgestellten „Clean Industrial Deal“ der EU-Kommission stellt in den kommenden Monaten und Jahren eine Gelegenheit dar, um die Bemühungen zur Stärkung der Wettbewerbs- und Transformationsfähigkeit der europäischen Industrie zu intensivieren. Dabei gilt es nicht nur, politische Maßnahmen zu ergreifen, die den Wettbewerbsnachteil hoher Energieträgerpreise adressieren, die sich infolge der Beendigung des Pipeline-Erdgas-Bezugs aus Russland gegenüber konkurrierenden Weltregionen überproportional erhöht haben, sondern auch Verbesserungen weiterer Standortfaktoren (wie Fachkräfteverfügbarkeit, Infrastruktur-Qualität, Bürokratie-Ausmaß) anzustreben.

Solange für Unternehmen die nötigen Investitionen in klimaneutrale Produktionsprozesse aufgrund niedriger CO₂-Preise nicht wirtschaftlich sind, sollte die deutsche und europäische Politik diese Investitionen über zusätzliche Instrumente anreizen. Neben finanzieller Förderung wie Investitionszuschüssen oder Klimaschutzverträgen kommen auch Maßnahmen wie grüne öffentliche Beschaffung oder staatlich vorgegebene Quoten für die Verwendung klimaneutral produzierter Grundstoffe in Frage. Erst förderliche politische Rahmenbedingungen werden die notwendigen privaten Investitionen in neue, klimaneutrale Technologien und Prozesse in der Industrie ermöglichen. Dafür braucht es ein hohes Maß an Verlässlichkeit und Planungssicherheit. Einer Studie von Agora Energiewende (2024) zufolge wird der Investitionsbedarf in der Industrie zwischen 2025 und 2045 rund 500 Mrd. € betragen, wobei knapp zwei Drittel (64 %) davon ohnehin (auch ohne das Ziel der Klimaneutralität) getätigt werden müssten, um alte Anlagen im üblichen Zyklus zu erneuern.

Insbesondere für die Industrie mit ihren typischerweise langen Investitionszyklen kann die mittlerweile verbleibende Zeit, bis das Ziel der Klimaneutralität in Deutschland erreicht werden soll, als sehr kurz eingeschätzt werden. Aufgrund dieser Zeitknappheit wird die Politik zur Zielerreichung in den kommenden Jahren auch Entscheidungen unter Unsicherheit treffen müssen, insbesondere wenn es um die Förderung von Infrastrukturen wie Strom-, Wasserstoff- und CO₂-Netzen geht. Der exakte zukünftige Bedarf für diese Infrastrukturen ist für Politik und Wirtschaft schwierig vorherzusehen. Für Unternehmen, die in den kommenden Jahren in klimaneutrale Anlagen investieren müssen, sind politische Festlegungen hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit zentraler Infrastrukturen und der Stabilität von Fördermaßnahmen für grüne Produktionsanlagen von hoher Bedeutung, um für die teils großen Investitionen eine ausreichende Investitionssicherheit erreichen zu können.

Von zentraler Bedeutung für das Gelingen der Industrie-Transformation ist zudem ein dynamischer Zubau der erneuerbaren Energien – insbesondere von Windenergieanlagen und Photovoltaik – in Deutschland und in anderen europäischen Ländern sowie deren erfolgreiche Integration in das Energiesystem. Bei einer umfassenden Nutzung der in Europa vorhandenen Erneuerbaren-Potenziale könnten für die deutsche und europäische Industrie zukünftig ausreichende Mengen an grünem Strom und grünem Wasserstoff zu konkurrenzfähigen Preisen und zugleich geringen Versorgungsrisiken zur Verfügung stehen.

Auch ein zügiger und möglichst europäisch koordinierter Hochlauf der für eine klimaneutrale Industrie benötigten Infrastrukturen ist von zentraler Bedeutung für eine erfolgreiche Transformation der Industrie. Hierzu zählt insbesondere eine Stärkung der Stromtransport- und -verteilnetze sowie der schrittweise Aufbau von Pipeline-Infrastrukturen sowohl für den Wasserstoff- als auch den CO₂-Transport.

Kurzfristig sollte die Politik prüfen, inwieweit sie Industrieunternehmen unmittelbar unterstützen kann, um ihnen zu helfen, die gegenwärtig schwierige Wettbewerbs- und Konjunkturlage zu überstehen. Kurzfristige Unterstützungsmaßnahmen sollten dabei so ausgestaltet werden, dass sie die notwendigen Veränderungen in Richtung einer klimaneutralen Produktion unterstützen oder zumindest nicht konterkarieren.

■ Belange des Natur- und Ressourcenschutzes bei der Transformation in den Blick nehmen

Bei der anstehenden Transformation des Industriesektors sollte die Politik auch die Belange des Natur- und Ressourcenschutzes nicht aus dem Blick verlieren. Dies spricht dafür, dass ein besonders starkes Augenmerk auf Fortschritte im Bereich der Kreislaufwirtschaft gelegt werden sollte, denn geringere Materialintensitäten, längere Nutzungsdauern und ein möglichst konsequentes Recycling von Materialien wirken entlastend auf den Ressourcenbedarf und mildern die mit Ressourcenentnahme und -transport zusammenhängenden negativen Folgen für die Natur. Zudem sollten – wo immer dies möglich ist – vorhandene Infrastrukturen genutzt bzw. umgewidmet werden, um den Bedarf an neuen Investitionen „auf der grünen Wiese“ so weit wie möglich zu reduzieren.¹⁵ Nichtsdestotrotz werden für eine erfolgreiche

¹⁵ Als Beispiel hierfür dient die Möglichkeit des Umbaus von bestehenden Erdgasleitungen auf den Transport von Wasserstoff.

Transformation der Industrie auch neue bzw. erweiterte Infrastrukturen errichtet werden müssen – eine Berücksichtigung der Potenziale zur Umwidmung bestehender Infrastrukturen wird diesen Bedarf lediglich reduzieren können.

■ Breite gesellschaftliche Unterstützung von zentraler Bedeutung für das Gelingen der Industrie-Transformation

Eine breite gesellschaftliche Akzeptanz ist für den Aufbau neuer Infrastrukturen und für die notwendigen Umbaumaßnahmen an den Produktionsstandorten von zentraler Bedeutung. Eine wichtige Voraussetzung für eine solche breite Akzeptanz ist ein grundsätzliches Verständnis innerhalb der Gesellschaft von den Vorteilen, die mit industrieller Produktion für Deutschland einhergehen, unter anderem hinsichtlich Wertschöpfung, Beschäftigung und Versorgungssicherheit, aber auch hinsichtlich der Potenziale, durch technologische Impulse eine Vorreiterrolle für eine globale grüne Industrie-Transformation einnehmen zu können.

Einen großen Beitrag für eine breite gesellschaftliche Akzeptanz der Industrie-Transformation kann eine mitnehmende Storyline leisten, die verdeutlicht, dass die Transformation des Industriesektors möglich ist und mit zahlreichen Vorteilen verbunden wäre. Soweit wie möglich sollte zudem – auch zur Sicherstellung einer ausreichend hohen gesellschaftlichen Akzeptanz – eine breite gesellschaftliche Teilhabe an der industriellen Transformation angestrebt werden.

Ein umfassendes Verständnis der Vorteile der Industrie-Transformation und eine breite Teilhabe an dem Veränderungsprozess erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass die vor allem in der Übergangsphase anfallenden Mehrkosten (in Form von politischen Fördermaßnahmen und grünen Leitmärkten) seitens der Gesellschaft akzeptiert werden.

8 Exkurs: Gegenwärtige Bedeutung des Industriesektors

Um die notwendige Transformation des Industriesektors und die damit verbundenen Herausforderungen und Chancen besser einordnen zu können, ist ein Verständnis der gegenwärtigen Bedeutung der Industrie sowohl für die deutsche Wirtschaft als auch für den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen Deutschlands von hoher Bedeutung. Dieses Exkurs-Kapitel stellt daher den Status quo der deutschen Industrie sowie die Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit vor.

Dabei wird zunächst in Abschnitt 8.1 auf die Bedeutung des Industriesektors für Bruttowertschöpfung und Arbeitsplätze in Deutschland eingegangen. Anschließend werden der Energie- und Rohstoffbedarf der Industrie dargestellt (Abschnitt 8.2) sowie die Treibhausgasemissionen des Sektors eingeordnet (Abschnitt 8.3). Da einige wenige energieintensive Branchen – allen voran die Stahl-, Chemie- und Zementindustrie – für den Großteil des industriellen Energiebedarfs und auch den Großteil der industriellen Treibhausgasemissionen verantwortlich sind, fokussiert Abschnitt 8.4 anschließend auf diese drei Branchen.

8.1 Bedeutung des Industriesektors für die deutsche Wirtschaft

Grundlegende Indikatoren für die wirtschaftliche Bedeutung eines Sektors sind die im Inland generierte Bruttowertschöpfung, die den Gesamtwert aller im Produktionsprozess erzeugten Waren und Dienstleistungen abzüglich des Werts der im Produktionsprozess verbrauchten, verarbeiteten oder umgewandelten Waren und Dienstleistungen darstellt, sowie die Beschäftigtenanzahl. Auf Grundlage beider Indikatoren wird deutlich, dass die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Industrie (Definition siehe Info-Kasten 8-1) in Deutschland gegenwärtig eine herausragende Stellung einnimmt.

Info-Kasten 8-1 Definition „Industrie“

Als „Industrie“ wird häufig das produzierende Gewerbe bezeichnet, das der Abgrenzung der amtlichen Statistik zufolge das verarbeitende Gewerbe, das Baugewerbe, den Bergbau sowie die Energie- und Wasserversorgung umfasst. Insbesondere in Hinblick auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen, aber auch in Bezug auf Wertschöpfung und Arbeitsplätze stellt das verarbeitende Gewerbe den bedeutendsten Bereich des produzierenden Gewerbes dar. Dieses umfasst alle Industriebetriebe, die Rohstoffe oder Vorprodukte bearbeiten und verarbeiten, um andere Produkte herzustellen bzw. zu montieren, zu veredeln oder zu reparieren. Zum verarbeitenden Gewerbe gehören unter anderem die Branchen Automobilbau und Maschinenbau sowie die energieintensiven Grundstoffindustrien Chemie, Zement und Stahl.

Die Industrie wird von verschiedenen Statistiken bzw. Institutionen im Detail abweichend definiert. So wird beispielsweise die Industrie in der deutschen Treibhausgasbilanzierung enger gefasst als vom Statistischen Bundesamt, insbesondere werden dort Kokereien und Raffinerien nicht der Industrie zugewiesen, sondern der Energiewirtschaft bzw. dem Umwandlungssektor. Da im vorliegenden Bericht Daten von verschiedenen Institutionen verwendet werden, ist zu beachten (und wird teilweise explizit angemerkt), dass die Abgrenzungen des Industriesektors nicht immer einheitlich sind.

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes betrug die Bruttowertschöpfung der deutschen Wirtschaft im Jahr 2023 insgesamt rund 3.825 Mrd. €. Abbildung 8-1 (links) zeigt, dass davon knapp 30 % direkt von der Industrie erwirtschaftet wurden, davon der Großteil (20 %) vom verarbeitenden Gewerbe.

