
Chemie im Wandel

Die drei Grundpfeiler für die Transformation
chemischer Wertschöpfungsketten

IMPULS

Agora
Industrie



Chemie im Wandel

IMPRESSUM

IMPULS

Chemie im Wandel:
Die drei Grundpfeiler für die Transformation
chemischer Wertschöpfungsketten

ERSTELLT VON / IM AUFTRAG VON

Agora Industrie
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-industrie.de
info@agora-industrie.de

PROJEKTPARTNER

Carbon Minds GmbH
www.carbon-minds.com
info@carbon-minds.com

Energy and Process Systems Engineering,
ETH Zürich
www.epse.ethz.ch
abardow@ethz.ch

PROJEKTLEITUNG

Paul Münnich
paul.muennich@agora-energiewende.de

Philipp D. Hauser (bis September 2022)

AUTORINNEN UND AUTOREN:

Paul Münnich, Julian Somers, Julia Metz,
Utz Tillmann, Camilla Oliveira (alle Agora
Industrie); Ronja Hermanns, Aline Kalousdian,
Raoul Meys (alle Carbon Minds); André Bardow,
Benedikt Winter (alle ETH Zürich)



This work is licensed under
CC BY-NC-SA 4.0.

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit mit
Vertreterinnen und Vertretern von Unternehmen
und Forschungseinrichtungen entwickelt. Mit die-
ser Veröffentlichung möchten wir allen Beteilig-
ten für ihre Unterstützung, ihre fachliche Kompe-
tenz und für die konstruktive Diskussion danken.
Die Schlussfolgerungen und Ergebnisse dieser
Veröffentlichung spiegeln nicht notwendiger-
weise die Positionen der Beteiligten wider. Die
Verantwortung für die Ergebnisse liegt bei Agora
Industrie, Carbon Minds und der Gruppe Energy
and Process Systems Engineering der ETH Zürich.

Für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Erstel-
lung dieser Publikation danken wir insbesondere
Philipp D. Hauser, Shahriar Mohammadzadeh,
Oliver Sartor, Frank Peter (alle Agora Industrie);
Alexandra Steinhardt, Anja Werner, Jahel Mielke,
Janne Görlach, Simon Müller (alle Agora Energie-
wende); Wiebke Nowack, Wilhelm Klümper,
Arnaud Brizay, Christine Chemnitz (alle Agora
Agrar); Nergiz Tigu (Carbon Minds).

Satz: Karl Elser Druck GmbH | Theo Becker
Korrektorat: Berit Sörensen
Titelbild: EVAfotografie | iStock

299/04-I-2023/DE

Version: 1.1, November 2023



Unter diesem QR-Code steht
diese Publikation als PDF zum
Download zur Verfügung.

Bitte zitieren als:

*Agora Industrie (2023): Chemie im Wandel.
Die drei Grundpfeiler für die Transformation
chemischer Wertschöpfungsketten.*

www.agora-industrie.de

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

der Chemiesektor ist der größte industrielle Verbraucher von Erdgas in Deutschland. Die Energiekrise, die Verknappung des Erdgasangebots und die hohen Preise infolge des Angriffs von Russland auf die Ukraine haben die Branche schwer getroffen. Mit dem Preisdruck hat sich jedoch auch ein Gelegenheitsfenster aufgetan, um die notwendige Transformation zur Erreichung der Klimaziele für die Industrie zu beschleunigen und damit im weltweiten Wettbewerb um klimaneutrale Produkte und Technologien voranzugehen.

Für die chemische Industrie kommt es jetzt darauf an: Schlägt sie den Transformationspfad in Einklang mit den Klimazielen ein, der die begrenzten heimischen Ressourcen und die Resilienz von Wertschöpfungsketten berücksichtigt und stärkt damit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Branche? Um dies zu unterstützen und die Innovationskraft für eine

klimaneutrale chemische Industrie zu stärken, braucht es auf nationaler und europäischer Ebene einen politischen Rahmen, der Investitionen in die Technologien der Zukunft anreizt.

Vor diesem Hintergrund legt diese Studie einen Transformationspfad für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Chemieindustrie vor, der auf drei Grundpfeilern fußt: auf direkter Elektrifizierung und Flexibilität, einer verbesserten Kreislaufwirtschaft sowie erneuerbaren Rohstoffen. Wenn diese drei Strategien zusammen umgesetzt werden, kann dies sektorübergreifend Synergien fördern und klimapositive CO₂-Senken entlang der Wertschöpfungskette schaffen.

Ich wünsche Ihnen eine angenehme Lektüre!

Frank Peter
Direktor, Agora Industrie

Ergebnisse auf einen Blick:

1

Hohe Preise für fossile Energien und die Verschärfung des europäischen Emissionshandels (EU-ETS) erfordern eine zügige Transformation der chemischen Industrie: Bis 2040 muss sie aus der Nutzung fossiler Energien aussteigen und klimaneutral werden. Um die Transformation zu ermöglichen und Innovation, Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Europa zu erhalten, müssen Unternehmen und Politik entschlossen handeln.

2

Mehr als die Hälfte der Treibhausgasemissionen von chemischen Produkten entsteht mit ihrem Nutzungsende bei der Verbrennung von Abfällen. Strategien zur Emissionsminderung in der chemischen Industrie müssen daher den gesamten Lebenszyklus der Produkte adressieren. Durch die Kombination aus 1) direkter Elektrifizierung der Prozesswärme, 2) der Stärkung der Kreislaufwirtschaft, und 3) dem Einsatz biogener Rohstoffe kann das Potenzial des Sektors für die nachhaltigere Nutzung und Speicherung von Kohlenstoff erschlossen werden.

3

Angebots- und nachfrageseitige Politikmaßnahmen müssen die ETS-Reform flankieren. Investitionsförderung und Technologiestandards schaffen Anreize für Elektrifizierung. Mindestquoten im Recycling ermöglichen eine verbesserte Kreislaufführung. In Kombination mit einer möglichst langfristigen Nutzung von begrenzten Biomasseressourcen sinkt der zusätzliche Strom- und Wasserstoffbedarf auf ein Minimum.

4

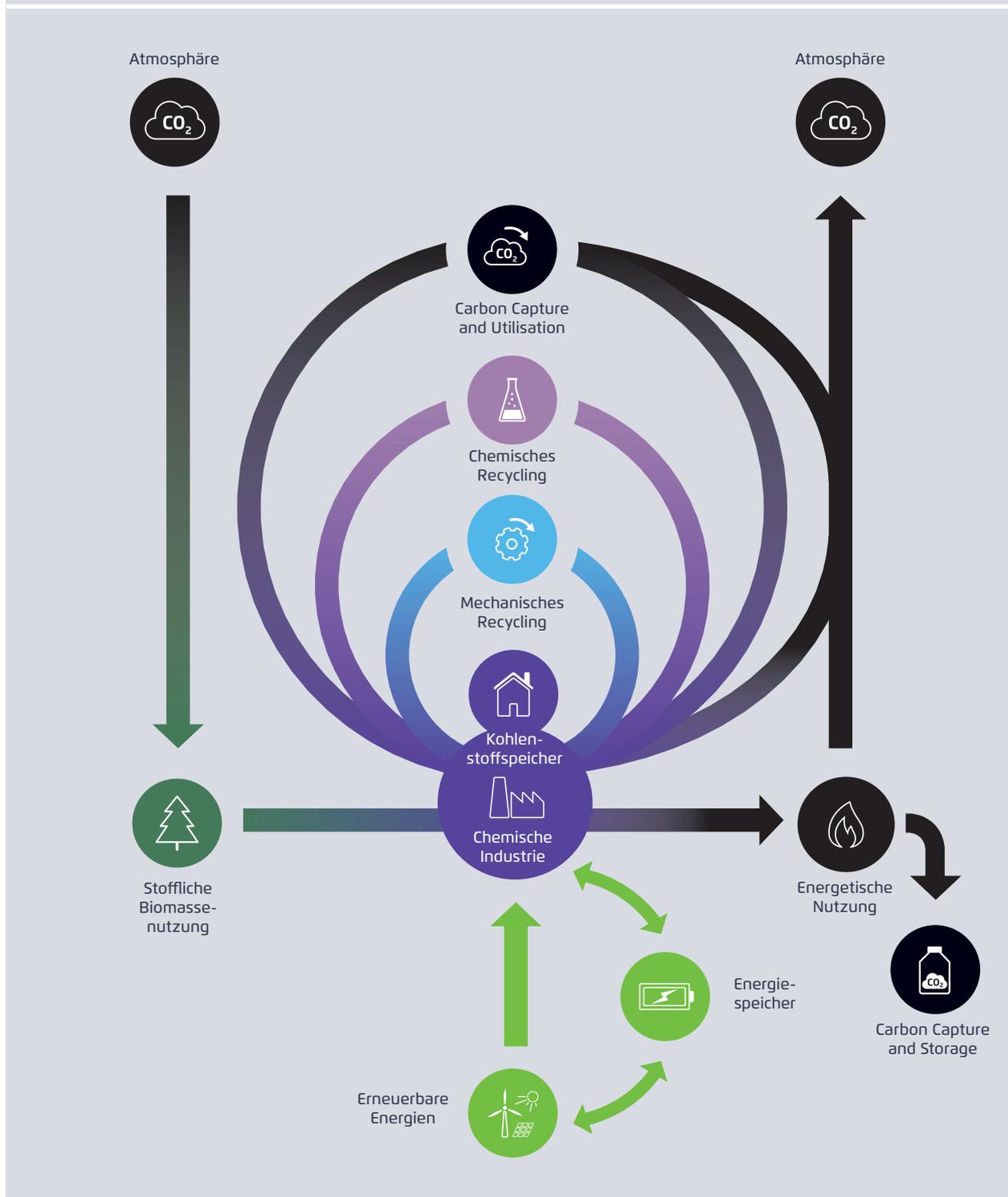
Bis Ende 2024 sollte die Bundesregierung einen konkreten Transformationsfahrplan für eine wettbewerbsstarke klimaneutrale Chemieindustrie entwickeln. Dieser sollte in einem gemeinsamen Prozess mit der Industrie, Gewerkschaften, der Zivilgesellschaft und der Wissenschaft erarbeitet werden. Besonders wichtig ist die Umstellung der energieintensiven Basischemie, der Grundlage für viele nachfolgende Wertschöpfungsstufen.

Inhalt

1	Executive Summary	6
2	Die chemische Industrie in Deutschland heute	9
2.1	Ressourcenbedarf: Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Rohstoffen und Energien	12
2.2	Emissionsbilanz: hin zu einem Lebenszyklus-Ansatz	13
3	Die drei Grundpfeiler für die chemischen Wertschöpfungsketten von morgen	16
3.1	Direkte Elektrifizierung und Flexibilität	17
3.2	Schließen des Kohlenstoffkreislaufs	26
3.3	Ersatz fossiler durch erneuerbare Rohstoffe	33
4	Handlungsempfehlungen	47
4.1	Empfehlungen für direkte Elektrifizierung und Flexibilität	47
4.2	Empfehlungen für Kreislaufwirtschaft	48
4.3	Empfehlungen für erneuerbare Rohstoffe	50

Zielbild für eine klimapositive chemische Wertschöpfungskette auf der Basis von direkter Elektrifizierung und Flexibilität, Kreislaufwirtschaft und erneuerbaren Rohstoffen

Abbildung 1



Agora Industrie und Carbon Minds (2023)

1 Executive Summary

Die Transformation der chemischen Industrie ist entscheidend für das Erreichen der Klimaneutralität. Als Industrie, die sich aus der Verfügbarkeit fossiler Ressourcen entwickelt hat, basiert sie heute noch auf einer linearen Wertschöpfungskette, in der fossile Ressourcen zu Chemikalien und Endprodukten verarbeitet und am Ende ihrer Nutzungsdauer in der Regel verbrannt oder auf Deponien gelagert werden. Historisch spielt Deutschland eine wichtige Rolle für die globale chemische Industrie. Viele wichtige Innovationen stammen aus Deutschland, und Deutschland ist nach wie vor der Standort zahlreicher globaler Chemieunternehmen und der weltweit größte Exporteur von Chemikalien. Die chemische Industrie in Deutschland sollte daher bei der weltweiten Transformation von Chemikalien in Richtung Klimaneutralität als Vorbild vorangehen.

Allein die Produktion von Chemikalien ist mit fünf Prozent der nationalen Emissionen eine der größten CO₂-Quellen Deutschlands. Die Gewinnung fossiler Brennstoffe und die Abfallbehandlung von Produkten auf chemischer Basis sind für zusätzliche Emissionen verantwortlich, die zusammen bis zu dreimal höher sind als die produktionsbedingten Emissionen. In der Vergangenheit hat die chemische Industrie bewiesen, dass sie durch ihre Innovationsfähigkeit neue Standards setzen kann: Seit 1990 hat die Produktion um 63 Prozent zugenommen, während der Energiebedarf um 19 Prozent und die Treibhausgasemissionen um 55 Prozent reduziert wurden (VCI 2021b). Die jüngste Reform des EU-Emissionshandelssystems (EU-ETS) sieht einen Reduktionsfaktor der Emissionsobergrenze vor, nach dem die europäische Industrie bis 2040 klimaneutral sein muss. Der Übergang zu Netto-Null in den verbleibenden 16 Jahren wird mit weiteren Effizienzsteigerungen allein aber nicht zu schaffen sein. Die lineare Wertschöpfungskette muss durch eine energie- und ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft ersetzt werden, deren Grundlage Erneuerbare Energien und Rohstoffe sind.

Deutschland sieht sich vor einer Reihe von Herausforderungen, unter anderem:

1. **Die Klimakrise.** Das Zeitfenster für die Einhaltung der 1,5-Grad-Grenze schließt sich, weshalb eine radikale CO₂-Minderung in diesem Jahrzehnt erforderlich ist. Darüber hinaus gehen alle relevanten Szenarien zur Klimaneutralität davon aus, dass mittelfristig massive CO₂-Senken zum Schutz unseres Klimas benötigt werden.
2. **Die Energiekrise.** Die chemische Industrie ist der größte industrielle Erdgasverbraucher in Deutschland. Der Ausfall der umfangreichen und billigen Energieimporte aus Russland und der damit verbundene Anstieg der Energiepreise stellen die Wirtschaftlichkeit der Produktion von Basischemikalien in großen Mengen in diesem Land grundlegend in Frage. Eine erzwungene Verlagerung der Produktion in Regionen mit geringeren Umweltstandards hätte tiefgreifende Folgen für die Wirtschaft und für den Klimaschutz.
3. **Instabile Wertschöpfungsketten.** Sowohl die Pandemie als auch die Energiekrise haben die Schwachstellen wichtiger Wertschöpfungsketten aufgezeigt. Für eine höhere Ausfallsicherheit und eine erfolgreiche Transformation ist eine resiliente Energie- und Rohstoffversorgung unerlässlich.
4. Aufgrund dieser Herausforderungen gewinnt **Industriepolitik weltweit zunehmend an Bedeutung.** Der internationale Wettbewerb, insbesondere der US Inflation Reduction Act (IRA), der umweltfreundliche Technologien fördert und unterstützt, übt Druck auf die EU aus, beim Hochlauf sauberer Technologien nicht ins Hintertreffen zu geraten.

Die chemische Industrie ist zusammen mit allen anderen Sektoren entlang der chemischen Wertschöpfungskette von diesen vielfältigen Herausfor-

derungen stark betroffen, kann aber auch eine Schlüsselrolle bei deren Bewältigung spielen. Benötigt wird ein Zielbild für die Zukunft der chemischen Industrie, das in Einklang steht mit dem der Transformation des Energiesektors, der Produktion von erneuerbaren Rohstoffen und mit den Strategien der Konsumgüterhersteller und der Abfallwirtschaft. Nur so kann die Industrie zukunftssichere Investitionsentscheidungen treffen und die Krisen als Ansporn für die Reduktion des fossilen Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen nutzen.

Bisher konzentrierten sich Studien zur Transformation der chemischen Industrie in Deutschland in erster Linie auf direkte Emissionen aus der Chemikalienproduktion, während die „Schatten“-Emissionen aus der Energie- und Rohstoffversorgung und der Abfallbehandlung („End of Life“) häufig vernachlässigt wurden. Andere Studien befassten sich schwerpunktmäßig mit der Kreislaufwirtschaft und der Abfallbehandlung und ignorierten wiederum die Primärproduktion. Erst bei einer sektorübergreifenden Betrachtung, die alle Teile der Wertschöpfungskette einbezieht, zeigt sich jedoch, dass eine umfassende Umstellung auf Erneuerbare Energien und erneuerbare Rohstoffe sowie die Zirkularität entlang der gesamten Wertschöpfungskette sogar klimapositive CO₂-Senkeneffekte haben können.

Ein neuer Ansatz für die Umstellung der chemischen Wertschöpfungskette muss alle Lebenszyklusemissionen berücksichtigen und eine effiziente Nutzung der verfügbaren Ressourcen und Energiequellen anstreben, wobei auch andere Sektoren und Wirtschaftszweige als die Chemie zu berücksichtigen sind. Um Emissionen schnell zu mindern und darüber hinaus klimapositive CO₂-Senken zu generieren, sind drei sich ergänzende Strategien von zentraler Bedeutung.

1. Die **direkte Elektrifizierung und Flexibilisierung** der Prozessenergie reduziert sowohl die Emissionen der Herstellung von chemischen Produkten als auch die Menge an benötigten fossilen Brennstof-

fen und nutzt dabei die begrenzt verfügbaren Erneuerbaren Energien hocheffizient.

2. Durch den Aufbau einer **Kreislaufwirtschaft** werden sowohl die End-of-Life-Emissionen von chemischen Produkten am Ende ihrer Lebensdauer als auch der Bedarf an fossilen Rohstoffen reduziert. Das Design von Produkten für lange Nutzungsphasen, für Wiederverwendung, Reparatur und Recycling reduziert die Menge der benötigten Materialien, während für Verbraucherinnen und Verbraucher derselbe Nutzen erhalten bleibt. Die Mobilisierung des vollen Potenzials von mechanischem Recycling sowie die dazu ergänzende Einführung chemischer Recyclingtechnologien machen Abfall zu einer lokalen Rohstoff- und zirkulären Kohlenstoffquelle und verringern dabei die Abhängigkeit von fossilen Importen.

3. Die Substitution verbleibender fossiler Rohstoffe durch **erneuerbare Kohlenstoffquellen**. Kohlenstoff ist der Grundbaustein der meisten Chemikalien und muss in Zukunft über erneuerbare Quellen bereitgestellt werden. Neben elektrisch erzeugtem Wasserstoff und seinen kohlenstoffhaltigen Derivaten ist Biomasse – die größtenteils aus den chemischen Bausteinen Kohlenstoff und Wasserstoff besteht – ein vielversprechender Rohstoff, der fossile Rohstoffe effizient ersetzen kann. Um die effiziente und wirksame Nutzung dieser begrenzten Ressource zu steigern, sollte die vorhandene Biomasse von der rein energetischen Nutzung auf eine sequenzielle Nutzung umgestellt werden, bei der sie zunächst als Material (beispielsweise im Bau), dann als Rohstoff (beispielsweise in der Chemie) und schließlich bei der Energiegewinnung genutzt wird (die sogenannte „Kaskadennutzung“ von Biomasse). Grundsätzlich kann eine Vielzahl verschiedener Arten von Biomasse zur Herstellung von Chemikalien verwendet werden. Entscheidend dabei ist, dass der zusätzliche Bedarf an Biomasse für Chemikalien nicht zu einer Intensivierung der Landnutzung oder zu

direkten oder indirekten Landnutzungsänderungen mit nachteiligen Auswirkungen auf Ökosysteme und Kohlenstoffkreisläufe führt. So kann Wertschöpfung auf lokaler Ebene ermöglicht und die Abhängigkeit von fossilen Importen verringert werden.

Indem man die Herstellung von biobasierten Chemikalien mit einem Kreislaufwirtschaftsansatz verknüpft, können Netto-CO₂-Senken geschaffen werden. Biogener Kohlenstoff wird in langlebigen Produkten gespeichert und durch mehrfaches Recycling in Produkten gebunden. Nicht wiederverwertbare biobasierte Chemikalien können – nach dem Prinzip der Kaskadennutzung – verbrannt und energetisch genutzt werden. Die Kombination der Verbrennung biogener Abfälle mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Bioenergy and Carbon Capture and Storage; BECCS) überführt dabei die temporäre in eine permanente CO₂-Senke. Auf diese Weise kann die chemische Wertschöpfungskette eine treibende Kraft für das Kohlenstoffmanagement in der gesamten Wirtschaft sein und zur Erreichung der deutschen Klimaziele beitragen.

Ein umfassender politischer Handlungsrahmen mit Ausrichtung auf die Klimaziele ist notwendig, um die Transformation des Chemiesektors zu ermöglichen und voranzutreiben. Angesichts der Reform des EU-ETS, der raschen Senkung der Emissionsobergrenze (des „Cap“) und der bevorstehenden Einbeziehung der Abfallverbrennung wird der Chemiesektor bald einem klaren Preissignal für CO₂-Emissionen ausgesetzt sein. Dieser Rahmen muss auf EU-Ebene durch zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden, um

zu gewährleisten, dass Investitionen in saubere Technologien schon heute getätigt werden. Zur Unterstützung der drei oben genannten Strategien sind insbesondere die folgenden **Maßnahmen erforderlich**.

Investitionen in die direkte Elektrifizierung von Prozesswärme müssen durch ein spezielles **Förderprogramm** für industrielle Wärmepumpen angeregt werden, damit ein schneller Markthochlauf gelingt. Auch die Einführung eines verbindlichen **Zero-Carbon-Standards** für neue Investitionen – z. B. für Prozesswärme bis 500 Grad Celsius, für die es in der Breite kommerziell verfügbare CO₂-freie Technologien gibt – lenkt Investitionen in klimaneutrale Technologien. Der **Aufbau von grünen Leitmärkten** als Anreiz für Investitionen in Kreislauftechnologien muss durch die Einführung von **Mindestquoten für Rezyklate** unterstützt werden und hochwertiges Recycling fördern. Über **Produktstandards** können eine langfristige und effiziente Verwendung hochwertiger Kunststoffe ermöglicht und Recyclinggerechtes Design vorangetrieben werden. Die Substitution von fossilen durch erneuerbare Rohstoffe erfordert einen Rechtsrahmen, der mit einer **effizienten und nachhaltigen Kaskadennutzung** in Einklang steht. Bei biobasierten Chemikalien ist die wichtigste Voraussetzung, dass der regulatorische Rahmen, vor allem die Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU, überarbeitet wird, um Fehlanreize zugunsten der reinen energetischen Nutzung abzuschaffen und stattdessen Anreize für eine nachhaltigere Nutzung von Biomasse als Material und Rohstoff zu setzen.

2 Die chemische Industrie in Deutschland heute¹

Die chemische Industrie ist ein komplexes Feld mit einer Vielzahl unterschiedlicher Prozesse und Produkte, die für viele verschiedene Anwendungen eingesetzt werden. **Polymere** bilden die größte Gruppe von Produkten der chemischen Industrie. Sie gibt es in verschiedenen Formen – etwa als Kunststoffe, zum Beispiel für Verpackungen (z. B. PET), als Baustoffe wie Rohre (z. B. PVC), als Beschichtungen für Metalle oder Holz, als Basismaterial für Bauteile im Fahrzeugbau und in Textilien. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Anwendungsbereiche in anderen Industriesektoren, in denen die mehr als 30.000 verschiedenen Chemikalien eingesetzt werden.

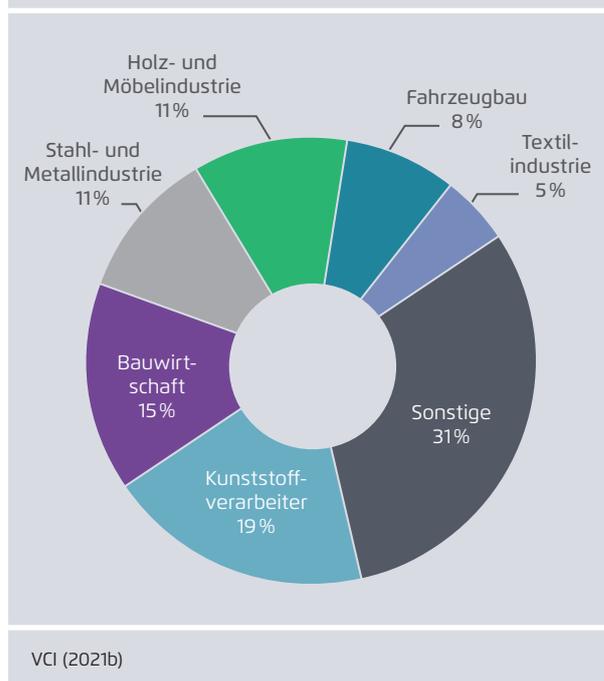
Wie in Abbildung 3 dargestellt, machen Polymere etwa 50 Prozent aller chemischen Produkte aus. **Feinchemikalien** wie Wasch-, Reinigungs- und Kosmetikmittel machen etwa ein Drittel aller Produkte aus. Den geringsten Anteil hat die Produktion von **Düngemitteln** auf Ammoniak-Basis² mit 11 Prozent.