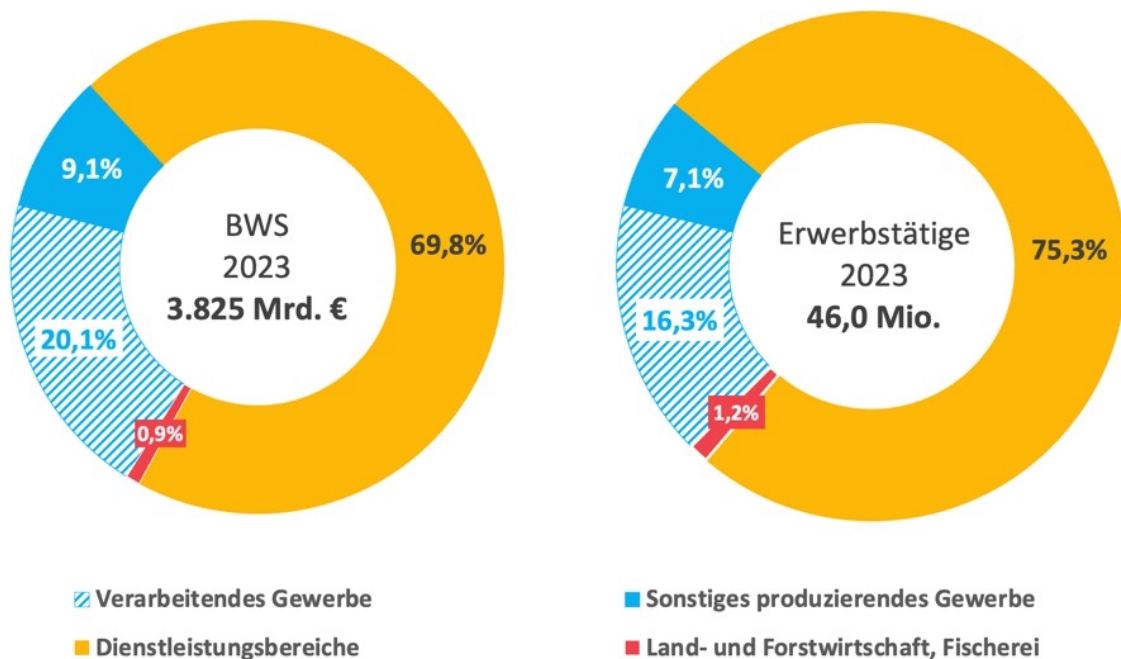


Abb. 8-1 Verteilung der Bruttowertschöpfung (BWS, links) und Anzahl der Erwerbstätigen (rechts) in Deutschland nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2023

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Daten des Statistischen Bundesamtes (2024a, b).

Unterdessen zählte das produzierende Gewerbe 2023 insgesamt rund 10,8 Mio. Erwerbstätige, womit ca. 23 % aller Erwerbstätigen in Deutschland (insgesamt 46 Mio.) in der Industrie beschäftigt waren (Abbildung 8-1, rechts). Der Großteil dieser Erwerbstätigen (16,3 % oder 7,5 Mio.) waren im verarbeitenden Gewerbe tätig.

Dabei ist zu beachten, dass die Bruttowertschöpfung und die Anzahl der Erwerbstätigen im verarbeitenden Gewerbe zu einem bestimmten Zeitpunkt in starkem Maße von äußeren Faktoren beeinflusst werden, darunter globale konjunkturelle Entwicklungen sowie technologische und strukturelle Veränderungen. In Abbildung 8-2 ist daher die Entwicklung der (preisbereinigten) Bruttowertschöpfung und die Entwicklung der Anzahl der Erwerbstätigen im verarbeitenden Gewerbe von 2000 bis 2023 dargestellt (jeweils als Index). Die Bruttowertschöpfung zeigt in diesem Zeitraum – bei konjunkturellen Schwankungen – einen ansteigenden Trend. Die Anzahl der Erwerbstätigen hat sich hingegen seit dem Jahr 2000 nur geringfügig verändert und lag im Jahr 2023 rund 4 % niedriger als im Jahr 2000.

Die divergierende Entwicklung beider Kenngrößen bedeutet, dass die Arbeitsproduktivität je erwerbstätiger Person im verarbeitenden Gewerbe seit dem Jahr 2000 deutlich (um über 40 %) angestiegen ist.

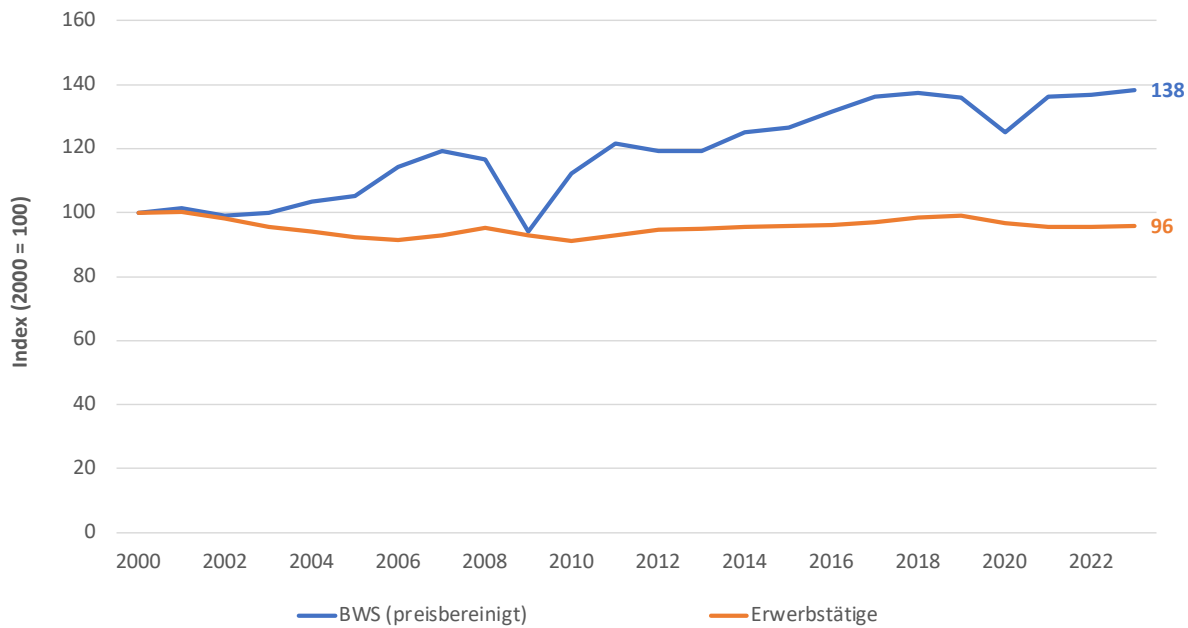


Abb. 8-2 Entwicklung der preisbereinigten Bruttowertschöpfung (BWS) und der Anzahl der Erwerbstätigen im verarbeitenden Gewerbe von 2000 bis 2023

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Daten des Statistischen Bundesamtes (2024a, b).

8.2 Energie- und Rohstoff-Bedarf der deutschen Industrie

Die Industrie ist für ihre Produktionsprozesse und insbesondere für die Bereitstellung von Prozesswärme auf große Mengen an Energie angewiesen. Zieht man den Endenergieverbrauch als Indikator heran, wurden in Deutschland im Jahr 2023 nach vorläufigen Zahlen der AG Energiebilanzen (2024) insgesamt 8.163 Petajoule Endenergie verbraucht, davon 2.245 Petajoule (knapp 28 %) in der Industrie (Vgl. Abbildung 8-3).

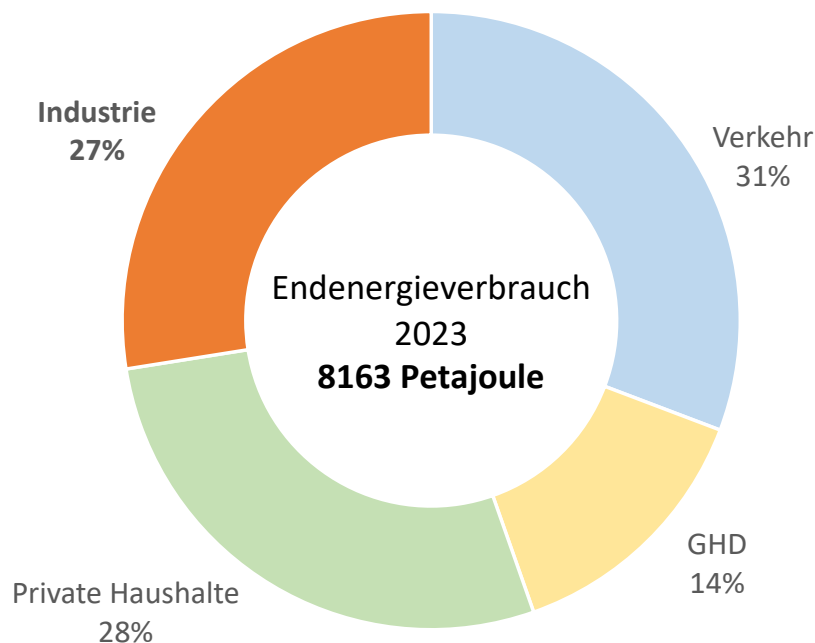


Abb. 8-3 Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023 nach Sektoren

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf vorläufigen Daten und nach sektoraler Abgrenzung von AG Energiebilanzen (2024).

Der Endenergieverbrauch ist in der Industrie seit dem Jahr 2000 auf einem ähnlichen Niveau geblieben, lag allerdings – nicht zuletzt konjunkturbedingt – in den Jahren 2022 und 2023 niedriger als in den Vorjahren. 2023 lag der Verbrauch nach vorläufigen Angaben rund 7 % unter dem Verbrauch des Jahres 2000. Trotz eines deutlichen Anstiegs der Bruttowertschöpfung der Industrie konnte der Energiebedarf in den vergangenen Jahrzehnten also (moderat) reduziert werden, was unter anderem auf Verbesserungen bei der Energieeffizienz, aber auch auf strukturelle Veränderungen in der deutschen Industrie zurückzuführen ist.

Wird der energetische Verbrauch der Industrie nach einzelnen Industriezweigen betrachtet (Abbildung 8-4), so zeigt sich für das Jahr 2022, dass die Metallerzeugung und -verarbeitung mit knapp 800 Petajoule am meisten Energie benötigt – vor allem aufgrund der besonders energieintensiven Eisen- und Stahlerzeugung. An zweiter Stelle folgt die Herstellung von chemischen Erzeugnissen, auf die gut 660 Petajoule entfielen. Aber auch die Kokereien und die Mineralölverarbeitung (rund 320 Petajoule, nach sektoraler Abgrenzung der Klimaschutzgesetz allerdings nicht Teil der Industrie, sondern des Umwandlungssektors) sowie die Herstellung von Glas, Glaswaren, Keramik und Verarbeitung von Steinen und Erden (274 Petajoule) sowie die Herstellung von Papier und Pappe (245 Petajoule) weisen hohe Energieverbräuche auf.

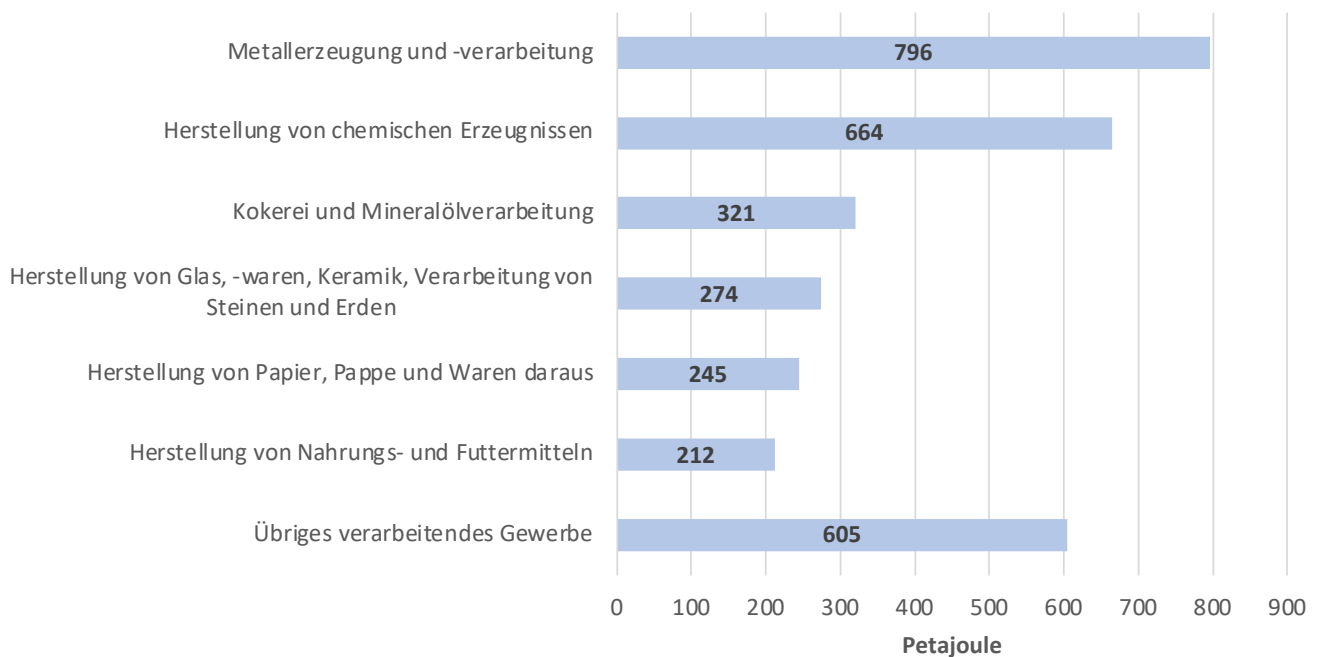


Abb. 8-4 Industrieller Energieverbrauch (ohne stofflichen Verbrauch) nach Branchen im Jahr 2022 (in Petajoule)

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten des Statistischen Bundesamtes (2023).