Trotz der komplexen Prozesse und der Vielfalt der Produkte der chemischen Industrie basieren die meisten Wertschöpfungsketten auf nur zehn Basischemikalien.³ Im Jahr 2019 wurden 24 Millionen Tonnen (Mt) dieser Basischemikalien in Deutschland hergestellt. 14 Mt davon waren **organische**, d. h. auf Kohlenstoff basierende Chemikalien (Carbon Minds 2020, VCI 2021a). Die restlichen 10 Mt umfassten die **anorganischen Chemikalien** Ammoniak, Chlor und

- 1 Das Referenzjahr für die Daten in diesem Kapitel ist 2019 – das letzte Jahr vor dem Beginn weitreichender Komplikationen in den internationalen Wertschöpfungsketten mit großen Folgen für die chemische Industrie.
- 2 Düngemittel auf der Basis von Phosphat und Kalium sind in dieser Analyse nicht berücksichtigt.
- 3 Die zehn Basischemikalien umfassen Ethylen und Propylen (Olefine), Benzol, Toluol und Xylol (Aromaten, gemeinsam als BTX bezeichnet), C4-Chemikalien, Methanol, Chlor, Natronlauge und Ammoniak.

Nutzung von chemischen Produkten in Nachfragesektoren in Deutschland 2019

Abbildung 2

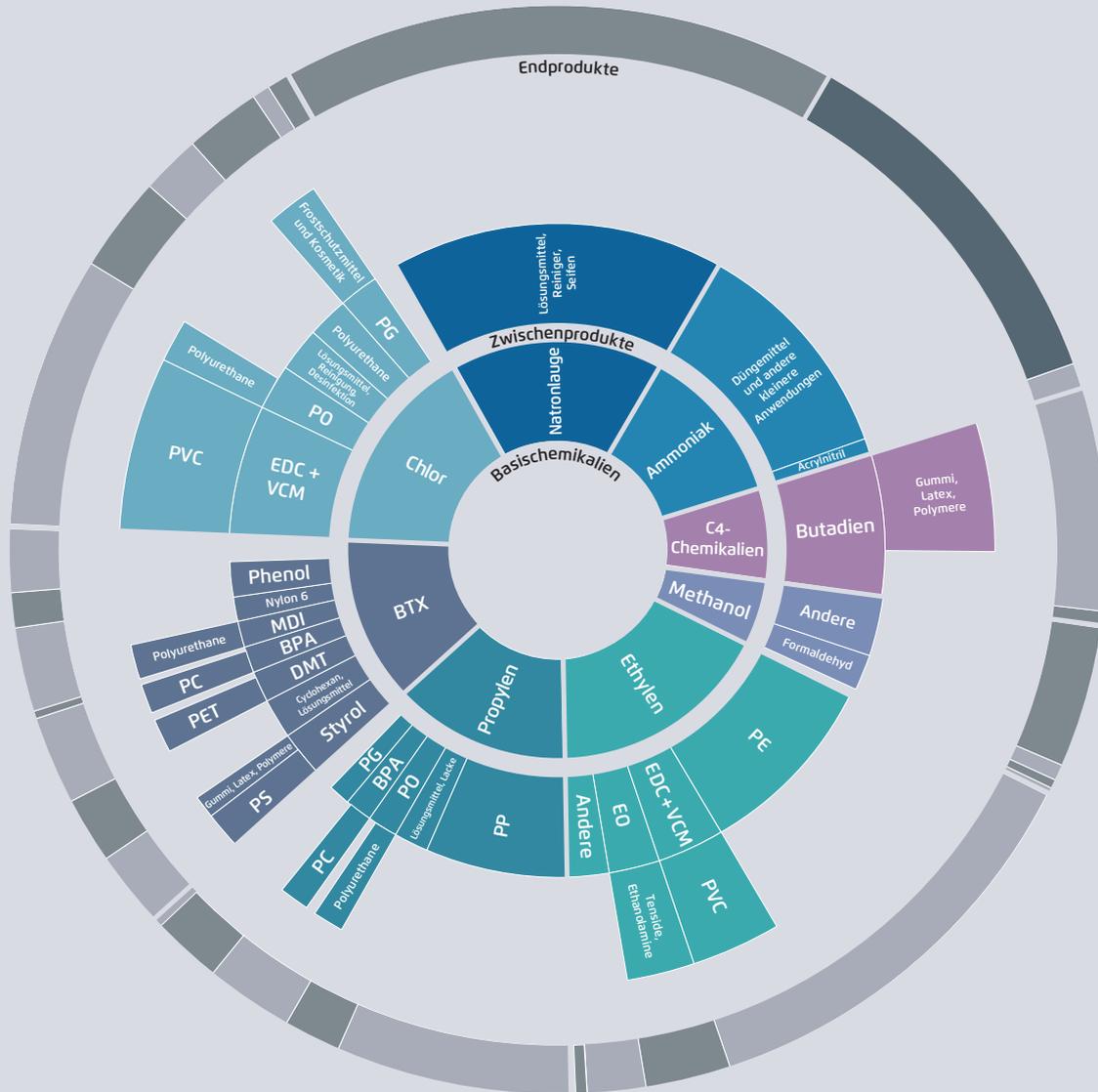


Natronlauge, die keinen Kohlenstoff enthalten. Abbildung 3 zeigt in vereinfachter Form die Abhängigkeit der wichtigsten nachgelagerten Zwischen- und Endprodukte (äußere Kreise) von diesen Basischemikalien (innerer Kreis). Aufgrund der zentralen Bedeutung von Basischemikalien in der chemischen Industrie spielen diese auch bei der Transformation der gesamten Wertschöpfungsketten eine Schlüsselrolle.

Die verschiedenen Wertschöpfungsketten, die sich von den Basischemikalien ableiten, beeinflussen auch die Produktionsstandorte. Heute gibt es 25 große integrierte chemische Standorte, die untereinander stark vernetzt sind – sogenannte Verbundstandorte (VCI 2023). Eine kleine Anzahl dieser Verbundstandorte produziert Basischemikalien und liefert Vor- und Nebenprodukte für Wertschöpfungsketten vor Ort

Abhängigkeit ausgewählter Zwischen- und Endprodukte von Basischemikalien

Abbildung 3



Endproduktkategorien:

- Polymere (52%)
- Feinchemikalien (37%)
- Düngemittel (11%)

- BTX** Benzol, Toluol, Xylol
- PE** Polyethylen
- EDC** Ethylendichlorid
- VCM** Vinylchloridmonomer
- PVC** Polyvinylchlorid
- EO** Ethylenoxid
- PP** Polypropylen
- PO** Propylenoxid

- BPA** Bisphenol A
- PC** Polycarbonat
- PG** Propylenglykol
- PS** Polystyrol
- DMT** Dimethylterephthalat
- PET** Polyethylenterephthalat
- MDI** Methylendiphenylisocyanate diisocyanate

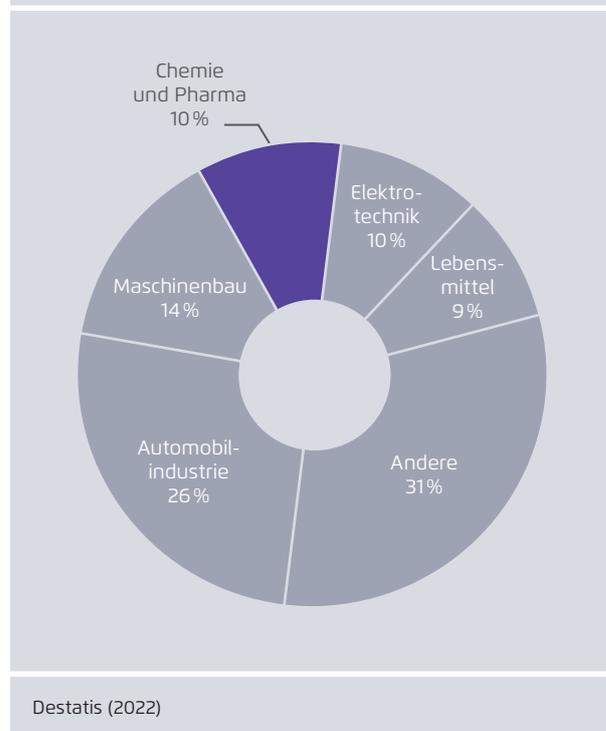
Agora Industrie und Carbon Minds (2023) basierend auf Carbon Minds (2020) und VCI (2021a, 2021b). Chemische Stoffe werden doppelt aufgeführt, wenn für ihren Herstellungsprozess verschiedene Ausgangsstoffe erforderlich sind (z. B. PVC-basiert sowohl auf Ethylen als auch auf Chlor). Der Radiant entspricht den Massenströmen.

und an anderen Standorten der Chemieindustrie. Die Produktionsprozesse für viele verschiedene chemische Produkte innerhalb der Standorte und zwischen ihnen sind durch den Austausch von Energie- und Materialströmen und die gemeinsame Nutzung von Infrastrukturen und industriellen Dienstleistungen miteinander verbunden.

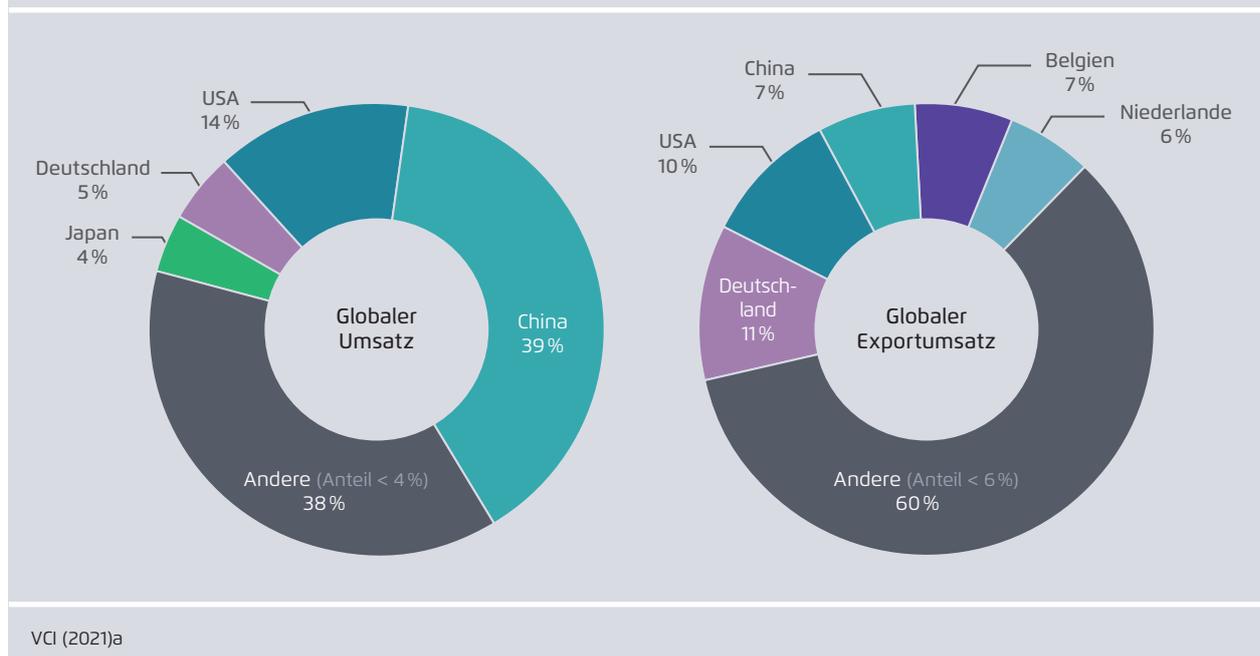
Die chemisch-pharmazeutische Industrie ist der drittgrößte Industriezweig der deutschen Wirtschaft und verantwortlich für zehn Prozent des Gesamtumsatzes des verarbeitenden Gewerbes (vgl. Abbildung 4). 2019 belief sich dieser Umsatz auf 211 Milliarden Euro (Destatis 2022).