Ein Blick auf die Energieträgeranteile im Endenergieverbrauch der Industrie (Abbildung 8-5) zeigt zudem, dass im Industriesektor gegenwärtig Gase (im Wesentlichen Erdgas) und Strom die wichtigsten Energieträger darstellen. Beide Energieträger erreichten im Jahr 2023 einen Anteil von 35 % (Gase) bzw. 30 % (Strom) am gesamten Endenergieverbrauch der Industrie (AG Energiebilanzen 2024). Erdgas wird dabei in vielen verschiedenen Industriebranchen eingesetzt, primär als Energieträger zur Bereitstellung von Prozesswärme, aber auch zur Beheizung von Gebäuden. Strom wird in der Industrie insbesondere für die Bereitstellung mechanischer Energie (zum Beispiel für Pumpen oder Druckluft) genutzt, aber zum Teil auch für die Prozesswärmebereitstellung. Kohle stellt mit einem Anteil von 15 % weiterhin einen wichtigen Energieträger für die Industrie dar und wird vor allem in der Eisen- und Stahlindustrie als Reduktionsmittel im Hochofen eingesetzt. Die „übrigen“ Energieträger (insbesondere fremdbezogene Wärme) kommen auf einen Anteil von 10 %. Die direkte Nutzung erneuerbarer Energien (nahezu ausschließlich in Form von Biomasse) spielt mit einem Anteil von 5 % eine relativ geringe Rolle.

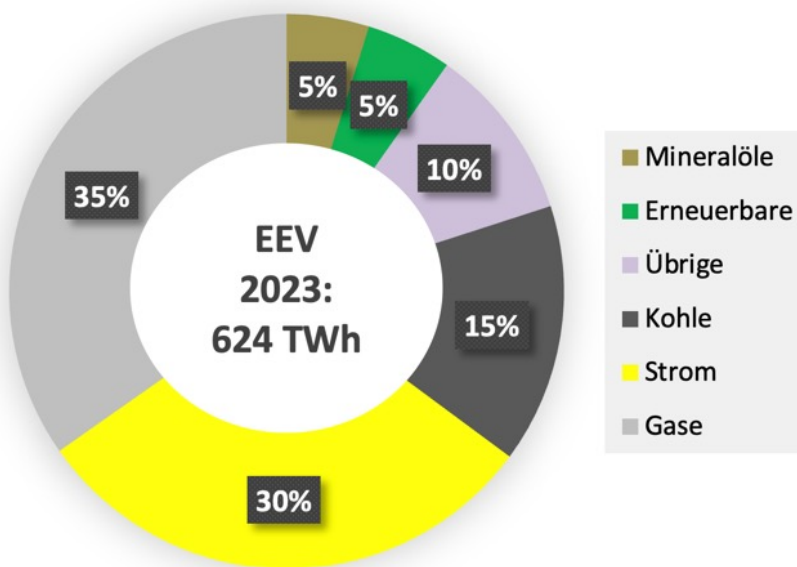


Abb. 8-5 Endenergieverbrauch (EEV) der Industrie nach Energieträgern, 2023

Hinweise: „Übrige“ Energieträger umfassen fremdbezogene Wärme, hergestellte Gase, Abfälle sowie sonstige nicht-erneuerbare Energien

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten der AG Energiebilanzen (2024).

Aufgeteilt nach Anwendungsbereich (siehe Abbildung 8-6) wird etwas mehr als zwei Drittel des Endenergieverbrauchs in der Industrie für Prozesswärme benötigt, gefolgt von mechanischer Energie, beispielsweise für den Betrieb von Motoren oder Maschinen, mit einem Anteil von rund 20 % (Fraunhofer ISI 2024). Kleinere Anteile fallen auf die Anwendungen Raumwärme, Kälteprozesse, Warmwasser, Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) sowie Beleuchtung.

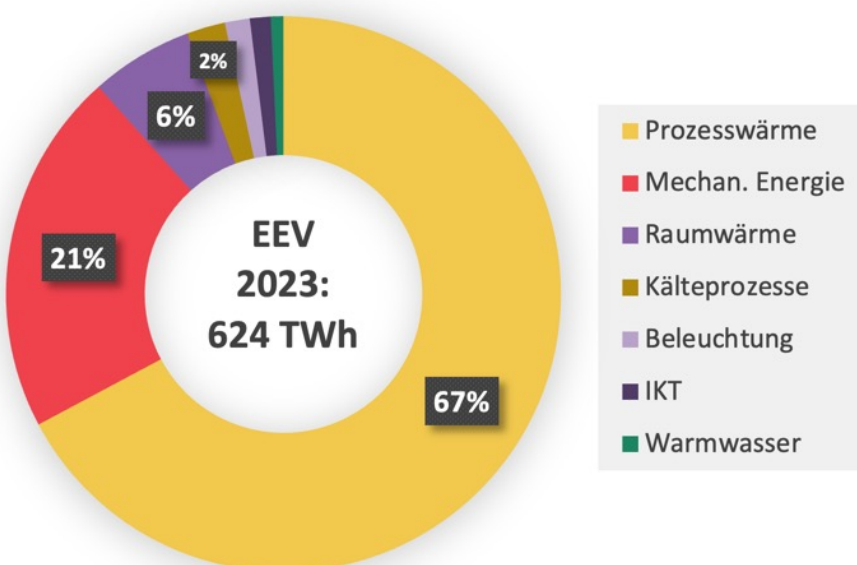


Abb. 8-6 Endenergieverbrauch (EEV) der Industrie nach Anwendungsbereichen, 2023

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten von Fraunhofer ISI (2024).

Energieträger werden in der Industrie zwar überwiegend zur Bereitstellung von Energie in Form von Wärme oder Strom verwendet, zum Teil werden sie jedoch auch nichtenergetisch genutzt, also als Rohstoff („Feedstock“). Dieser nichtenergetische Einsatz von Energieträgern findet vor allem in der chemischen Industrie zur Herstellung von Chemikalien oder Kunststoffen statt – knapp 90 % des Rohstoffbedarfs der Industrie entfallen dabei auf die chemische Industrie. Als Rohstoff dienen hauptsächlich Mineralöle und Erdgas, zu kleinen Teilen auch Kohle. Laut Statistischem Bundesamt (2023) betrug der nichtenergetische Energieverbrauch im Jahr 2022 mit knapp 390 Petajoule etwa 11 % des Gesamtenergieverbrauchs des Industriesektors.

8.3 Anteil der Industrie an den deutschen Treibhausgasemissionen

In Deutschland wurden 2023 nach vorläufigen Angaben des Umweltbundesamtes (UBA 2024a) Treibhausgasemissionen in Höhe von 674 Mio. t CO₂-Äq. verursacht (siehe Abbildung 8-7). Mit 155 Mio. t CO₂-Äq. war die Industrie dabei nach der Energiewirtschaft der Sektor mit den zweithöchsten Emissionen und für ca. 23 % der gesamten Emissionen Deutschlands verantwortlich. Der Industrie kommt damit eine entscheidende Verantwortung und Rolle bei der Erreichung der Klimaziele zu.

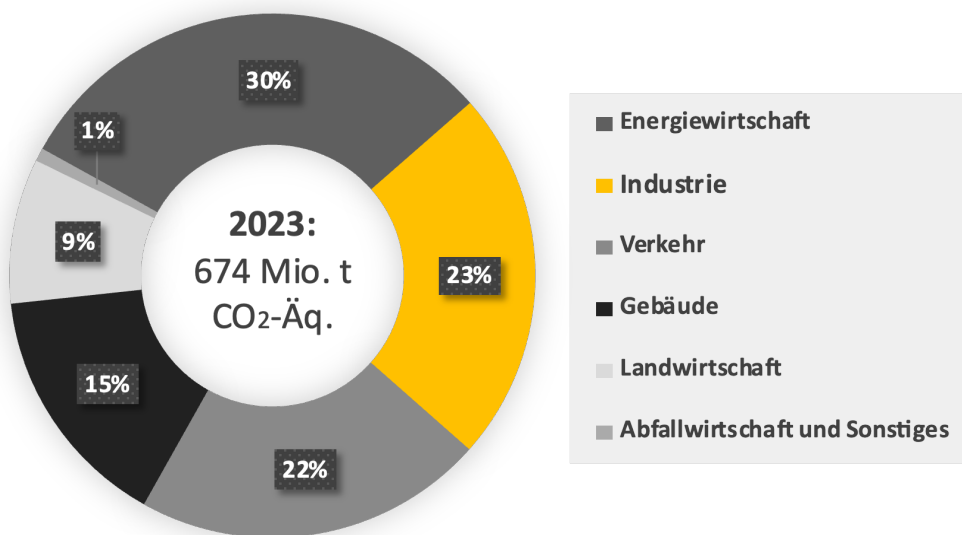


Abb. 8-7 Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2023 in sektoraler Abgrenzung nach Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)

Quelle: Eigene Darstellung nach vorläufigen Zahlen des UBA (2024a).

Auch wenn die Treibhausgasemissionen des Industriesektors zwischen 1990 und 2023 insbesondere durch Energieeffizienzsteigerungen, Prozessoptimierungen und Veränderungen im fossilen Energieträgermix (insbesondere ein deutlicher Rückgang der Kohlenutzung) um 44 % gesenkt werden konnten (siehe Abbildung 8-8), sind intensivierte weitere Anstrengungen erforderlich, um die gesteckten Klimaziele bis Mitte des Jahrhunderts erreichen zu können. In den kommenden Jahren werden nicht mehr nur inkrementelle, sondern vielmehr strukturelle emissionsmindernde Maßnahmen (das heißt insbesondere Umstellungen hin zu disruptiven, klimaneutralen Produktionsprozessen) im Industriesektor umgesetzt werden müssen, um Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 erreichen zu können.

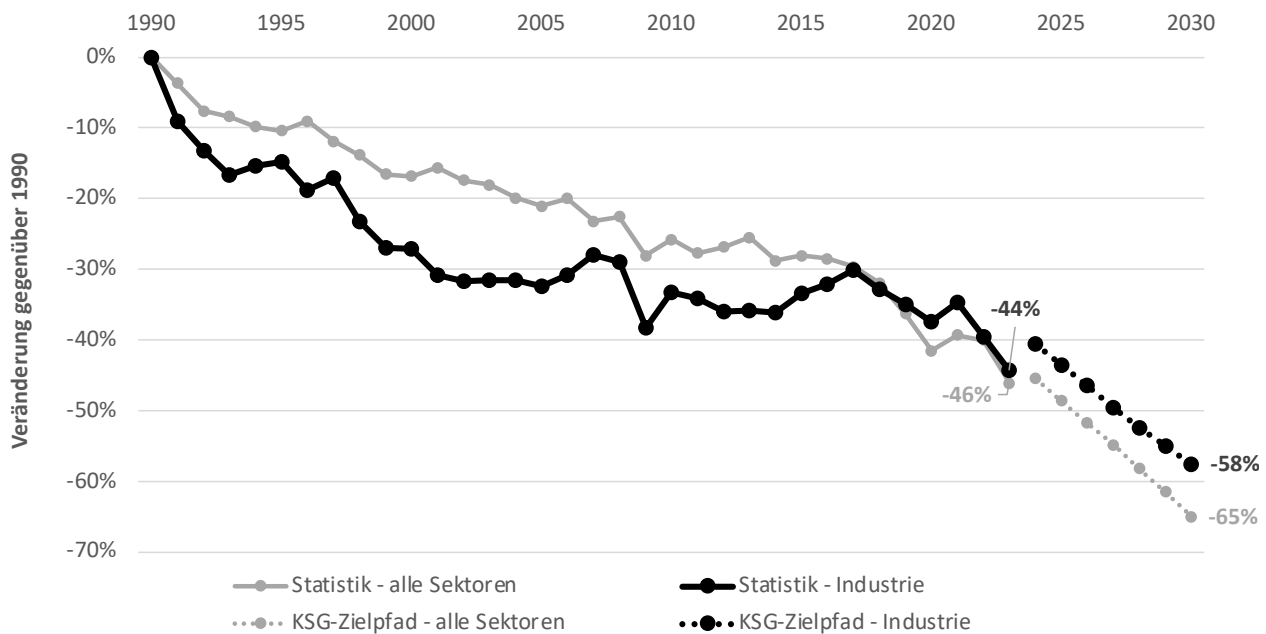


Abb. 8-8 Veränderung der Treibhausgasemissionen aller Sektoren und der Industrie in Deutschland bis 2023 und Zielpfade ab 2024 nach Bundes-Klimaschutzgesetz

Hinweis: KSG-Zielpfad = Zielpfad nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten des UBA (2024a).

Auch das Einhalten des Sektorziels für die Industrie für 2030 nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz (siehe Tabelle 2-1) wird kein „Selbstläufer“. Wie Abbildung 8-8 verdeutlicht, sind die Emissionen des Industriesektors seit dem Jahr 2010 lange Zeit nur noch geringfügig zurückgegangen (zwischen 2010 und 2021 gab es einen Rückgang um lediglich 2 %), bis insbesondere der konjunkturell und energiepreisbedingte starke Rückgang der Produktion energieintensiver Güter in Deutschland zu deutlichen Minderungen der Emissionen in den Jahren 2022 und 2023 geführt hat. Selbst wenn die Emissionsrückgänge dieser beiden Jahre mit berücksichtigt werden, sind die Treibhausgasemissionen des Industriesektors seit dem Jahr 2010 lediglich um durchschnittlich 2,3 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr gesunken. Um das vorgegebene Ziel für den Industriesektor (minus 58 % bis 2030 gegenüber 1990) zu erreichen, wäre zwischen 2024 und 2030 eine durchschnittliche jährliche Minderung von mehr als 5,3 Mio. t CO₂-Äq. notwendig – also mehr als eine Verdopplung der seit 2010 jährlich durchschnittlich erzielten Einsparungen. Zwischen 2030 und 2045 müsste der Emissionsrückgang dann noch ausgeprägter sein: Für einen klimaneutralen Industriesektor im Jahr 2045 müssten die Emissionen in diesem Zeitraum pro Jahr durchschnittlich um rund 8 Mio. t. CO₂-Äq. zurückgehen.

8.4 Fokus auf Branchen mit besonders hohen CO₂-Emissionen

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, sind vor allem die Branchen der energieintensiven Grundstoffindustrie für einen Großteil der industriellen Emissionen und des industriellen Energieverbrauchs in Deutschland verantwortlich. Daher wird in diesem Abschnitt auf die energieintensive Industrie und speziell die drei bezüglich der CO₂-Emissionen dominierenden Branchen Eisen- und Stahlerzeugung, chemische Industrie und Zementindustrie fokussiert. Diese drei Branchen sind

gegenwärtig für rund 60 % der Treibhausgasemissionen der deutschen Industrie verantwortlich (siehe Abbildung 8-9). In diesem Abschnitt werden daher zum einen die besonders emissionsintensiven Prozesse in diesen drei Branchen beschrieben und zum anderen ein Blick auf die Entwicklung der inländischen Produktionsmengen der Branchen in den letzten Jahren geworfen. Denn der jüngste Rückgang der Treibhausgasemissionen im Industriesektor ist im Wesentlichen auf einen konjunktur- und energiepreisbedingten Rückgang dieser Produktionsmengen zurückzuführen.

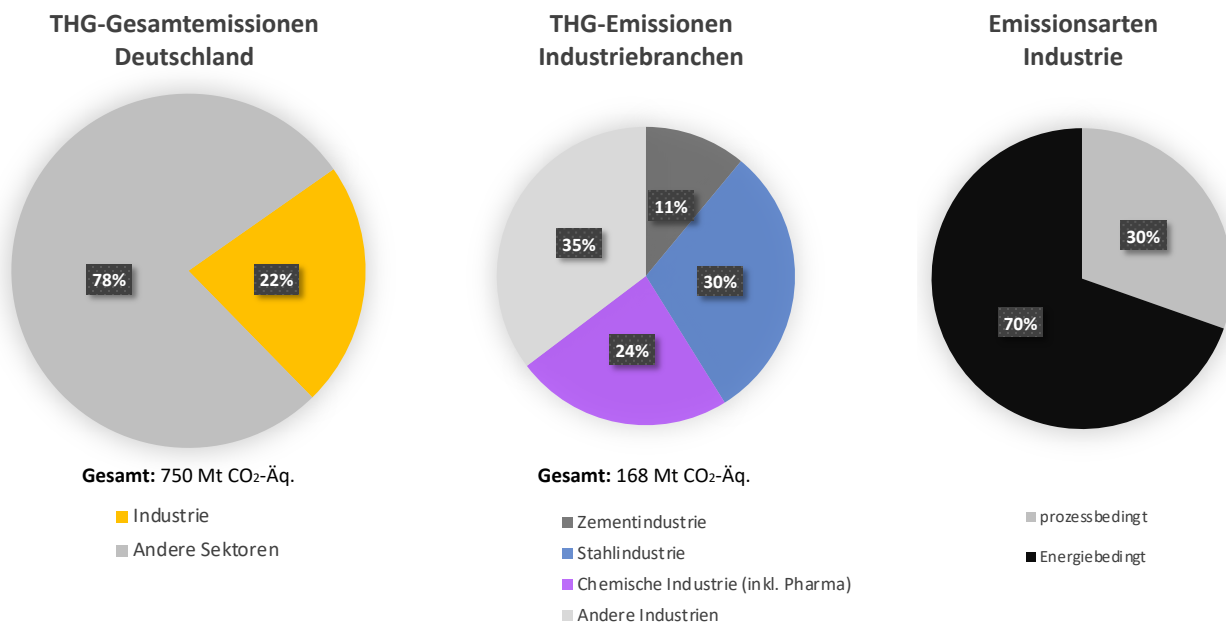


Abb. 8-9 Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2022 und Bedeutung der Industrie sowie einzelner Branchen der Grundstoffindustrie

Hinweis: Aufgrund abweichender Abgrenzungen der verschiedenen verwendeten Quellen ist die Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Industrie nach Industriebranchen (mittlerer Kreis) mit Unschärfen verbunden und sollte lediglich als Orientierung für die ungefähren Größenordnungen dienen.

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Daten von UBA (2024a), VDZ (2024), WV Stahl (2023) und VCI (2024).

Die folgende Abbildung 8-10 verdeutlicht anhand des vom Statistischen Bundesamt erhobenen Produktionsindexes¹⁶ den starken Rückgang der Produktion in den energieintensiven Industriezweigen seit Anfang 2022. Die energieintensiven Industriezweige umfassen neben den Branchen Stahl, Chemie und Zement auch weitere Branchen wie Papier, Glas und Aluminium. Der Produktionsrückgang in diesen Branchen seit Anfang 2022 ist deutlich ausgeprägter als der Produktionsrückgang in der gesamten Industrie: Der Produktionsindex der energieintensiven Industriezweige lag im Dezember 2024 knapp 22 % niedriger als im Dezember 2021. Der Produktionsindex der gesamten Industrie (verarbeitendes Gewerbe und Bergbau) gab im gleichen Zeitraum hingegen weniger stark nach, nämlich nur um 11 %.

¹⁶ Der Produktionsindex für die energieintensiven Industriezweige wird als gewichteter Mittelwert der industriellen Produktionsindizes für die betreffenden Wirtschaftszweige berechnet. Die Gewichte entsprechen der relativen Bruttowertschöpfung zu Faktorkosten im Basisjahr 2015.

Produktionsentwicklung in energieintensiven Industriezweigen

2021 = 100

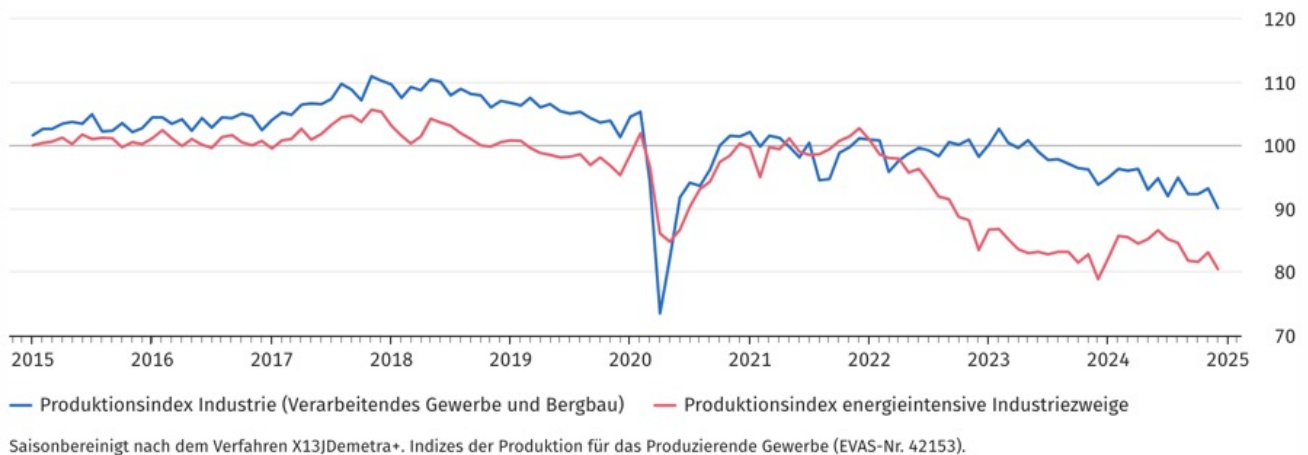


Abb. 8-10 Produktionsentwicklung in energieintensiven Industriezweigen im Vergleich zur Gesamtindustrie von Januar 2015 bis Dezember 2024

Quelle: Statistisches Bundesamt (2025b).

8.4.1 Eisen- und Stahlindustrie

Im Jahr 2023 wurden in Deutschland ca. 35,4 Mio. t Rohstahl erzeugt, davon ca. 70 % über die konventionelle Hochofenroute (Primär- bzw. Oxygenstahl) und 30 % über die Elektrostahlroute (Sekundärstahl) (WV Stahl 2024). Abbildung 8-11 zeigt die Entwicklung der deutschen Stahlproduktion seit dem Jahr 2000. Während die Anteile von Primär- und Sekundärstahl seitdem weitgehend konstant geblieben sind, ist die Rohstahlproduktion seit 2018 deutlich zurückgegangen. So lag die Rohstahlproduktion im Jahr 2023 auf dem niedrigsten Stand seit dem Krisenjahr 2009 und rund 7 Mio. t bzw. mehr als 15 % unter dem Durchschnittsniveau der vorherigen 20 Jahre. Dieser starke Produktionsrückgang lässt sich zum einen auf das in den vergangenen Jahren erhöhte Energiepreinsniveau zurückführen, das die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Stahlindustrie im internationalen Markt negativ beeinflusst hat, zum anderen aber auch auf Nachfragerückgänge in anderen konjunktursensiblen Branchen wie der Automobilindustrie oder der Bauwirtschaft, die in Deutschland zu den größten Abnehmerinnen von Stahl gehören.