Ein großer Teil dieses Umsatzes, nämlich 63 Prozent, stammt aus dem Export. Damit ist die deutsche chemisch-pharmazeutische Industrie im Jahr 2019 mit einem Marktanteil von elf Prozent der größte Exporteur von Chemikalien und Pharmazeutika weltweit, vor China und den USA (vgl. Abbildung 5, VCI 2021a). Der Markt für Chemikalien ist ein

Umsatz des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland 2019 Abbildung 4



Die Wirtschaftsleistung der deutschen chemisch-pharmazeutischen Industrie auf dem Weltmarkt im Jahr 2019 Abbildung 5



internationaler Markt. Der Handel mit Basischemikalien und Folgeprodukten ist fest etabliert und macht sie zu globalen Rohstoffen. Starke technische Kompetenz und Innovationskraft haben Deutschland zu einem wichtigen Akteur auf den globalen Chemiemärkten gemacht. Die energieintensive Herstellung von Basischemikalien und ihren Derivaten macht die chemische Industrie jedoch in hohem Maße von kostengünstiger Energie abhängig. Nach Beginn des russischen Angriffskrieges sank der Produktionsindex für chemische Produkte zwischen Februar und Oktober 2022 um 21 Prozent (Destatis 2022).

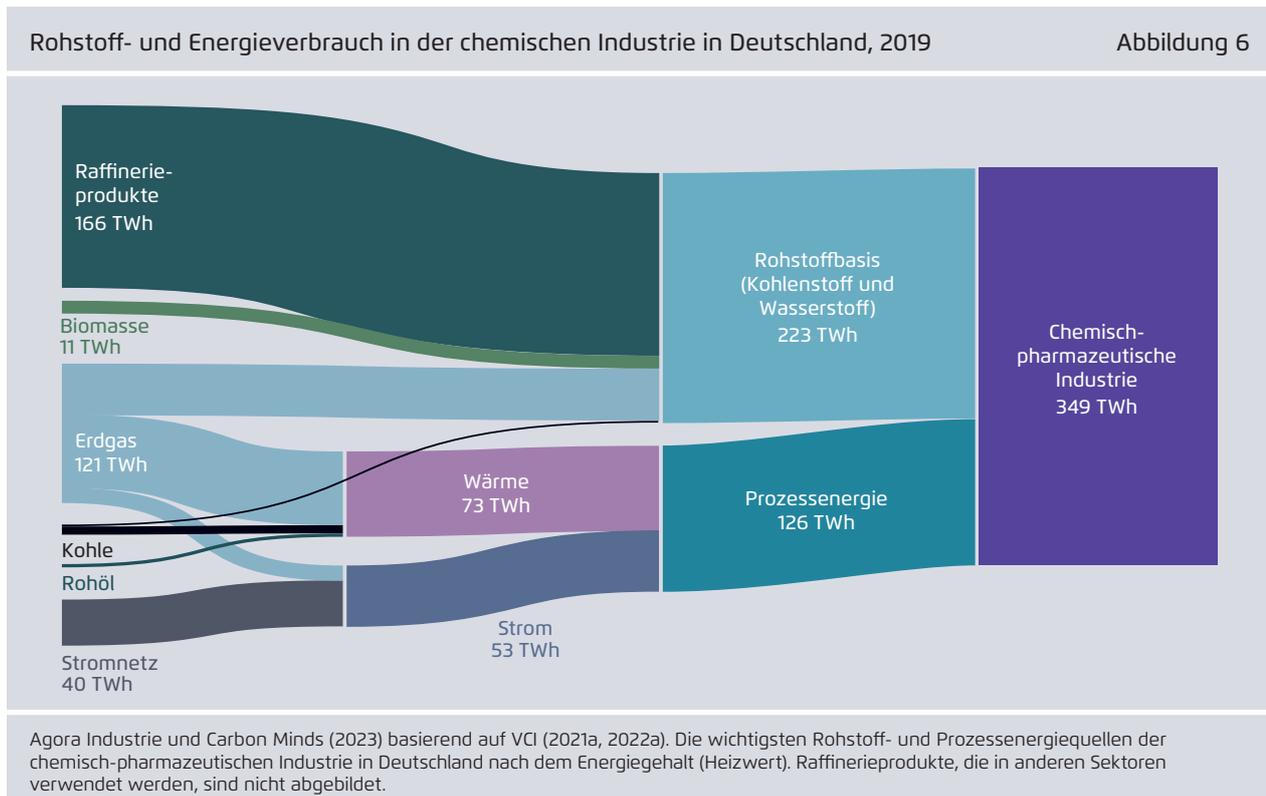
2.1 Ressourcenbedarf: Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Rohstoffen und Energien

Zur Herstellung von Chemikalien verbrauchte der Chemiesektor im Jahr 2019 349 Terawattstunden (bezogen auf den unteren Heizwert, TWh_{LHV}) an

hauptsächlich fossilen Energien und Rohstoffen. Der Chemiesektor ist auch ein großer Verbraucher von Netzstrom: Obwohl etwa 25 Prozent des 53 TWh umfassenden Strombedarfs vor Ort produziert werden, werden 75 Prozent über das Stromnetz bezogen. Abbildung 6 visualisiert die Rohstoff- und Energiebasis der chemischen Industrie. Die Versorgung mit Prozessenergie in Form von Strom und Wärme macht 36 Prozent des gesamten Ressourcenbedarfs aus. Die restlichen 64 Prozent sind Rohstoffe – die Materialien, aus denen Chemikalien hergestellt werden.

Rohstoffe

Heute wird der größte Teil der stofflich genutzten 223 TWh_{LHV} für organische (kohlenstoffhaltige) Chemikalien verwendet und stammt aus Raffinerieprodukten wie Naphtha, Flüssiggas (LPG) und Gasöl, die 74 Prozent aller Rohstoffe ausmachen (vgl. Abbildung 6). Diese ölbasierten Derivate werden in Raffinerien hergestellt, wo sie als Nebenprodukt aus der Verarbeitung von Rohöl zu Diesel, Benzin, Heizöl,



Naphtha und LPG entstehen. Die Rohstoffe für die chemische Industrie stellen nur einen Teil der Produktion aus Raffinerien dar – Raffinerieprodukte, die nicht in der chemischen Industrie eingesetzt werden, bleiben in dieser Studie unberücksichtigt. Erdgas macht 20 Prozent der Rohstoffe aus und wird zur Herstellung von fossilem (grauem) Wasserstoff verwendet, der für die Produktion von Ammoniak und in Raffinerien sowie für die Erzeugung von Methanol benötigt wird.⁴ Biomasse bildet mit etwa fünf Prozent derzeit nur einen kleinen Teil der Rohstoffbasis der chemischen Industrie und wird in erster Linie zur Herstellung von Produkten wie Wasch- und Reinigungsmitteln und Kosmetika, aber auch von Kunststoffen und Schmiermitteln eingesetzt (vgl. Kapitel 3.3.1).⁵

Strom und Wärme

Der Prozessenergiebedarf von 126 TWh_{LHV} setzt sich zu 58 Prozent aus Wärme und zu 42 Prozent aus Strom zusammen. Die am häufigsten eingesetzte Technologie zur Bereitstellung von Wärme und vor Ort erzeugtem Strom für die chemische Industrie sind erdgasbasierte Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Damit ist die chemische Industrie der größte industrielle Verbraucher von Erdgas (Agora Energiewende 2022). Außerdem werden in einigen wenigen Fällen Kohle, Heizöl und andere fossile Brennstoffe verwendet, für die jedoch keine belastbaren Daten verfügbar sind.⁶ KWK-Anlagen liefern nicht nur Wärme, sondern erzeugen auch

etwa 25 Prozent des Strombedarfs der chemischen Industrie. Die restlichen 75 Prozent (rund 40 TWh) stammen aus dem Stromnetz.

Insgesamt machen Raffinerieprodukte und Erdgas – sowohl als Brennstoff als auch als Rohstoff – etwa 83 Prozent der Energie- und Rohstoffversorgung der deutschen chemischen Industrie aus.⁷ Die fossile Energiekrise hat die chemische Industrie daher ganz besonders unter Druck gesetzt und ihre starke Abhängigkeit von unzuverlässigen fossilen Importen und ihre Anfälligkeit gegenüber schwankenden Energiepreisen aufgezeigt. Staatliche Unterstützung war zwar wichtig, um die hohen Energiekosten kurzfristig abzufedern. Entscheidend ist aber, strukturell auf die Krise zu reagieren und die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen langfristig zu reduzieren. Nur durch den Umstieg auf erneuerbare Energie- und Rohstoffquellen kann die chemische Industrie ihre Abhängigkeit von fossilen Importen und ihre Anfälligkeit gegenüber Energiepreisschwankungen strukturell verringern.⁸

2.2 Emissionsbilanz: hin zu einem Lebenszyklus-Ansatz

Nicht nur die Produktion in der Chemieindustrie hat Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zur Folge. Die gesamten THG-Emissionen, die in Zusammenhang mit den Produkten der chemischen Industrie stehen, umfassen den gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffbeschaffung über die Produktion und die Nutzungsphase bis hin zur Behandlung und Entsorgung am Ende des Lebenszyklus.

4 Rund 30 Prozent der Methanol-Produktion in Deutschland basieren auf Erdgas. Die anderen 70 Prozent verwenden ölbasierte Produkte aus Raffinerien (Carbon Minds 2020).

5 Die Prozentangaben beziehen sich auf den Energiegehalt. Der massenbezogene Anteil der Biomasse beträgt 13 Prozent.

6 Im Jahr 2022 hat die chemische Industrie als Reaktion auf die hohen Erdgaspreise ihre Energieversorgung zunehmend auf andere fossile Brennstoffe wie Heizöl oder Kohle umgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um eine kurzfristige Maßnahme zur Abfederung der Energiekosten und nicht um eine langfristige Strategie handelt.

7 Aufgrund des Anteils fossiler Energien am deutschen Strommix liegt der tatsächliche Anteil sogar über 83 Prozent.

8 Agora Energiewende hat im November 2022 mit dem Impulspapier *Volle Leistung aus der Energiekrise (Agora Energiewende 2022)* einen Vorschlag für eine strukturelle Antwort auf hohe Energiekosten und Inflation vorgelegt.

Im Jahr 2019 beliefen sich **die direkten Emissionen aus der Produktion von Chemikalien auf 39 Mt CO₂-äq** (VCI 2022a). Dies entspricht 21 Prozent aller industriellen Emissionen in Deutschland. Mit knapp 6 Mt CO₂-äq trug die Ammoniakproduktion einen besonders großen Anteil zu den direkten Emissionen der Industrie bei. Seit 1990 ist es der chemischen Industrie gelungen, die Treibhausgasemissionen um 55 Prozent zu reduzieren – hauptsächlich aufgrund strenger Vorschriften und Prozessoptimierungen zur Minderung der Lachgasemissionen.⁹ Die weitgehende Beseitigung von Lachgasemissionen macht etwa die Hälfte der THG-Emissionsreduktionen seit 1990 aus (VCI 2022a).

Die Minderung dieser direkten produktionsbedingten Emissionen ist von entscheidender Bedeutung. Sie stellen jedoch nur einen Bruchteil der gesamten Lebenszyklus-Emissionen chemischer Produkte dar. Da es keine einheitlichen Standards und Vorgaben für die Emissionsbilanzierung gibt, sind zuverlässige Daten über die Lebenszyklus-Emissionen von Chemikalien kaum vorhanden. Ausgehend von den folgenden Berechnungen kann angenommen werden, dass die **indirekten vor- und nachgelagerten Emissionen bis zu dreimal so hoch sind wie die direkten Emissionen aus der Produktion** von Basischemikalien.

Vorgelagerte Emissionen („Upstream“): Basierend auf den statistischen Emissionsfaktoren für fossile Ressourcen¹⁰ und den Mengen an fossilen Ressourcen, die für die Produktion der zehn Basischemikalien benötigt werden, entfallen auf die Förderung und

Bereitstellung fossiler Rohstoffe etwa 6 Mt CO₂-äq. Dabei handelt es sich zum großen Teil um flüchtige Methan-Emissionen – ein besonders klimaschädliches Treibhausgas.