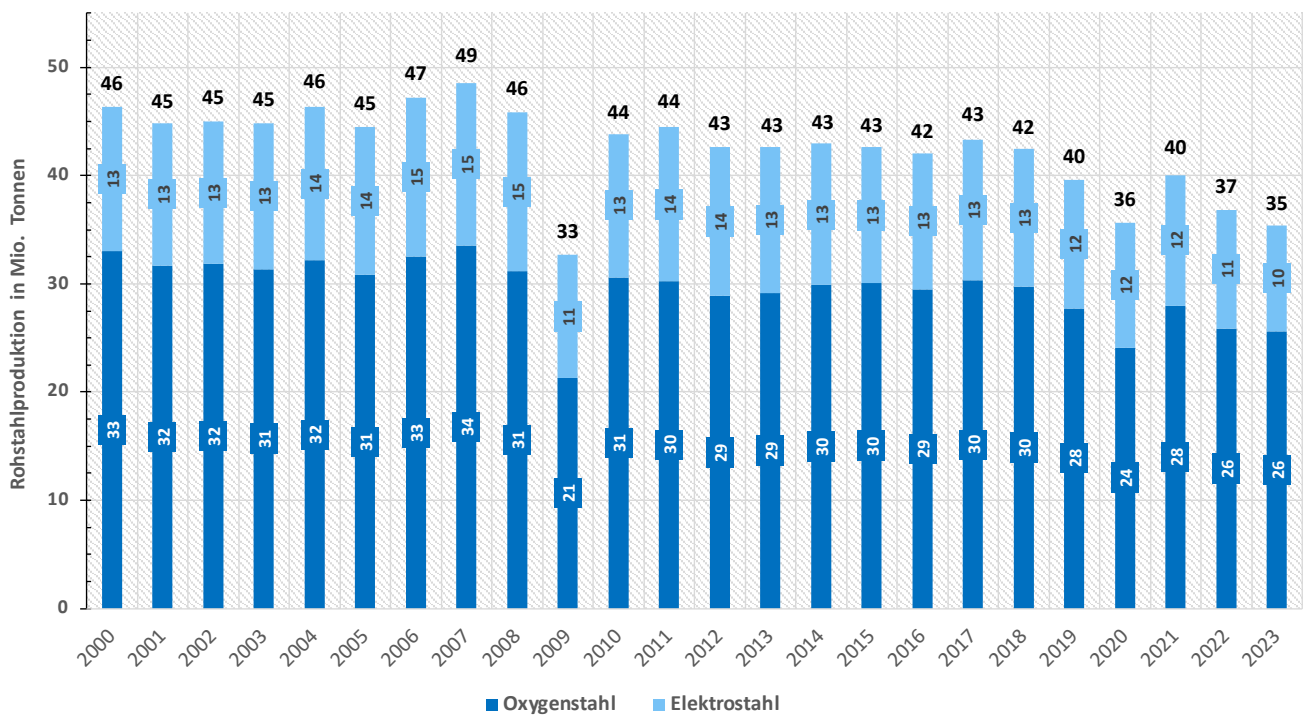


Abb. 8-11 Entwicklung der Rohstahlproduktion nach Verfahrensort in Deutschland von 2000 bis 2023

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Daten der WV Stahl (2024 (und ältere Ausgaben dieser Reihe), 2025).

Abbildung 8-12 veranschaulicht die wesentlichen Prozessschritte der gegenwärtig dominierenden und auf Kohle basierenden Hochofenroute, die hauptsächlich für die CO₂-Emissionen der Stahlindustrie verantwortlich sind.

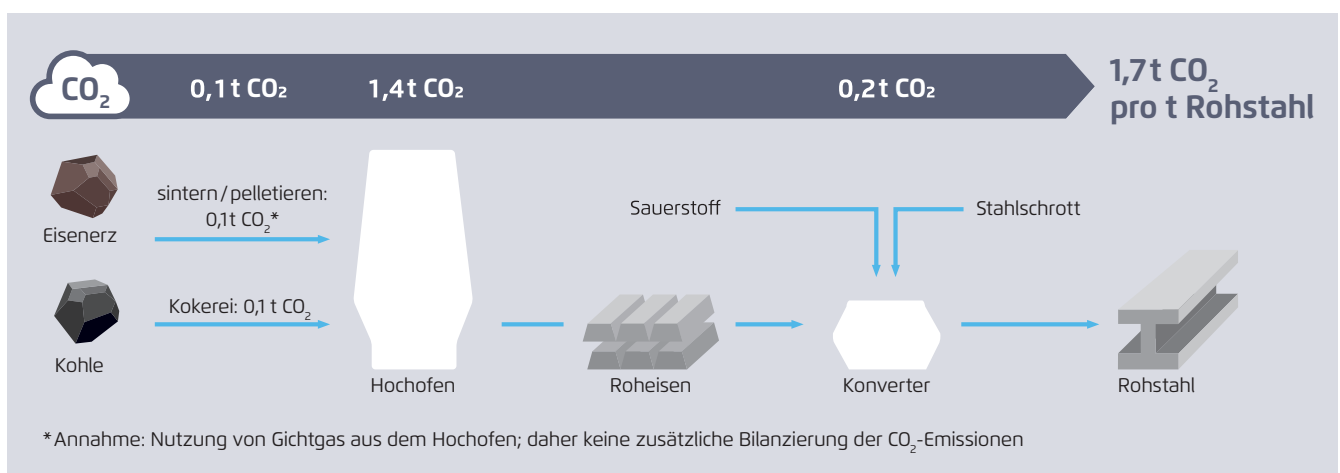


Abb. 8-12 Prozessschritte und CO₂-Emissionen der Rohstahlproduktion (konventionelle Hochofenroute)

Quelle: Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019), unter Verwendung der CC BY Lizenz.

Stahl wird gegenwärtig klassischerweise in integrierten Hüttenwerken produziert, deren Herzstück der Hochofen bildet, weshalb diese Route auch als „Hochofenroute“ bezeichnet wird. Die Hochofenroute basiert auf der Reduktion von Eisenerz mit Hilfe von fossiler Kohle zu elementarem Eisen. Dazu wird die Kohle zunächst in Kokereien

zu Koks verarbeitet. Gleichzeitig wird das feine Eisenerz in Sinteranlagen unter Zugabe von Zuschlagstoffen zu größeren Stücken – dem Sinter – gesintert. Anschließend wird der Koks zusammen mit dem Sinter dem Hochofen zugeführt, wo das Eisenerz bei hohen Temperaturen zu elementarem Eisen reduziert wird. Das durch die hohen Temperaturen geschmolzene und reduzierte Roheisen wird anschließend in Konvertern mit Sauerstoff aufgeblasen, um den restlichen Kohlenstoff zu verbrennen und aus Roheisen Stahl zu erzeugen. Neben Roheisen wird dem Konverter zusätzlich Stahlschrott zugegeben, um einerseits den Roheiseneinsatz zu reduzieren und andererseits durch seine kühlende Wirkung eine Überhitzung des Konverters zu vermeiden.

Der größte Teil der Treibhausgasemissionen der Hochofenroute entsteht bei der Reduktion des Eisenerzes im Hochofen, wobei der Kohlenstoff des Kokses mit dem Sauerstoff des Eisenerzes zu Kohlenmonoxid (CO) und CO₂ reagiert und insgesamt rund 1,4 t CO₂ pro Tonne Rohstahl verursacht. Weitere 0,1 t CO₂ entstehen in der Kokerei und der Sinteranlage sowie 0,2 t CO₂ pro Tonne Rohstahl im Konverter. Insgesamt ergeben sich für die Hochofenroute somit spezifische Emissionen von 1,7 t CO₂ pro Tonne Rohstahl.

Bei der Sekundärroute findet hingegen nur das einschmelzen von Stahlschrott in Elektrolichtbogenöfen (Electric Arc Furnace; EAF) unter Einsatz von Strom statt, jedoch keine Reduktion von primärem Eisenerz. Die Sekundärroute ist daher mit deutlich weniger Energieaufwand und Treibhausgasemissionen verbunden. So wird nur ca. ein Viertel der Energie benötigt und da nur geringe Mengen an fossilen Energieträgern eingesetzt werden müssen, ist die Produktion auch mit deutlich weniger direkten Treibhausgasemissionen verbunden bzw. im Wesentlichen vom zugrundeliegenden Emissionsfaktor des Strommixes abhängig.¹⁷

8.4.2 Chemische Industrie

Die Produktionsprozesse in der chemischen Industrie sind vielfältig und komplex. Sie umfassen eine Vielzahl chemischer Reaktionen, physikalischer Trennverfahren und anderer komplexer Prozesse. Zu den wichtigsten Produkten der chemischen Industrie zählen Grundchemikalien, Spezialchemikalien, Pharmazeutika und Agrochemikalien, die in verschiedenen Branchen Anwendung finden (VCI 2024). Die Treibhausgasemissionen der chemischen Industrie entstehen vor allem durch den Einsatz fossiler Energieträger – nicht zuletzt für die Bereitstellung von Prozesswärme, aber auch durch prozessbedingte chemische Reaktionen, bei denen CO₂ freigesetzt wird.

Die Polymer- sowie die Ammoniakproduktion stellen zwei Bereiche der chemischen Industrie dar, die besonders hohe CO₂-Emissionen verursachen. Sie werden daher im Folgenden näher betrachtet.

Polymerproduktion

Um eine Tonne Kunststoff (hier beispielhaft Polyethylen) zu produzieren (siehe Abbildung 8-13), wird als Ausgangsrohstoff heute vorwiegend Erdöl verwendet. Dabei

¹⁷ In der Sekundärroute entstehen durch Elektrodenabbrand und Zugabe von Kohlenstoff im Elektrolichtbogenofen geringfügige direkte Treibhausgasemissionen.

fallen bereits bei der Erdölförderung durch den benötigten Energieeinsatz sowie durch das Abfackeln von überschüssigem Methan CO₂-Emissionen in Höhe von 0,3 t pro Tonne Kunststoff an. Anschließend werden aus dem Erdöl in Raffinerien über einen Destillationsprozess verschiedene Produkte wie unter anderem Naphtha gewonnen. Für die Destillation des Erdöls sind Temperaturen von über 200 °C notwendig, wobei energiebedingt CO₂-Emissionen in Höhe von etwa 0,2 t pro Tonne Kunststoff entstehen.

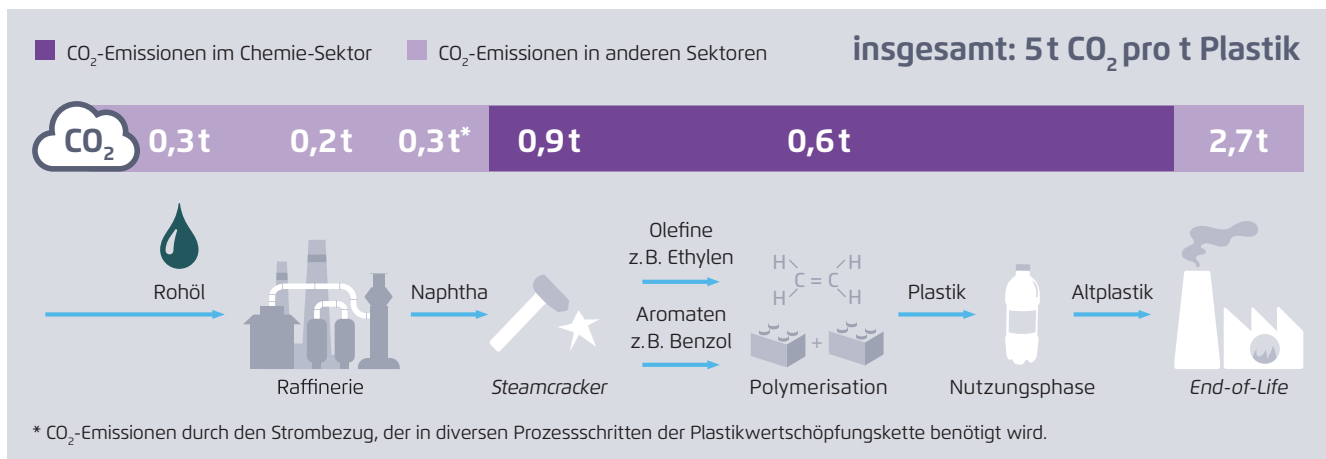


Abb. 8-13 Prozessschritte und CO₂-Emissionen der Kunststoff-Wertschöpfungskette

Quelle: Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019), unter Verwendung der CC BY Lizenz.

Für die petrochemische Industrie in Deutschland macht Naphtha den Großteil der verwendeten Rohstoffe aus. Naphtha wird in Steamcrackern in kürzerkettige Kohlenwasserstoffe – Olefine und Aromaten – aufgebrochen (gecrackt). Um den Spaltungsprozess im Steamcracker zu betreiben, sind hohe Temperaturen von rund 600 bis 900 °C notwendig, wofür ein Teil des Produktmixes aus dem Steamcracker zur Wärmebereitstellung verbrannt wird. Dies führt zu weiteren energiebedingten Emissionen von etwa 0,9 t CO₂ pro Tonne Kunststoff.

Im nächsten Schritt werden die Olefine oder Aromaten – unter Zugabe von Dampf und Wärme – in einem Polymerisationsprozess zu vielfältigen Kunststoffen verarbeitet. Dazu zählen unter anderem verschiedenste Plastiksarten wie Polyethylen und Polypropylen für Verpackungen, Polyvinylchlorid sowie Schaumstoffe, Beschichtungen, Gummi und viele weitere Erzeugnisse. Für eine Tonne Kunststoff entstehen in diesem Prozessschritt ungefähr 0,6 t CO₂, wobei die entstehende CO₂-Menge je nach Kunststoffart variiert.

Nach der Nutzungsphase der vielfältigen Produkte der chemischen Industrie wird ein Großteil der Produkte wieder eingesammelt. Allerdings wird nur ein Teil aller Kunststoffe mechanisch recycelt und wiederverwertet. Mehr als die Hälfte der anfallenden Altkunststoffe wird heute in Müllverbrennungsanlagen und als Ersatzbrennstoff zum Beispiel in Zementwerken thermisch verwertet, wobei signifikante Mengen von 2,7 t CO₂ pro Tonne Altkunststoff entstehen.

Bilanziert man zusätzlich noch die CO₂-Emissionen von etwa 0,3 t CO₂, die für den Strom in vielen der beschriebenen Prozessschritte anfallen, ergeben sich so insgesamt Emissionen von ca. 5 t CO₂ pro Tonne Kunststoff (Polyethylen). Der

chemischen Industrie selbst werden davon allerdings nur etwa 1,5 bis 1,8 t CO₂ zugeordnet (entsprechend der Emissionen des Steamcrackings, der Polymerisierung und – sofern kein Fremdbezug des Stroms erfolgt – der Stromerzeugung zur Deckung des Strombedarfs), während der Rest (Raffinerien, Verbrennung von Altplastik) im Energiesektor bzw. in der Zementindustrie (soweit dort Altplastik als alternativer Brennstoff eingesetzt wird) bilanziert wird.

Ammoniakproduktion

Für die Ammoniaksynthese (siehe Abbildung 8-14) sind große Mengen Wasserstoff (H₂) notwendig, die heute größtenteils über die Dampfreformierung von Erdgas gedeckt werden. Zusammen mit Stickstoff (N), der aus der Verbrennungsluft des Reformers zur Verfügung steht, wird der Wasserstoff im Haber-Bosch-Verfahren zu Ammoniak (NH₃) synthetisiert. Ammoniak dient überwiegend als Vorprodukt für harnstoffbasierten Dünger, für den neben Ammoniak noch eine Kohlenstoffquelle als Rohstoff („Feedstock“) benötigt wird.

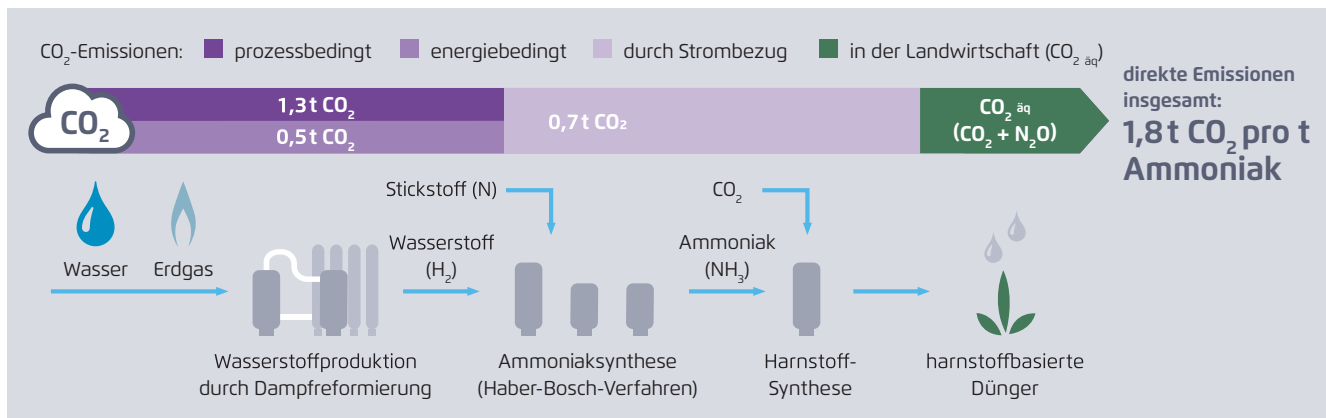


Abb. 8-14 Prozessschritte und CO₂-Emissionen der Ammoniaksynthese als Teil der Dünger-Wertschöpfungskette

Quelle: Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019), unter Verwendung der CC BY Lizenz.

Bei der Dampfreformierung entsteht durch die Reaktion von Erdgas mit Wasserdampf neben Wasserstoff auch prozessbedingtes CO₂ in Höhe von 1,3 t CO₂ pro Tonne Ammoniak. Dieses wird – im Falle der Düngemittelproduktion – jedoch nicht als Emission in die Atmosphäre geleitet, sondern aus dem Reformerabgas abgeschieden und der Harnstoffsynthese direkt als Kohlenstoffquelle zugeführt. Das CO₂ ist dadurch zwar zunächst chemisch in den Düngemitteln gebunden, wird aber – sobald diese in der Landwirtschaft ausgebracht werden – zeitlich verzögert als Emission freigesetzt. Zusätzlich entstehen bei der Ammoniakproduktion energiebedingte Emissionen in Höhe von 0,5 t CO₂ pro Tonne Ammoniak, da weiteres Erdgas zur Bereitstellung des erforderlichen Temperaturniveaus des Reformers benötigt wird. Durch den notwendigen Strombezug entstehen zudem (indirekt) weitere 0,7 t CO₂ pro Tonne Ammoniak. Insgesamt verursacht die Produktion einer Tonne Ammoniak demnach ca. 1,8 t CO₂ bzw. 2,5 t CO₂, wenn die indirekten Emissionen aus dem Strombezug mit einbezogen werden.

8.4.3 Zementindustrie

Die Zementindustrie ist ein wichtiger Teil der deutschen Bauwirtschaft, da Zement als Hauptbestandteil von Betonen für den Bau von Gebäuden und Infrastruktur unverzichtbar ist. Im Jahr 2023 verteilte sich die deutsche Zementindustrie auf 33 Zementwerke mit eigener Zementklinkererzeugung sowie auf 20 weitere Standorte, die nur reine Mahlwerke, jedoch keine eigenen Öfen betreiben (VDZ 2025). Die folgende Abbildung 8-15 zeigt die Entwicklung der Zementproduktion in Deutschland seit dem Jahr 2000. Während die Produktion der letzten zehn Jahre zunächst einen leichten Aufwärtstrend zeigte, ist diese in den Jahren 2022 und 2023 wiederum deutlich gesunken und lag 2023 nur noch bei 28,2 Mio. t Zement – der niedrigste Wert der letzten 20 Jahre. Die Zementindustrie ist in besonderem Maße und unmittelbar von den konjunkturellen Schwankungen in der Baubranche betroffen. So zeigen sich seit 2022 deutliche Auftragsrückgänge in der Baubranche, die nicht zuletzt auf gestiegene Materialkosten, ein höheres Zinsniveau sowie die allgemeine konjunkturelle Schwäche zurückzuführen sind.

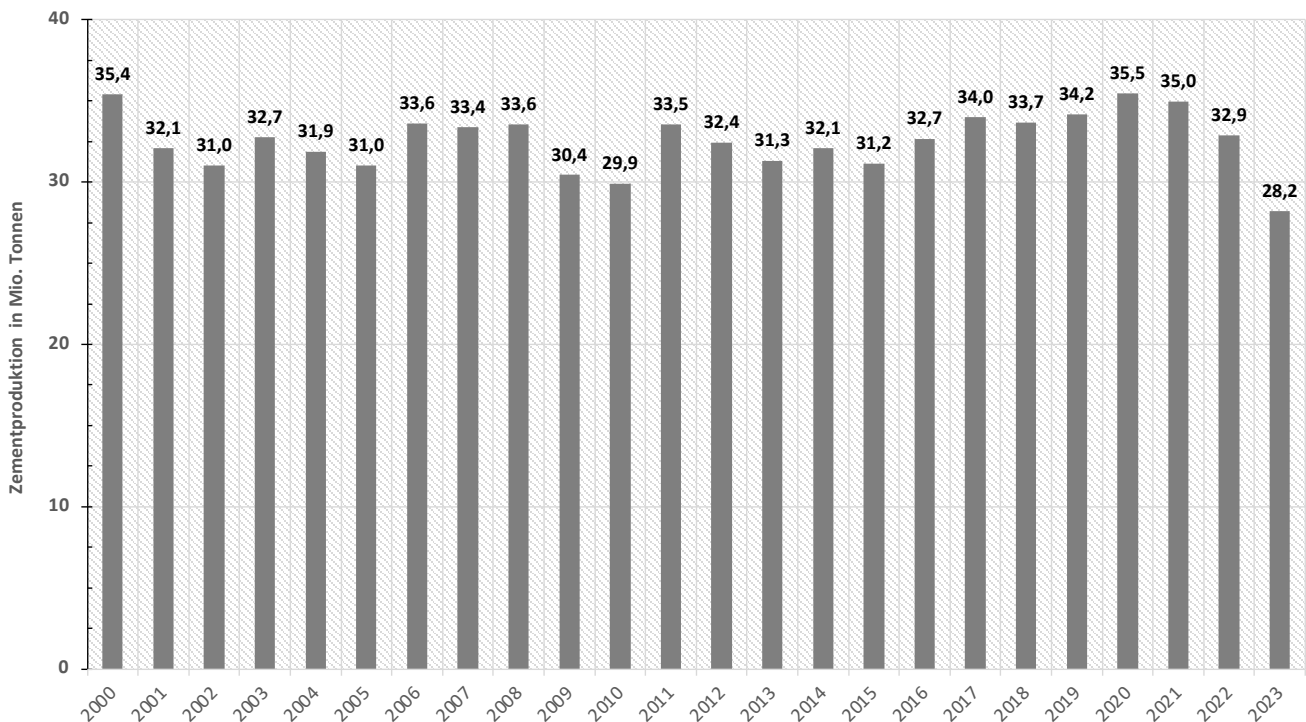


Abb. 8-15 Entwicklung der Zementproduktion in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2023

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten des VDZ (2024 und ältere Ausgaben dieser Reihe).

Die Herstellung von Zement erfolgt in mehreren Schritten (siehe Abbildung 8-16): Zunächst wird das Rohmaterial Kalkstein (CaCO_3) zusammen mit Ton und anderen Zuschlagstoffen in einem Kalzinator entsäuert und in einem Drehrohrofen bei Temperaturen von etwa 1.450 °C gebrannt, wobei der so genannte Zementklinker entsteht. Der Zementklinker wird anschließend zu einem feinen Pulver gemahlen und mit Gips oder anderen Zuschlagstoffen (zum Beispiel Hüttensand aus der Stahlindustrie) zum Endprodukt Zement vermischt.

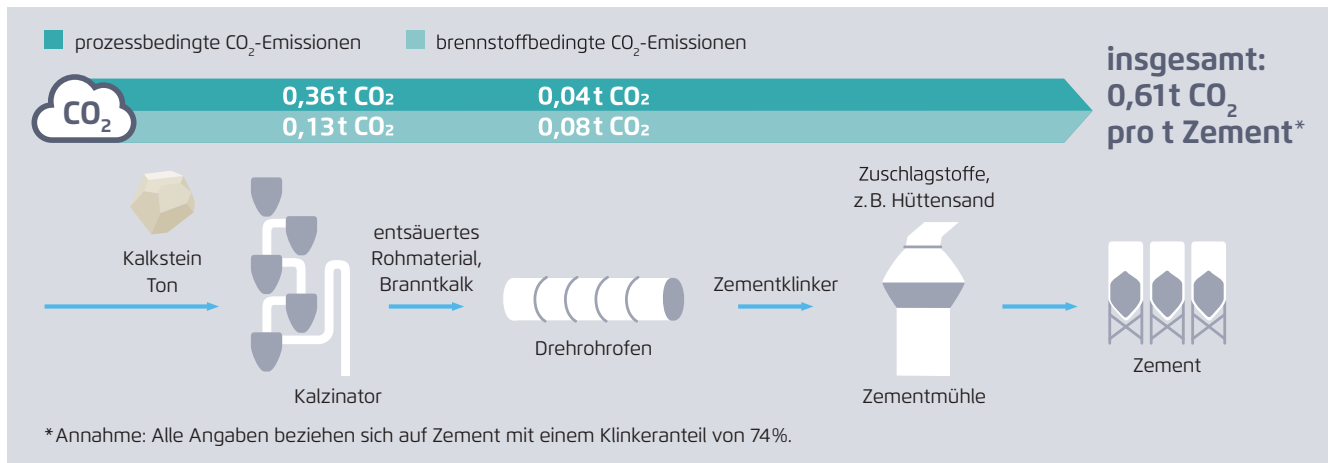


Abb. 8-16 Prozessschritte und direkte CO₂-Emissionen der Zementproduktion

Quelle: Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019), unter Verwendung der CC BY Lizenz.