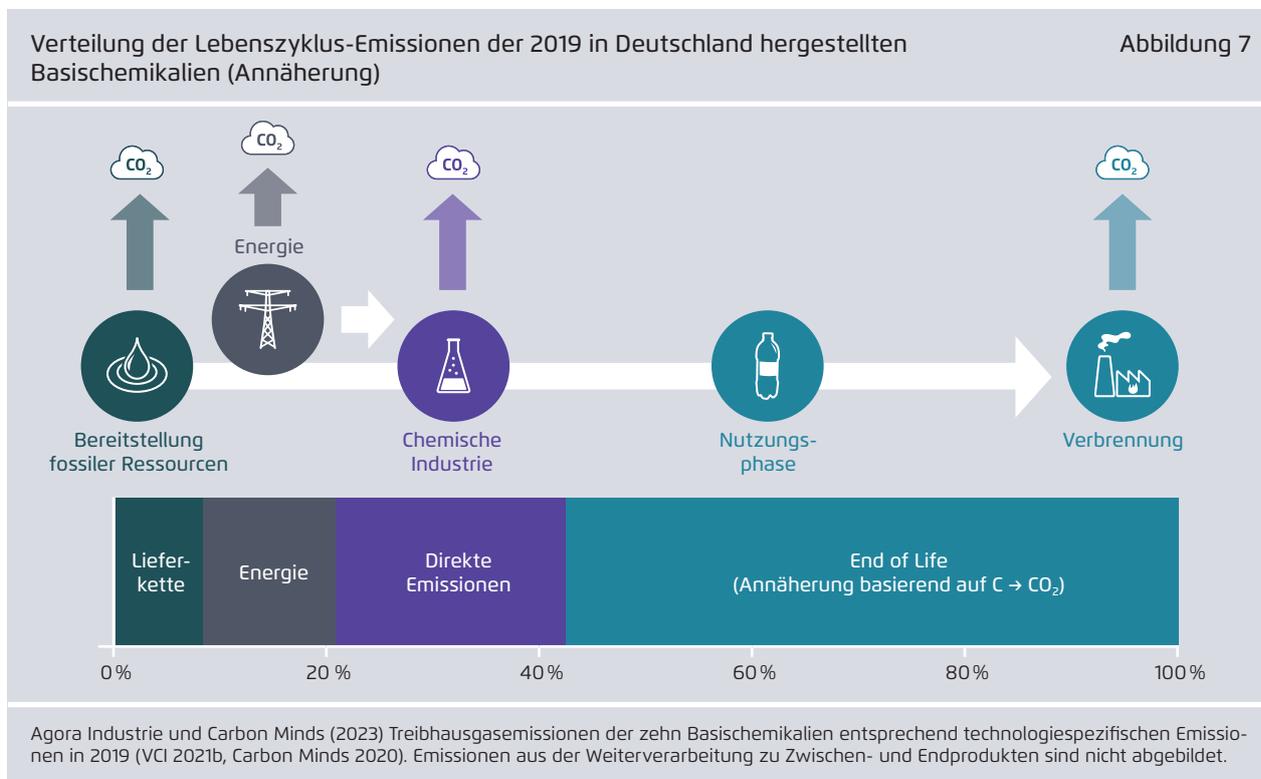
Nachgelagerte Emissionen („Downstream“):

Auch die Emissionen am Ende des Lebenszyklus („End of Life“) sind schwer abzuschätzen – mehr als 60 Prozent der Produkte werden exportiert und so dem deutschen Recycling-System entzogen. Aber auch Produkte, die in Deutschland verbleiben, werden häufig nicht ordnungsgemäß entsorgt – sei es aufgrund ihrer Anwendung (z. B. Kosmetika, Waschmittel, Reifenabrieb usw.) oder aufgrund unzureichender Abfallsammlung (vgl. Kapitel 3.2). Da die Recyclingraten im Verhältnis zu den Produktionsmengen aller Basischemikalien niedrig sind, ist die häufigste Methode der Abfallbehandlung in Deutschland heute die Verbrennung.¹¹ Unter der Annahme, dass alle Basischemikalien und ihre Derivate am Ende ihres Lebenszyklus verbrannt werden und der enthaltene Kohlenstoff als CO₂ in die Atmosphäre gelangt, würden sich die Emissionen am Ende des Lebenszyklus auf 42 Mt CO₂ belaufen. Die tatsächliche Zahl weicht jedoch von dieser Schätzung ab – zum Teil aufgrund von Methan-Emissionen aus bestehenden Deponien, aber auch aufgrund von Abfallstoffen, die sich in der Natur anreichern und die zwangsläufig nicht als CO₂ in der Atmosphäre enden (beispielsweise Mikroplastik). Darüber hinaus variiert die Lebensdauer von Produkten stark, sodass in einigen Fällen die Emissionen am Ende der Lebensdauer mit einer sehr großen zeitlichen Verzögerung auftreten. Abbildung 7 zeigt die Lebenszyklus-Emissionen von Basischemikalien unterteilt nach vorgelagerten Emissionen (Bereitstellung fossiler Ressourcen), indirekten Emissionen aus der Energiever-

9 Die vorliegende Studie konzentriert sich auf die Treibhausgasemissionen der chemischen Industrie (CO₂, Lachgas, Methan und andere Treibhausgase). Darüber hinaus stößt die chemische Industrie verschiedene andere Schadstoffe aus, die schwerwiegende Umweltauswirkungen haben können, die jedoch in dieser Studie nicht behandelt werden.

10 Statistische Emissionsfaktoren für fossile Ressourcen basierend auf der cm.chemicals-Datenbank (Carbon Minds 2020).

11 Die Ablagerung von Abfällen auf Deponien kann gefährliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt haben und ist daher die am wenigsten bevorzugte Abfallbewirtschaftungsoption.



sorgung¹² (fossile Energien), direkten prozessbedingten Emissionen aus der Herstellung von Basischemikalien und den entsprechenden End-of-Life-Emissionen unter den beschriebenen Annahmen. Prozessemissionen aus der Verarbeitung von Basischemikalien zum Zwischen- und Endprodukt sind nicht abgebildet.

12 Einschließlich der Emissionen aus dem Energiesektor, basierend auf den durchschnittlichen Emissionen im Jahr 2019.

Für eine umfassende Minderung aller Emissionen, die in Zusammenhang mit Chemikalien stehen, reicht es nicht aus, sich nur mit den produktionsbedingten Emissionen zu befassen. Stattdessen müssen bei der Transformation der chemischen Industrie alle Lebenszyklus-Emissionen bedacht werden. Dazu bedarf es gezielter Maßnahmen und strategischer Allianzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette – zwischen Chemieunternehmen und Herstellern von Endverbrauchsprodukten und Entsorgungsunternehmen sowie mit Rohstofflieferanten.

3 Die drei Grundpfeiler für die chemischen Wertschöpfungsketten von morgen

Mit dem Pariser Abkommen hat sich die Weltgemeinschaft verpflichtet, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, und die meisten Länder haben sich eigene Klimaneutralitätsziele bis Mitte dieses Jahrhunderts gesetzt. Auch die globale chemische Industrie muss sich daher in den nächsten drei Jahrzehnten grundlegend verändern. Die Klimaneutralität ist zwar ein vereinbartes Ziel, aber der konkrete Weg dorthin ist immer noch voller Unsicherheiten, und bis jetzt wurden in dem erforderlichen Umfang noch keine konkreten Investitionsentscheidungen getroffen. Die chemische Industrie muss ihre auf fossilen Ressourcen basierende lineare Wertschöpfungskette zu einer energie- und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft transformieren, die auf erneuerbaren Rohstoffen und Energien basiert.

Die jüngste Reform des EU-ETS erfordert eine schnelle Minderung der Emissionen der chemischen Industrie in Europa hin zu Netto-Null. Mit dem beschlossenen Reduktionsfaktor zur Minderung der Emissionsobergrenze muss die Industrie in Europa bis 2040 klimaneutral sein. In Deutschland sind darüber hinaus wegen der Ziele des Klimaschutzgesetzes bereits in diesem Jahrzehnt ambitionierte Emissionsreduktionen in der Industrie erforderlich. Neben der Klimakrise hat die russische Invasion in der Ukraine deutlich gemacht, dass die Defossilisierung der Industrie dringend beschleunigt werden muss, um die Abhängigkeit von Importen zu verringern und die Energiesouveränität zu stärken. Um einen angemessenen Beitrag zur Reduzierung des Erdgasverbrauchs im Rahmen des von der Europäischen Kommission vorgelegten REPowerEU-Plans zu leisten, muss die deutsche Industrie ihren Erdgasverbrauch bis 2030 in etwa halbieren.

Eine entschlossene und mutige Transformation ist nicht nur Voraussetzung für das Erreichen der Ziele für Klimaschutz und Energiesouveränität, sondern auch für den Erhalt von Arbeitsplätzen und der Wertschöpfung in Deutschland. Als wichtiger internationaler Akteur mit einem hohen Exportanteil muss Deutschland als globales Vorbild dienen. Mutige und radikale Veränderungen können eine Chance für die deutsche Chemieindustrie sein, klimaneutrale Technologien und Produkte zu entwickeln und den Wandel auch in anderen Regionen der Welt voranzutreiben.

Obwohl die Energieeffizienz in den letzten 30 Jahren deutlich gesteigert wurde (das Produktionsvolumen von Chemikalien hat sich um 63 Prozent erhöht, während sich der Energieverbrauch um 19 Prozent reduziert hat (VCI 2022a)), ist eine umfassende Transformation erforderlich, um die chemische Industrie zu defossilisieren. Bei der Umstellung von einer fossilen auf eine erneuerbare Basis – sowohl bei der Energie als auch bei den Rohstoffen – spielt die Effizienz weiterhin eine entscheidende Rolle. Damit die Emissionen so schnell wie möglich reduziert werden können, müssen die verfügbaren Ressourcen so effizient und hochwertig wie möglich genutzt werden.

Technologien und Strategien sollten aus einer sektorübergreifenden Perspektive nach ihrer Effizienz ausgewählt werden. Dabei sollten nicht nur die Emissionen aus der Produktion von Chemikalien, sondern aus dem gesamten Lebenszyklus berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2). Dies erfordert ein gemeinsames Zielbild und eine Strategie, die von den relevanten Akteuren entlang der Wertschöpfungskette mitgetragen werden muss.

Bei der Dekarbonisierung von anorganischen Chemikalien (Chemikalien wie Ammoniak und

Maßnahmenpriorisierung für eine Kreislaufwirtschaft auf Basis von erneuerbarem Kohlenstoff Abbildung 8

Agora Industrie (2023)

Chlor, die keinen Kohlenstoff enthalten) wird die Elektrifizierung von Prozessenergie mit erneuerbarem Strom wie auch von Rohstoffen über die Wasserstoffelektrolyse eine zentrale Rolle spielen.

Insbesondere bei organischen (kohlenstoffhaltigen) Chemikalien ist ein sektorübergreifender Ansatz erforderlich, um Klimaneutralität zu erreichen. Ein solcher sektorübergreifender Ansatz kann zusätzlich langfristige CO₂-Speicher und -Senken ermöglichen. Die chemische Industrie muss zu einem Kohlenstoffmanager werden, Abfälle als Ressource behandeln, erneuerbare Rohstoffe aus Biomasse oder der direkten Luftabscheidung (Direct Air Capture, DAC) verwenden und so Kohlenstoff möglichst lange im Kreis führen und speichern. Die Industrie muss integraler Bestandteil einer Bioökonomie werden, die das Ziel hat, die biologische Vielfalt, die Klimaresilienz und die CO₂-Aufnahme zu stärken und gleichzeitig die kaskadische Nutzung von biogenen Rohstoffen zu ermöglichen. Biogener Kohlenstoff muss so lange wie möglich im Kreislauf gehalten werden, und zwar insbesondere durch mechanisches und ergänzend dazu durch chemisches Recycling. Bei Abfallstoffen, die nicht recycelt werden können und daher verbrannt werden, kann die Abscheidung und Nutzung

des biogenen Kohlenstoffs für neue Prozesse dazu beitragen, den Kreislauf zu schließen (Carbon Capture and Utilisation, CCU). Um die temporäre CO₂-Senke, die durch die Nutzung erneuerbarer Kohlenstoffquellen entsteht, in eine permanente CO₂-Senke zu überführen, muss die Verbrennung von nicht recycelbaren Abfällen mit Carbon Capture and Storage (CCS) kombiniert werden, um restliche biogene CO₂-Emissionen geologisch zu speichern. Die Maßnahmen, die für diese sektorübergreifende CO₂-Minderung und effizientes Kohlenstoffmanagement erforderlich sind, gliedern sich in drei Schlüsselstrategien – **direkte Elektrifizierung und Flexibilität, Kreislaufwirtschaft** und **erneuerbare Rohstoffe**. Diese drei Grundpfeiler ergänzen sich gegenseitig und werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

3.1 Direkte Elektrifizierung und Flexibilität

Die Elektrifizierung spielt eine entscheidende Rolle bei der Transformation der chemischen Industrie und kann in zwei Teilbereiche unterteilt werden: 1) die **direkte Elektrifizierung** industrieller Prozesswärme auf allen Temperaturniveaus, beispielsweise mithilfe

von Wärmepumpen, Elektrokesseln und weiteren Technologien wie elektrischen Öfen; und 2) die **indirekte Elektrifizierung** durch das Ersetzen von fossilem Wasserstoff, der z. B. bei der Herstellung von Ammoniak verwendet wird, durch erneuerbaren strombasierten Wasserstoff. Darüber hinaus müssen Prozesse, die bereits heute mit Strom betrieben werden (z. B. Chorkalielektrolyse), in Zukunft mit erneuerbarem Strom gespeist werden. Indem die Industrie Strom flexibel und systemdienlich verbraucht, kann sie den Ausbau und die Integration zusätzlicher Erneuerbarer Energien unterstützen (vgl. Kapitel 3.1.3).