Die Zementherstellung ist mit erheblichen CO₂-Emissionen verbunden, insbesondere durch die Freisetzung prozessbedingter Emissionen (0,4 t CO₂ pro Tonne Zement), die bei der Entsäuerung und beim Brennen des kohlenstoffhaltigen Kalksteins entstehen. Hinzu kommen brennstoffbedingte Emissionen in Höhe von rund 0,2 t CO₂ pro Tonne Zement, sodass sich insgesamt spezifische Emissionen von etwa 0,6 t CO₂ pro Tonne Zement ergeben.

Auch der Energieverbrauch bei der Zementherstellung ist erheblich. Der überwiegende Teil der benötigten Energie wird in Form von thermischer Energie bereitgestellt, die durch die Verbrennung von Kohle, Erdgas oder Sekundärbrennstoffen wie Altöl oder Altreifen gewonnen wird. Zusätzlich wird elektrische Energie für den Betrieb der Mahlanlagen und anderer Produktionsanlagen benötigt.

Angesichts der hohen Energie- und Emissionsintensität steht die deutsche Zementindustrie vor großen Herausforderungen, ihre Prozesse nachhaltiger zu gestalten. In den letzten Jahren haben die Zementhersteller verschiedene Maßnahmen ergriffen, um ihre Umweltauswirkungen zu reduzieren. Dazu gehören der vermehrte Einsatz alternativer Brennstoffe, die Steigerung der Energieeffizienz und die teilweise Substitution des CO₂-intensiven Zementklinkers durch neue Zuschlagstoffe. Allein durch diese Maßnahmen können die prozessbedingten Emissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins jedoch nicht vermieden werden, weshalb für dieses CO₂ die Entwicklung und Etablierung passender Abscheide- und Speicherverfahren (Carbon Capture and Storage, CCS) vorangetrieben werden (siehe Abschnitt 3.4) müssen.

Glossar

Bruttowertschöpfung

Die Bruttowertschöpfung wird durch Abzug der Vorleistungen von den Produktionswerten errechnet; sie umfasst also nur den im Produktionsprozess geschaffenen Mehrwert. Die Bruttowertschöpfung ist bewertet zu Herstellungspreisen, das heißt ohne die auf die Güter zu zahlenden Steuern (Gütersteuern), aber einschließlich der empfangenen Gütersubventionen. (Statistisches Bundesamt 2025c)

Carbon Capture and Storage (CCS)

Carbon Capture and Storage (CCS) bezeichnet ein Verfahren zur Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (CO₂), das bei industriellen Prozessen wie der Stahl- oder Zementproduktion entsteht. Dabei wird das CO₂ direkt an der Emissionsquelle abgeschieden, verdichtet und entweder unterirdisch in geologischen Formationen gespeichert oder für industrielle Anwendungen weiterverwendet (CCU – Carbon Capture and Utilization). CCS gilt als eine Übergangslösung zur Reduzierung von Industrieemissionen, besonders in Bereichen, in denen eine vollständige Dekarbonisierung technisch schwierig ist.

Direktreduktionsanlage (DRI-Anlage)

Eine Direktreduktionsanlage ist eine industrielle Anlage zur Herstellung von Eisen aus Eisenerz, ohne dass ein Hochofen benötigt wird. Statt Koks kommt gasförmiger Wasserstoff oder Erdgas zum Einsatz, um das Eisenerz zu reduzieren (Entfernung des Sauerstoffs aus dem Erz). Das entstehende Produkt, Eisenschwamm (Direct Reduced Iron, DRI), kann anschließend direkt in Elektrolichtbogenöfen zu Stahl weiterverarbeitet werden. Über einen Zwischenschritt in elektrischen Einschmelzern, kann daraus aber auch zunächst ein flüssiges Roheisen (ähnlich wie im Hochofen) erzeugt werden und anschließend in Konvertern zu Stahl weiterverarbeitet werden. Bei Verwendung von vollständig auf erneuerbaren Energien basierendem Wasserstoff kann auf diese Weise nahezu CO₂-neutraler Stahl hergestellt werden. (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019)

Drehrohrofen

Ein Drehrohrofen ist ein zentrales Element bei der Herstellung von Zement. In ihm wird eine aus dem Kalzinator (s. unten) kommende Materialmischung auf rund 1.450 °C erhitzt und dabei zu Zementklinker verbacken (gesintert). Im Drehrohrofen fallen sowohl brennstoffbedingte als auch prozessbedingte Emissionen an. (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019)

Elektrischer Einschmelzer (ESF)

Ein elektrischer Einschmelzer (Electric Smelting Furnace, ESF) ist eine Anlage, die zur Verflüssigung von metallischen Rohstoffen wie Eisenschwamm (DRI) dient. Dabei wird elektrische Energie genutzt, um das Material auf hohe Temperaturen zu erhitzen und für die Weiterverarbeitung, beispielsweise in einem Konverter, vorzubereiten. Diese Technologie ermöglicht eine flexible und klimafreundliche Stahlproduktion, insbesondere wenn erneuerbarer Strom verwendet wird. Sie soll beispielsweise bei thyssenkrupp in Duisburg für die zukünftige Stahlerzeugung eingesetzt werden.

Elektrokessel

Elektrokessel nutzen elektrische Energie mittels Elektroden zur Erzeugung von Dampf oder Warmwasser. In Kombination mit nachgeschalteten elektrischen Überhitzern können Temperaturbereiche bis zu etwa 500 °C erreicht werden. (Unternehmensnetzwerk Klimaschutz 2025)

Elektrolichtbogenofen (EAF)

Ein Elektrolichtbogenofen (EAF) ist eine Anlage zur Stahlerzeugung, die entweder Stahlschrott oder aus Eisenerz gewonnenes DRI einschmelzt. Durch leistungsstarke Elektroden wird ein Lichtbogen erzeugt, der Temperaturen von über 3.000 °C erreicht und die Einsatzstoffe schmilzt. Im Vergleich zum Hochofenverfahren verursacht der EAF deutlich geringere CO₂-Emissionen, insbesondere wenn erneuerbarer Strom genutzt wird.

Elektrolyseur

Ein Elektrolyseur ist eine Anlage, die mithilfe von elektrischem Strom Wasser (H₂O) in seine Grundkomponenten Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) spaltet. Je nach Technologie unterscheidet man unter anderem alkalische Elektrolyseure (AEL), Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseure (PEM) und Hochtemperaturelektrolyseure (SOEC). Wenn der benötigte Strom aus erneuerbaren Energien stammt, spricht man von grünem Wasserstoff, der eine zentrale Rolle in der klimaneutralen Industrie spielt. Er kann fossile Brennstoffe ersetzen und in Bereichen wie der Stahlproduktion, der chemischen Industrie oder der Energiespeicherung eingesetzt werden.

Energiebedingte Emissionen

Energiebedingte Emissionen sind Emissionen, die durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdgas oder Öl zur Energiegewinnung entstehen. Sie treten in der Industrie unter anderem bei der Erzeugung von Prozesswärme auf. Eine Reduzierung dieser Emissionen kann durch den Einsatz erneuerbarer Energien, die Elektrifizierung von Produktionsprozessen oder effizientere Technologien erreicht werden. In einer klimaneutralen Industrie sollen fossile Brennstoffe durch grünen Strom, Wasserstoff oder nachhaltige Biomasse ersetzt werden.

Gradientenbeton

Gradientenbeton steht für eine neue Variante des Kunststeins, bei der man die Materialeigenschaften innerhalb von Betonbauteilen stufenlos „gradientiert“. So lässt sich die materielle Zusammensetzung in unterschiedlichen Bereichen des Bauteils flexibel an die jeweiligen äußeren Beanspruchungen und Belastungen anpassen. Das Mittel dazu ist eine gezielte Manipulation der Materialdichte im Bauteilinneren. (Grimm 2023)

Hochofen

Ein Hochofen ist eine großtechnische Anlage zur Gewinnung von Roheisen aus Eisenerz. In einem kontinuierlichen Prozess wird das Erz zusammen mit Koks und Zuschlagstoffen in den Ofen eingebracht und bei über 2.000 °C reduziert, das heißt der im Eisenerz enthaltene Sauerstoff wird vom Eisen getrennt. Das entstehende Roheisen enthält hohe Mengen an Kohlenstoff und muss weiterverarbeitet werden, um Stahl herzustellen (s. „Konverter“).

Kalzinator

Ein Kalzinator ist eine zentrale Anlage in der Zementproduktion, in der Kalkstein (CaCO_3) bei Temperaturen von ca. 850 bis 900 °C erhitzt wird, um CO_2 abzuspalten (zu entsäuern) und daraus Branntkalk (CaO) zu gewinnen. Durch die Entsäuerung ist dieser Prozess mit hohen prozessbedingten CO_2 -Emissionen verbunden. (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019)

Konverter

Ein (Sauerstoff-) Konverter ist eine metallurgische Anlage zur Stahlherstellung, in der das kohlenstoffreiche Roheisen aus dem Hochofen oder elektrischen Einschmelzern in Stahl umgewandelt wird. Dabei wird reiner Sauerstoff in das flüssige Roheisen eingeblasen, wodurch der überschüssige Kohlenstoff verbrennt, sowie weitere störende Begleitelemente entfernt werden. Dieses Verfahren, auch als Linz-Donawitz-Verfahren (LD-Verfahren) bekannt, verursacht durch die Verbrennung des Kohlenstoffs prozessbedingte CO_2 -Emissionen. (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019)

Kunststoffindustrie

In der Verarbeitungskette der Kunststoffe lässt sich die Petrochemie und die Polymerchemie unterscheiden. Während in der Petrochemie aus kohlenstoffhaltigen Einsatzstoffen die olefinischen Monomere wie Ethylen, Propylen und Butylen sowie die aromatischen Monomere Benzol, Toluol und Xylol entstehen (siehe Steamcracker), werden diese Monomere in der Polymerchemie zu höhermolekularen Polymeren (wie Polyethylen, PET und PVC) weiterverarbeitet. Das mittelständisch geprägte „verarbeitende Gewerbe“ produziert aus den Polymeren unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Additive, Farbstoffe und Füllstoffe anwendungsbezogene Kunststoffe für Gebäude, Fahrzeuge, Verpackungen und weitere Bereiche.

Prozessbedingte Emissionen

Prozessbedingte Emissionen sind Emissionen, die nicht aus der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen, sondern direkt aus chemischen Reaktionen in industriellen Prozessen freigesetzt werden. Ein Beispiel ist die Zementproduktion, bei der CO_2 bei der Kalzinierung von Kalkstein freigesetzt wird. Die Minderung dieser Emissionen ist besonders herausfordernd, da sie nicht allein durch den Einsatz erneuerbarer Energien vermieden werden können. Technologien wie Carbon Capture and Storage (CCS) oder alternative Materialien sind daher entscheidend für eine klimaneutrale Industrie.

Pyrolyseöl

Pyrolyseöl kann aus dem thermochemischen Recycling von Kunststoffabfällen gewonnen werden. Bei diesem auch als Pyrolyse genannten Prozess werden Polymere aus den Kunststoffabfällen unter Ausschluss von Sauerstoff und unter Einwirkung thermischer Energie (Temperaturniveau von über $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) in kürzere Kohlenwasserstoffketten aufgespalten. Pyrolyseöl kann als Rohstoff für die Herstellung neuer und qualitativ hochwertiger Kunststoffe verwendet werden. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz 2025)

Sekundärstahl

Bei Sekundärstahl handelt es sich um Stahl auf Basis von Stahlschrott, der üblicherweise im Elektrolichtbogenofen (s. oben) aufgeschmolzen wird und dadurch zu neuen Stahlprodukten verarbeitet werden kann.