Die Energiekrise hat die Abhängigkeit der deutschen Chemieindustrie von kostengünstigem Erdgas aus Russland deutlich gemacht. Zwar konnten einige Prozesse von Erdgas auf andere fossile Brennstoffe wie leichtes Heizöl umgestellt werden, doch in anderen Bereichen ließ sich die Nachfrage nach Erdgas nur durch die Drosselung der inländischen Produktion reduzieren, z. B. bei Ammoniak und Düngemitteln: Zwischen Februar und Oktober 2022 ging die Produktion von Chemikalien um 21 Prozent zurück (Destatis 2022).

Heute werden fast 40 Prozent aller von der chemischen Industrie verbrauchten fossilen Ressourcen energetisch genutzt, um Strom und Wärme für die Industrie bereitzustellen, beispielsweise in KWK-Anlagen (vgl. Abbildung 6). Die Prozessenergie, die 2019 in der chemischen Industrie verwendet wurde, belief sich auf 73 TWh Wärme¹³ und 53 TWh Strom. Erdgas ist mit einem Primärenergieverbrauch von 77 TWh_{LHV} im Jahr 2019 – das sind etwa acht Prozent des deutschen Erdgasverbrauchs¹⁴ – der wichtigste Energieträger für die chemische Industrie. Wie in

13 Einige Prozesse zur Umwandlung fossiler Kohlenstoffrohstoffe in Chemikalien erzeugen Nebenprodukte, die vor Ort als Brennstoffe verwendet werden. Diese „Nebenprodukt“-Brennstoffe sind hier nicht berücksichtigt.

14 Der Prozentsatz bezieht sich auf rein energetisch genutztes Erdgas. Unter Berücksichtigung des stofflich genutzten Erdgases liegt der Anteil bei 13 Prozent.

Abbildung 6 dargestellt, spielen Kohle und Öl als Energiequellen eine weniger wichtige Rolle (VCI 2022a, VCI 2022b). Es ist davon auszugehen, dass ungefähr drei Viertel des verbrauchten Stroms aus dem Netz kommen, während ein Viertel vor Ort über KWK-Anlagen produziert wird.

Im Interesse der Energiesouveränität muss die deutsche Chemieindustrie eine schnelle industrielle Wärmewende in die Wege leiten. Der europäische REPowerEU-Plan liefert die Blaupause für Maßnahmen gegen die Energiekrise bis 2030: Die europäische Industrie muss ihren Erdgasbedarf bis 2030 um 43 Milliarden Kubikmeter (423 TWh_{LHV}) reduzieren. Die deutsche Industrie muss ihren Erdgasverbrauch in den nächsten sieben Jahren in etwa halbieren, um einen entsprechenden Beitrag zur Erreichung dieses Ziels zu leisten.

Die Dekarbonisierung der Prozessenergie ist auch aus Klimaperspektive von entscheidender Bedeutung. Allein der Energiebedarf für die Herstellung der zehn Basischemikalien ist für fast 10 Mt CO₂-äq verantwortlich (vgl. Kapitel 2). Das deutsche Klimaschutzgesetz schreibt der Industrie eine Reduzierung ihrer jährlichen Emissionen um 59 Mt CO₂-äq bis 2030 vor, damit die für 2030 festgelegte Grenze von 118 Mt CO₂-äq eingehalten werden kann. Verglichen mit den rund 177 Mt CO₂-äq im Jahr 2022 müssen die Emissionen der Industrie damit um ein Drittel sinken (Agora Energiewende 2023).

Die Emissionen aus der Erzeugung und Nutzung von Prozessenergie müssen ressourceneffizient gesenkt werden. Gleichzeitig muss die Integration der erneuerbaren Energieerzeugung und -nutzung verbessert werden, um so zur Transformation des Energiesystems beizutragen. Klimaneutrale Wärme bietet Möglichkeiten, die Integration erneuerbaren Stroms durch flexiblen Verbrauch, z. B. in Kombination mit Wärmespeichern, zu verbessern.

Die direkte Elektrifizierung von Industrierwärme ist zentral, wenn die für 2030 gesetzten Ziele zur

Einsparung von Erdgas und für den Klimaschutz zu erreicht werden sollen. Eine detaillierte Analyse der Rolle der direkten Elektrifizierung, ihres Zusammenspiels mit dem Stromsektor und ihrer Wirtschaftlichkeit wurde von Agora Industrie in der Studie *Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie* (Agora Industrie und FutureCamp 2022) veröffentlicht.

3.1.1 Strategien für klimaneutrale Wärme

Energieeffizienz

Heute werden 86 TWh_{LHV} an fossilen Brennstoffen und ca. 40 TWh Strom aus dem Netz verwendet, um den Prozessenergiebedarf der chemischen Industrie zu decken (vgl. Abbildung 6). Auf dem Weg zu klimaneutraler Wärme muss der Grundsatz der Energieeffizienz an erster Stelle stehen. Zwar verfügen integrierte Verbundstandorte in der Regel über eine sehr gute Energieintegration, aber das Recycling von Abwärme kann weiter verbessert werden – zum Beispiel durch den Einsatz von Wärmepumpen. Die Entwicklung von Katalysatoren und neuen Verfahren ist eine weitere Möglichkeit, den Energiebedarf in der Industrie zu senken, zusätzlich zu naheliegenden Ansätzen wie der Verbesserung der Isolierung, was angesichts steigender Energiepreise auch wirtschaftlich immer sinnvoller wird.

Der verbleibende primäre Energiebedarf muss in Zukunft durch Erneuerbare Energien gedeckt werden. Eine erfolgreiche Wärmewende, die sowohl wirtschaftlich als auch dauerhaft nachhaltig ist, kann nur gelingen, wenn sie auch die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen und zukünftige Nutzungskonkurrenzen berücksichtigt. Energie- und ressourceneffiziente Lösungen müssen im Mittelpunkt stehen.

Nutzung alternativer Brennstoffe

Ein viel diskutiertes Thema in Zeiten hoher Energiepreise ist der Ersatz von fossilen Brennstoffen in Verbrennungsprozessen durch Alternativen wie

Biomasse, Biomethan oder sogar Kunststoffabfälle.¹⁵ In der Zementindustrie ist die Verwendung von Kunststoffabfällen als Brennstoff bereits gängige Praxis. Doch angesichts der begrenzten Ressourcen in Deutschland ist die Nutzung alternativer Brennstoffe keine nachhaltige Strategie: Die Ressourcennutzung von Kunststoffabfällen muss sich auf das Recycling konzentrieren, um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen (vgl. Kapitel 3.2). Biomasse kann als erneuerbare Kohlenstoffquelle effizienter genutzt werden (vgl. Kapitel 3.3). Eine rein energetische Nutzung limitiert die Möglichkeiten, Biomasse und Biomethan stofflich höherwertig einzusetzen und langfristig CO₂-Senken zu schaffen.

Nutzung erneuerbarer Wärmequellen

Die Nutzung von erneuerbaren Wärmequellen ist ein wichtiger Baustein für eine erfolgreiche industrielle Wärmewende. Eine Möglichkeit ist die Tiefengeothermie. Dabei wird Wärme bei bis zu 180 Grad Celsius aus Gesteinsschichten in einer Tiefe von 1.000 bis 4.000 Metern nutzbar gemacht. Der Geothermie wird in Deutschland ein großes Potenzial zugeschrieben, aber sie erfordert beträchtliche und risikoreiche Investitionen (Fraunhofer und Helmholtz 2022). Eine andere technologische Möglichkeit für die Bereitstellung von erneuerbarer Niedertemperaturwärme ist die konzentrierte Solarthermie in Kombination mit Wärmespeichersystemen. Der Hauptnachteil hierbei ist der hohe Platzbedarf (IN4climate.NRW 2021). In der Regel ist die Nutzung erneuerbarer Wärmequellen in der chemischen Industrie aufgrund der technischen, geologischen und räumlichen Gegebenheiten nur in einigen speziellen Fällen möglich.

Direkte Elektrifizierung

Strombasierte Prozesse wie Wärmepumpen, Elektrokessel und elektrische Öfen sind ein wichtiges Element der industriellen Wärmewende und können in vielen Sektoren und Branchen eingesetzt werden.

¹⁵ Da es sich bei erneuerbarem Wasserstoff um einen alternativen Kraftstoff auf Strombasis handelt, wird er im nachfolgenden Abschnitt sowie in der Infobox behandelt.

Wärmepumpen verwenden Ab- oder Umweltwärme als Wärmequelle und elektrische Kompressoren, um die Temperatur dieser Wärme auf ein Niveau anzuheben, auf dem sie in industriellen Prozessen genutzt werden kann. Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ist, desto höher ist die Effizienz der Wärmepumpe. Im Durchschnitt können aus 1 Kilowattstunde (kWh) erneuerbarem Strom etwa 2 bis 4 kWh erneuerbare Wärme erzeugt werden (Agora Industrie und Future Camp 2022). Bei bestimmten Anwendungen mit besonders geringen Temperaturdifferenzen sind sogar noch höhere Wirkungsgrade möglich (Madeddu et al. 2020). Wärmepumpen, die aktuell auf dem Markt

erhältlich sind, erreichen Temperaturen von bis zu 180 Grad Celsius, und mit weiterer Forschung und Entwicklung sind Temperaturen von bis zu 200 Grad Celsius durchaus möglich (Joormann und Laister 2019). Sogar oberhalb dieses Temperaturniveaus von 200 Grad Celsius kann der Einsatz von Wärmepumpen sinnvoll sein, sofern die Verfügbarkeit von Abwärme auf einem ausreichend hohen Temperaturniveau sichergestellt ist.

Elektrodenkessel sind eine etablierte Technologie, die Wärme erzeugt, indem unter Spannung stehende Elektroden direkt mit einem Wärmeträger in Kontakt gebracht werden. In Kombination mit elektrischen

Industrielle Wärmewende: direkte Elektrifizierung vs. erneuerbarer Wasserstoff

Die direkte Nutzung von Strom zur Bereitstellung von Prozessenergie ist der ressourceneffizienteste und schnellste Weg, um industrielle Wärme zu dekarbonisieren. In der politischen Debatte steht jedoch die indirekte Nutzung von Strom durch Wasserstoff viel stärker im Vordergrund. Die direkte Elektrifizierung, zum Beispiel mit Wärmepumpen, Elektrodenkesseln und Elektroöfen, hat zwei entscheidende Vorteile gegenüber energetisch genutztem Wasserstoff:

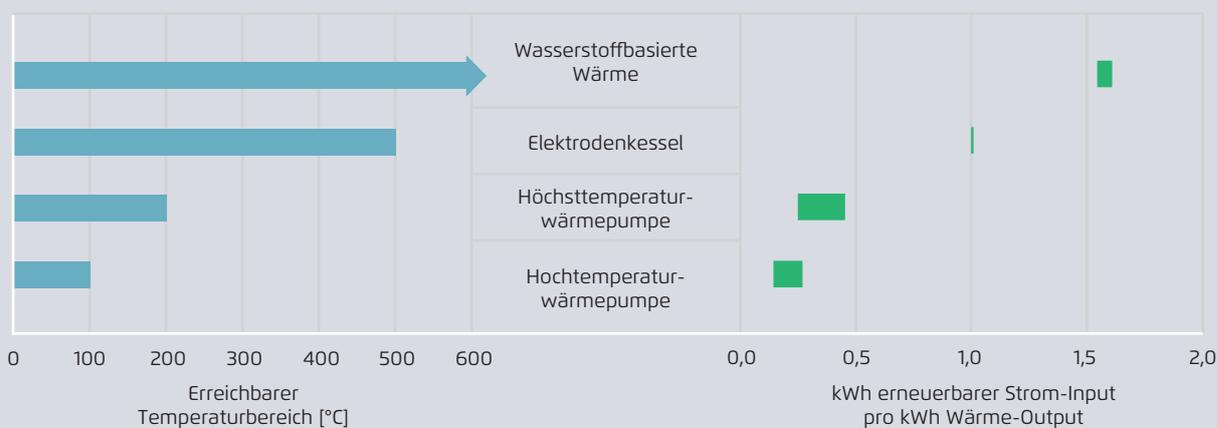
- 1. Energieeffizienz.** Während bei der direkten Elektrifizierung Wärme mit einem sehr hohen Wirkungsgrad bereitgestellt wird, sind die Produktion, der Transport und die Verbrennung von Wasserstoff mit hohen Effizienzverlusten verbunden. Wie in Abbildung 9 dargestellt, benötigt erneuerbarer Wasserstoff mehr als 1,5 kWh erneuerbaren Strom, um 1 kWh Wärme bereitzustellen. Elektrodenkessel benötigen dagegen nur 1 kWh, und besonders effiziente industrielle Wärmepumpen kommen mit nur 0,25 kWh aus. Wie in Abbildung 10 dargestellt, kann die direkte Elektrifizierung den primären Prozessenergiebedarf des Chemiesektors um 15 Prozent senken, während die flächendeckende Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff effektiv zu einem Anstieg des Energiebedarfs um 31 Prozent führen würde.
- 2. Verfügbarkeit und Infrastruktur.** Die Herstellung, der Transport und die Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff erfordern neue Investitionen in die Produktion (Elektrolyseure) und für den Aufbau einer Infrastruktur. Diese Investitionen sollten sich auf die Dekarbonisierung industrieller Prozesse konzentrieren, für die es keine andere Lösung gibt, wie die stoffliche Verwendung von Wasserstoff in chemischen und metallurgischen Prozessen. Für Anwendungen, die elektrifiziert werden können, kann das bestehende Stromnetz schrittweise erweitert und leistungsfähiger gemacht werden. Durch den Einsatz vielfältiger und intelligenter Elektrifizierungstechnologien und eine nachfrageseitige Flexibilität kann die Entwicklung eines kosteneffizienten und widerstandsfähigen erneuerbaren Stromsystems unterstützt werden.

Überhitzern können Elektrodenkessel Dampf bei 500 Grad Celsius erzeugen (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019). Elektrodenkessel können unabhängig von der Verfügbarkeit von Abwärme

betrieben werden, erreichen höhere Temperaturen als Wärmepumpen und haben geringere Investitionskosten, benötigen aber größere Mengen an erneuerbarem Strom. Der Wirkungsgrad von Elektrodenkesseln liegt

Mögliche Temperaturbereiche und Strombedarfe strombasierter Technologieoptionen für klimaneutrale Wärme

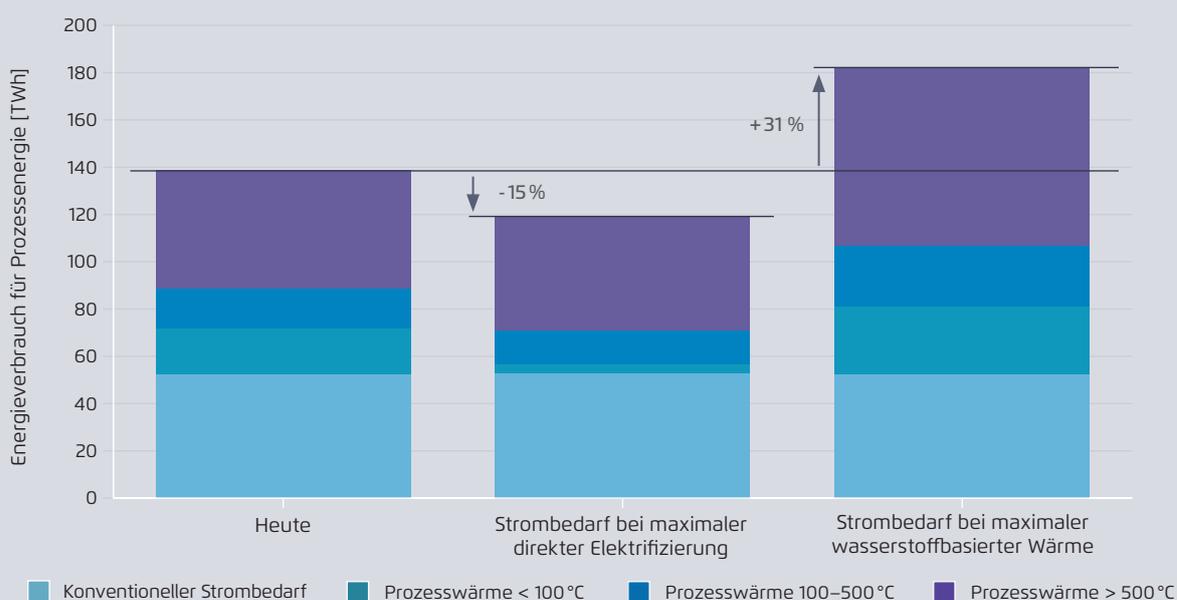
Abbildung 9



Agora Industrie und FutureCamp (2022)

Prozessenergieverbrauch für die Herstellung von Basischemikalien in Deutschland

Abbildung 10



Agora Industrie und Carbon Minds (2022)

bei nahezu 100 Prozent. Das bedeutet, dass mit jeder eingesetzten kWh Strom auch in etwa eine kWh Wärme bereitgestellt werden kann (Schüwer und Schneider 2018).

Die Elektrifizierung von Prozessen, die Wärme unter 500 Grad Celsius benötigen, ist aufgrund der hohen Wirkungsgrade und der bereits verfügbaren Technologien, die in der Breite eingesetzt werden können, besonders geeignet. Ihre Anwendbarkeit in verschiedenen Industrien ermöglicht die Weitergabe von Know-how und Erfahrung sowie eine schnelle Erweiterung der Produktionskapazitäten (Agora Industrie und Future Camp 2022, Madeddu et al. 2020).

Über 500 Grad Celsius ist die Wärmewende stärker sektor- und prozessabhängig. Für hohe und sehr hohe Temperaturen, z. B. für das Steamcracken, sind Technologien wie elektrische Öfen bereits verfügbar oder befinden sich in der Entwicklung. So können beispielsweise Widerstandsheizungen Temperaturen bis zu 1500 Grad Celsius und Effizienzen von 98 Prozent erreichen (Lupi 2017). Mithilfe von bereits etablierten Technologien können 78 Prozent des europäischen industriellen Wärmebedarfs direkt elektrifiziert werden. Unter Einbezug von derzeit in der Entwicklung befindlichen Technologien können 99 Prozent der industriellen Wärme elektrifiziert werden (Madeddu et al. 2020).

Die Verwendung von alternativen strombasierten Brennstoffen, wie zum Beispiel erneuerbarem Wasserstoff, sollte in erster Linie den Fällen vorbehalten sein, in denen eine direkte Elektrifizierung technisch nicht umsetzbar ist. Energieintensiver, teurer und in absehbarer Zukunft knapper erneuerbarer Wasserstoff sollte vorrangig stofflich eingesetzt werden, wie für die Herstellung von Stahl, Ammoniak und Methanol.

3.1.2 Elektrifizierung von Rohstoffen: grüner Ammoniak

Ammoniak ist eine der emissions- und erdgasintensivsten Basischemikalien: Im Jahr 2019 war die

Produktion von Ammoniak für etwa 6 Mt direkte CO₂-Emissionen und etwa drei Prozent des gesamten deutschen Erdgasverbrauchs verantwortlich.¹⁶

Ammoniak wird hauptsächlich in der Düngemittelproduktion, aber auch in der Produktion einiger Polymere – wie beispielsweise Nylon – verwendet. Ammoniak (NH₃) ist eine anorganische chemische Verbindung von Wasserstoff (H₂) und Stickstoff (N) und wird im Haber-Bosch-Verfahren synthetisiert. Da Ammoniak eine anorganische Chemikalie ist, also keinen Kohlenstoff enthält, und seine Bestandteile Wasserstoff und Stickstoff vergleichsweise effizient mit erneuerbarem Strom bereitgestellt werden können, wird Ammoniak in diesem Kapitel behandelt und nicht in Kapitel 3.3, das sich mit organischen Chemikalien befasst.

Die großen Mengen an Wasserstoff, die heutzutage für die Ammoniakproduktion verwendet werden, werden hauptsächlich aus fossilem Gas und Wasser durch die Methandampfreformierung gewonnen. Für erneuerbaren Ammoniak muss stattdessen Strom aus erneuerbaren Quellen genutzt werden. Eine vielversprechende Option für die Bereitstellung von erneuerbarem Wasserstoff ist die **indirekte Elektrifizierung**, bei der im Elektrolyseprozess erneuerbarer Strom verwendet wird, um Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Da bei der Herstellung von Ammoniak erneuerbarer Wasserstoff als Rohstoff und nicht zur Wärmeerzeugung verwendet wird, gilt die Ammoniakproduktion als No-regret-Option für die Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff (Agora Energiewende 2021). Zusätzlich zu seiner Verwendung in der Ammoniakproduktion wird fossiler Wasserstoff heute in der Herstellung von Methanol und in Raffinerien stofflich verwendet und muss durch erneuerbaren Wasserstoff ersetzt werden.

¹⁶ Schätzung basierend auf der Produktionsmenge nach Umweltbundesamt (2021b) und den charakteristischen Emissionen und dem Erdgasverbrauch der Ammoniakproduktion nach Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019).

Darüber hinaus wird auch im chemischen Recycling Wasserstoff benötigt, wodurch ein zusätzlicher Bedarf an erneuerbarem Wasserstoff entsteht (vgl. Kapitel 3.2; Agora Energiewende 2021).

3.1.3 Flexible Nutzung von erneuerbarem Strom

Laut Bundesregierung sollen bis zum Jahr 2030 mindestens 80 Prozent des Stromverbrauchs in Deutschland über Erneuerbare Energien bereitgestellt werden. Die Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft unterliegt Schwankungen. Um Produktion und Verbrauch aufeinander abzustimmen, muss die Stromerzeugung aus anderen Quellen zu bestimmten Zeiten erhöht werden (z. B. aus Grundlastkraftwerken). Zu anderen Zeiten, wenn die Erzeugung Erneuerbarer Energien in der jeweiligen Region die Nachfrage übersteigt, führt dieses Überangebot an erneuerbarem Strom zunehmend zur Abregelung der Erzeugung Erneuerbarer Energien. Um einen hohen Anteil an Erneuerbaren Energien zu ermöglichen, muss der Anteil der Grundlast-Nachfrage sinken – das ist einerseits über eine flexiblere Nachfrage und andererseits durch den Einsatz von Speichertechnologien möglich.

Sowohl die Elektrifizierung der Prozesswärme als auch der Einsatz von Elektrolyseuren bieten wichtige Möglichkeiten für mehr Flexibilität beim Stromverbrauch. Trotz der hohen Wirkungsgrade von Technologien zur direkten Elektrifizierung, die den Gesamtenergiebedarf im Vergleich zum derzeitigen Stand senken können (vgl. Abbildung 10), erhöht eine Verlagerung von Erdgas auf Strom den Gesamtstrombedarf der Industrie erheblich. Je besser die industrielle Wärmewende und die Dekarbonisierung des Energiesektors aufeinander abgestimmt sind, desto größer sind die Synergien für eine effiziente Transformation. Ein systemdienlicher Verbrauch kann somit einen Anreiz für den beschleunigten Ausbau der Erneuerbaren Energien bieten.