Steamcracker

Steamcracker sind in der Regel der Ausgangspunkt der Produktion chemischer Grundstoffe. Beim Steamcracken (deutsch: Dampfspaltung) werden Kohlenwasserstoffe wie Naphtha, aber auch Ethan, Propan und Butan, in kurzkettige oder ungesättigte Kohlenwasserstoffe umgewandelt. (Scheuermann 2024)

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2024). Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland – Daten für die Jahre von 1990 bis 2023. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/11/awt_2023_d.pdf
- Agora Energiewende (2024). Investitionen für ein Klimaneutrales Deutschland – Finanzbedarfe und Politikoptionen. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_347_KNDE_Investitionsbedarfe_WEB.pdf
- Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019). Klimaneutrale Industrie – Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf
- Agora Industry (2022). Mobilising the circular economy for energy-intensive materials – How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production. https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2021/2021_02_EU_CEAP/A-EW_254_Mobilising-circular-economy_study_WEB.pdf
- Agora Industry, Wuppertal Institute & Lund University (2024). Low-carbon technologies for the global steel transformation – A guide to the most effective ways to cut emissions in steelmaking. https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2021/2021-06_IND_INT_GlobalSteel/A-IND_324_Low-Carbon-Technologies_WEB.pdf
- Agora Industry & Wuppertal Institute (2023). 15 Insights on the Global Steel Transformation. https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2021/2021-06_IND_INT_GlobalSteel/A-EW_298_GlobalSteel_Insights_WEB.pdf
- Agora Think Tanks (2024). Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf
- Agora Think Tanks, Prognos AG, Öko-Institut e.V., Wuppertal Institut & Universität Kassel (2024). Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung – Vertiefung der Szenariopfade. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_349_KNDE_Szenariopfade_WEB.pdf
- BCG & BDI – Boston Consulting Group & Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (2021). Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>
- BDI – Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (2024). Implementierung des CO₂-Grenzausgleichsmechanismus – Bürokratie und Herausforderungen für die deutsche Wirtschaft. <https://bdi.eu/artikel/news/implementierung-des-co2-grenzausgleichsmechanismus>
- Bilici, S.; Holtz, G.; Jülich, A. et al. (2024). Global trade of green iron as a game changer for a near-zero global steel industry? – A scenario-based assessment of regionalized impacts. *Energy and Climate Change*, 5, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100161>
- BMU – Bundesministerium für Umwelt (Hrsg.) (2021). GreenTech made in Germany 2021 – Umwelttechnik-Atlas für Deutschland. https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_greentech_atlas_2.pdf
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024). Wasserstoff-Kernnetz genehmigt – der Aufbau der Zukunftsinfrastruktur kann beginnen. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/10/20241022-wasserstoff-kernnetz.html>
- Brudermüller, M.; Neugebauer, R.; Ploss, R.; Süssenguth, F. & Liepold, A. (2023). Elektrolyseure: Schlüsseltechnologie für die Wasserstoffwirtschaft. <https://www.aca-tech.de/publikation/elektrolyseure/download-pdf?lang=de>

- Buchholz, W.; Dippl, L. & Eichenseer, M. (2019). Subsidizing renewables as part of taking leadership in international climate policy: The German case. *Energy Policy*, 129, 765-773. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.044>
- Bundesnetzagentur (2024). Jahresbilanz 2024: Die Energiewende kommt weiter voran – Stromnetzausbau zeigt deutlichen Fortschritt. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241227_Netzausbau_Bilanz.html
- Bundesnetzagentur (2025). MaStR – Marktstammdatenregister. <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Datendownload>
- Bundesregierung (2024). Die Carbon-Management-Strategie. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/carbon-management-strategie-2289146>
- Bundesverband WindEnergie (2025a). 2024: Windenergie-Rekordjahr bei Zuschlägen und Genehmigungen. <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/detail/2024-windenergie-rekordjahr-bei-zuschlaegen-und-genehmigungen/>
- Bundesverband Windenergie (2025b). Ausbau der Offshore-Windenergie 2024 – Neue Regierung muss handeln: Branche braucht mehr Planbarkeit!. <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/detail/ausbau-der-offshore-windenergie-2024-neue-regierung-muss-handeln-branche-braucht-mehr-planbarkeit/>
- Bundesverband WindEnergie (2025c). Windenergie in Deutschland – Zahlen und Fakten. <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>
- Day, C. J. (2022). Why industrial location matters in a low-carbon economy. *Structural Change and Economic Dynamics*, 63, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2022.10.004>
- DIHK – Deutsche Industrie- und Handelskammer (2024). Kreislaufwirtschaft als Chance? Die DIHK-Umfrage zur Circular Economy. <https://www.dihk.de/resource/blob/117788/4847632a7db7d7cdf922f1dc55e6ac8a/dihk-circular-economy-report-2024-v3-data.pdf>
- Ember (2025). European electricity prices and costs. <https://ember-energy.org/data/european-electricity-prices-and-costs/>
- EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (2024). Die Bedeutung von Wasserstoffspeichern – Eine Analyse der Bedarfe, Potenziale und Kosten. https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2024/03/EWI_Die-Bedeutung-von-Wasserstoffspeichern.pdf
- Expertenrat für Klimafragen (2024). Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024 – Sondergutachten gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz. https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2024/06/ERK2024_Sondergutachten-Pruefung-Projektionsdaten-2024.pdf
- Fraunhofer ISI (2024). Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2021 bis 2023 für die Sektoren Industrie und GHD. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/01/Anwendungsbilanz_Industrie_2023_vorlaeufig-update_20241028.pdf
- Fraunhofer ISI, Consentec, TU Berlin & IFEU (2024). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 – O45-Szenarien – Modul Industriesektor. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Industriebericht_v11.pdf
- FZ Jülich (2023). Energieperspektiven 2030 – Detailergebnisse. https://www.fz-juelich.de/de/ice/ice-2/aktuelles/news/energieperspektiven-2030/detailergebnisse_ep2030.pdf/@download/file
- Gielen, D.; Saygin, D.; Taibi, E. & Birat, J.-P. (2020). Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study. *Journal of Industrial Ecology*, 24 (5), 1113-1125. <https://doi.org/10.1111/jiec.12997>
- Grimm, R. (2023): Was ist Gradientenbeton?. <https://www.baustoffwissen.de/was-ist-gradientenbeton-31102023>

- JRC – Joint Research Centre (2024). GHG Emissions of all World Countries – 2024. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet/GHG_emissions_of_all_world_countries_booklet_2024report.pdf
- KEI – Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (Hrsg.) (2024). Flexibilisierung elektrifizierter Industrieprozesse – Eine Analyse der technischen und ökonomischen Herausforderungen aus Unternehmens- und Systemperspektive. https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916_KEI_Studie_FlexIPro_final_barrierefrei.pdf
- KfW Research (2021). Die Zukunft ist grün – welche Chancen bieten sich der deutschen Wirtschaft?. <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2021/Fokus-Nr.-355-November-2021-Die-Zukunft-ist-gruen.pdf>
- Material Economics (2019). Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. <https://materialeconomics.com/sites/default/files/2024-06/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf>
- Packroff, J. (2024). Experten: CO₂-Zertifikate für Industrie und Strom bis 2039 aufgebraucht. <https://www.euractiv.de/section/finanzen-und-wirtschaft/news/experten-co2-zertifikate-fuer-industrie-und-strom-bis-2039-aufgebraucht/>
- Prognos, Öko-Institut & Wuppertal Institut (2023). Souveränität Deutschlands sicher – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045. https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf
- RWTH & PWC (2023). European battery recycling market analysis – A profitable and sustainable business before 2035. <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/recycling-european-battery.html>
- Samadi, S.; Fischer, A. & Lechtenböhmer, S. (2023). The renewables pull effect: How regional differences in renewable energy costs could influence where industrial production is located in the future. *Energy Research & Social Science*, 104, 103257. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103257>
- Samadi, S. & Barthel, C. (2020). Vergleich der Strategien für weitgehenden Klimaschutz in der Industrie in deutschen, europäischen und globalen Szenarien. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 70 (10), 32-36. <https://d-nb.info/1222100827/34>
- Scheuermann, A. (2024). Was ist ein Steamcracker?. <https://www.chemietechnik.de/anlagenbau/was-ist-ein-steamcracker-248.html>
- Statistisches Bundesamt (2023). Energieverbrauch der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Nutzung des Energieverbrauchs, Wirtschaftszweige, Energieträger. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/43531/table/43531-0001>
- Statistisches Bundesamt (2024a). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Inlandsproduktberechnung – Detaillierte Jahresergebnisse. https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-endgueltig-xlsx-2180140.xlsx?__blob=publicationFile&v=23
- Statistisches Bundesamt (2024b). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Inlandsproduktberechnung – Vierteljahresergebnisse. https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-vierteljahr-pdf-2180120.pdf?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt (2025a). 15. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland. <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/index.html>
- Statistisches Bundesamt (2025b). Bedeutung der energieintensiven Industriezweige in Deutschland. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/produktionsindex-energieintensive-branchen.html>

- Statistisches Bundesamt (2025c). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Bruttowertschöpfung. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Glossar/bruttowertschoepfung.html>
- Trollip, H.; McCall, B. & Bataille, C. (2022). How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization. *Climate Policy*, 22 (2), 236-247. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2024123>
- UBA – Umweltbundesamt (2021). Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-12-10_texte_92-2021_potenzialanalyse-kunststoffrecycling.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2024a). Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland in der Abgrenzung der Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2024_03_13_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_thg_v1.0.xlsx
- UBA – Umweltbundesamt (2024b). Klimaemissionen sinken 2023 um 10,1 Prozent – größter Rückgang seit 1990 – UBA-Projektion: Nationales Klimaziel bis 2030 erreichbar. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaemissionen-sinken-2023-um-101-prozent>
- UBA – Umweltbundesamt (2024c). Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2024d). Die Umweltwirtschaft in Deutschland Produktion, Umsatz und Außenhandel – Aktualisierte Ausgabe 2023. https://www.wipol.uni-hannover.de/fileadmin/wipol/publications/04_2024_uib_umweltwirtschaft_in_deutschland_0.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2024e). Indikator: Beschäftigte im Bereich Erneuerbare Energien. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-beschaefigte-im-bereich-erneuerbare>
- Unternehmensnetzwerk Klimaschutz (2025). Übersicht: Technologien für klimaschonende Prozesswärme. <https://www.klima-plattform.de/klimaguide/guideinhalte/artikel/umweltfreundliche-prozesswaerme>
- VCI – Verband der Chemischen Industrie e. V. (2024). Chemiewirtschaft in Zahlen 2024. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chiz-historisch/chemiewirtschaft-in-zahlen-2024.pdf>
- VDI Zentraum Ressourceneffizienz (2025). Thermochemisches Recycling oder Pyrolyse. <https://www.ressource-deutschland.de/rohstoffliches-recycling/pyrolyse/>
- VDZ – Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2024). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2023. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2023.pdf
- VDZ – Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2025). Zementindustrie in Deutschland. <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zahlen-und-daten/zementindustrie-in-deutschland>
- Verpoort, P. C.; Gast, L.; Hofmann, A. & Ueckerdt, F. (2024). Impact of global heterogeneity of renewable energy supply on heavy industrial production and green value chains. *Nature Energy*, 9, 491-503. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01492-z>
- Wang, C.; Walsh, S.D.C.; Wenig, Z.; Haynes, M.W.; Summerfield, D. & Feitz, A. (2023). Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (83), 32277-32293. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.041>
- Witte, K.; Große-Kreul, F.; Reichmann, A.; Weber, N. & Altstadt, L. (2023). Akzeptanz von industriellem CCS in Nordrhein-Westfalen – Empfehlungen für Politik und Industrie. https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/publications/In_Brief_2023-11.pdf

- Wolf, S. & Lüken, M. (2024). Future Battery Market, in: Passerini, S. et al. (Hrsg.). *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition – Cost, Sustainability, and Performance Analysis*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48359-2_7
- WV Stahl (2023). Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2023_Web.pdf
- WV Stahl (2024): Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Daten-und-Fakten-2024_RZ-Web.pdf
- WV Stahl (2025): Rohstahlproduktion in Deutschland: Auch 2024 endet auf Rezessionsniveau. <https://www.wvstahl.de/pressemitteilungen/rohstahlproduktion-in-deutschland-auch-2024-endet-auf-rezessionsniveau/>