Mit dem weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien werden die Zeiträume, in denen überschüssiger

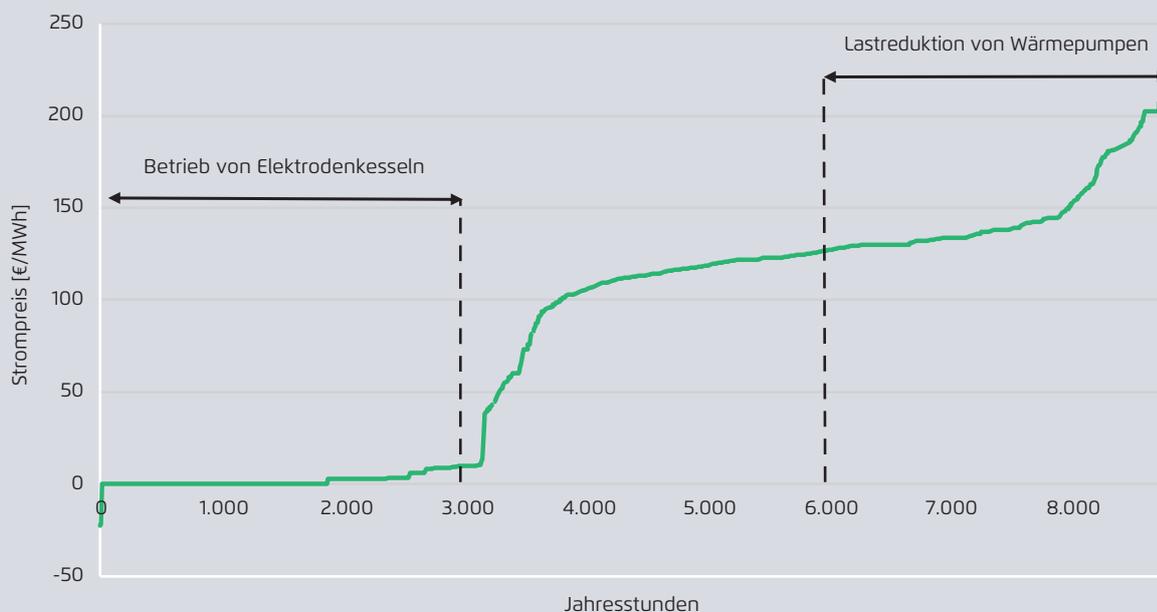
erneuerbarer Strom erzeugt wird, zunehmen. Dieses Überangebot an Strom aus Erneuerbaren Energien führt zu einem Preisrückgang im Stromgroßhandel. Niedrige Preise und die Drosselung der Produktion führen zu geringeren Einnahmen, die den Wert der Erneuerbaren Energien untergraben und damit die Rentabilität von Investitionen in zusätzliche Erneuerbare Energien schmälern – der sogenannte *Kannibalisierungseffekt*. Um diesem *Kannibalisierungseffekt* entgegenzuwirken, muss in Zeiten, in denen besonders viel Strom aus Erneuerbaren Energien produziert wird, zusätzliche Nachfrage geschaffen werden. Wenn hingegen die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien gering ist, muss die Nachfrage gesenkt werden, um den Einsatz von teuren mit Wasserstoff betriebenen Kraftwerken oder kostspieligen Stromspeichern zu beschränken. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Strompreise für ein klimaneutrales Stromsystem.¹⁷ Die Volatilität der Produktion führt zu einer großen Bandbreite an Strompreisen – sehr niedrige Preise in manchen Stunden und hohe Preise in anderen. Industrielle Verbraucher, die die Flexibilität ihres Stromverbrauchs erhöhen, unterstützen das Stromsystem durch den Ausgleich von Angebot und Nachfrage und profitieren aus wirtschaftlicher Sicht direkt von günstigem Strom aus erneuerbaren Quellen.

Der heutige Strombedarf in der chemischen Industrie ist in der Regel nicht flexibel. Die hohe Effizienz der chemischen Industrie ist zum Teil auf stationäre, d. h. konstant betriebene Prozesse zurückzuführen. Dies ist das Ergebnis jahrzehntelanger technischer Entwicklungsarbeit und in vielen Fällen wichtig für die Betriebssicherheit und Rentabilität. In der industriellen Wärmewende kann und muss der Strombedarf, der vollständig auf Erneuerbaren

17 Mit 80 Prozent des Stroms aus Erneuerbaren Energien im Jahr 2030 ist ein klimaneutraler Stromsektor bis 2035 in greifbarer Nähe. Wie dieses Ziel erreicht werden kann, hat Agora Energiewende gemeinsam mit Prognos und Consentec in der Studie *Klimaneutrales Stromsystem 2035* untersucht (Agora Energiewende, Prognos und Consentec 2022).

Strompreise für das Szenario *Klimaneutrales Stromsystem 2035*

Abbildung 11



Agora Energiewende, Prognos, Consentec (2022)

Energien basiert, flexibler sein (Agora Energiewende, Prognos und Consentec 2022).

Kurzfristig kann die Kombination von elektrifizierten Prozessen mit bestehenden fossilbasierten Prozessen Emissionen reduzieren und die Erfahrung im Umgang mit der Technologie erhöhen. Chemieparks verfügen in der Regel über Back-up-Kapazitäten für die Energieversorgung, um den Betrieb von Downstream- bzw. nachgelagerten Prozessen bei Ausfällen oder Abschaltungen zu gewährleisten. Eine Elektrifizierung der Back-up-Kapazitäten für die Dampfproduktion ermöglicht beispielsweise eine hybride fossil- und strombasierte Produktion. Eine andere Möglichkeit ist, bestehende Anlagen mit elektrifizierten Wärmeerzeugern zu ergänzen und die Nutzung der fossilbasierten Prozesse zu drosseln, wenn ausreichend erneuerbarer Strom verfügbar ist und die Strompreise niedrig sind.

Eine weitere Möglichkeit für einen flexiblen Betrieb ist die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff, der beispielsweise für die Ammoniakproduktion verwendet wird. Als Back-up für das Stromsystem kann Wasserstoff in Zeiten hoher erneuerbarer Stromerzeugung hergestellt und dann rückverstromt werden, wenn die Erzeugung aus Wind und Sonne gering ist. Die chemische Industrie ist heutzutage der größte Verbraucher von fossilem Wasserstoff (Agora Energiewende 2021). Durch die Ergänzung und den flexiblen Betrieb der bestehenden fossilbasierten Wasserstoffproduktion mit der Wasserstoffelektrolyse können Emissionen gemindert und dem Stromsystem Nachfrage-Flexibilitäten zur Verfügung gestellt werden.

Mittel- und langfristig können Speichertechnologien insbesondere für Wärme, aber auch für Strom, Wasserstoff und Zwischenprodukte einen flexiblen Netzstromverbrauch ermöglichen und einen konstanten Betrieb nachgelagerter Prozesse ermöglichen.

Erneuerbare Energien bieten niedrigere Stromgestehungskosten (LCOE), also Lebenszykluskosten, als die konventionelle Erzeugung von Strom. Die Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien liegen im Durchschnitt deutlich unter den Strompreisen auf dem Strommarkt. Die Preisgestaltung auf dem Strommarkt wird in erster Linie durch die Kosten des (bisher meist fossilen) Grenzkraftwerks bestimmt.

Während sich die Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien hauptsächlich nach den Investitionskosten richten und daher auf einem niedrigen Niveau konstant sind, werden die Stromgestehungskosten für fossile Kraftwerke von den Preisen für fossile Brennstoffe und den CO₂-Preisen bestimmt. Mit dem Fortschreiten der Energiewende und dem steigenden Anteil der Erneuerbaren

Langfristige Stromlieferverträge (PPAs)

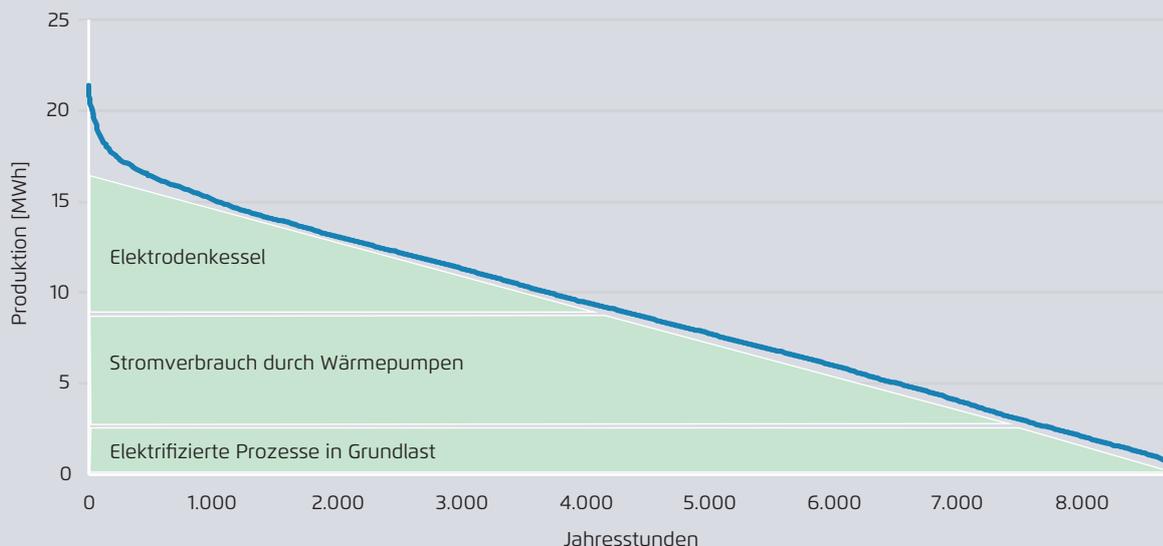
Eine Möglichkeit für Unternehmen, kurzfristig von den niedrigen Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien zu profitieren, ist die Verwendung eigener Erneuerbarer Energien oder der Bezug von erneuerbar erzeugtem Strom im Rahmen langfristiger Stromlieferverträge (Power Purchase Agreements, PPAs). Durch die Kombination von Investitionen in Erneuerbare Energien und flexibler Elektrifizierung können beide Risiken gegenseitig abgesichert werden: Elektrifizierte Industrieanlagen erhalten Zugriff auf berechenbare, günstige Strompreise, und bei der Erzeugung von Erneuerbaren Energien ist die Abnahme des erzeugten Stroms zu wirtschaftlichen Tarifen gesichert.

Um zu verdeutlichen, wie Unternehmen sowohl die Erzeugung als auch die Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien gegenseitig optimieren können, zeigt Abbildung 12 die Jahresdauerkennlinie für die Stromerzeugung eines theoretischen Portfolios von jeweils zehn Megawatt (MW) Photovoltaik, Onshore- und Offshore-Windenergie. Wie in der Grafik dargestellt, kann ein solches Portfolio beispielsweise mit 7,5 MW an Elektrodenkesseln kombiniert werden, die jährlich mit bis zu 4.000 Volllaststunden betrieben werden. Darüber hinaus können weitere 7 MW an Wärmepumpen zwischen 4.000 und 8.000 Stunden betrieben werden. Wärmepumpen sind kapitalintensive Investitionen, benötigen aber relativ wenig Strom pro Einheit bereitgestellter Wärme. Infolgedessen sind viele Volllaststunden erforderlich, damit sich die Investition lohnt. Elektrodenkessel sind weniger kapitalintensiv, benötigen aber mehr Strom je erzeugter Wärmeinheit, was sie für den Betrieb bei niedrigen Volllaststunden mit niedrigen Stromkosten attraktiver macht. Der flexible Einsatz von Elektrodenkesseln und Wärmepumpen ermöglicht einen Grundlast-Stromverbrauch von 2,5 MW für Prozesse, die nicht flexibel betrieben werden können. Die beschriebenen Flexibilitäten von Elektrodenkesseln und Wärmepumpen ergeben sich aus dem Hybridbetrieb mit bestehenden Anlagen. Für eine Komplettversorgung mit erneuerbarer Wärme kann die direkte Elektrifizierung mit einer Speichertechnologie kombiniert werden. Da sich Prozessdampf nicht gut speichern lässt, würde strombasierte Wärme auf flexible Weise erzeugt und in einem geeigneten Medium, wie beispielsweise Spezialzement oder Keramik, gespeichert. Der Dampf würde dabei in einem kontinuierlichen nachgelagerten Prozess erzeugt werden.

In dem beschriebenen Beispiel von sich gegenseitig absichernden Investitionen in Erneuerbare Energien und Elektrifizierung können die Unternehmen weiterhin Strom auf dem Energiemarkt kaufen und verkaufen. Ein Portfolio aus einer flexiblen Last und Stromerzeugung zusammen mit einer aktiven und effektiven Teilnahme am Energiemarkt ermöglicht Unternehmen auch den Zugang zu kostengünstigem Strom aus Erneuerbaren Energien für ihre Grundlastprozesse.

Stromproduktion eines Erneuerbaren-Portfolios aus je 10 MW Photovoltaik, Windkraft an Land und Windkraft auf See

Abbildung 12



Agora Industrie und FutureCamp (2022). Datengrundlage für den Ertrag nach Erzeugungstechnologie ist die bundesweite Produktion aus dem Jahr 2020 bezogen auf die bundesweit installierte Leistung auf Basis des Agorameters.

Energien am Strommix stellen die Erneuerbaren Energien zunehmend die marginale Stromquelle dar, was die Strompreise systemisch senkt. Eine zügige Energiewende ist daher zentral für die Sicherung der industriellen Basis Deutschlands im internationalen Wettbewerb.

3.2 Schließen des Kohlenstoffkreislaufs

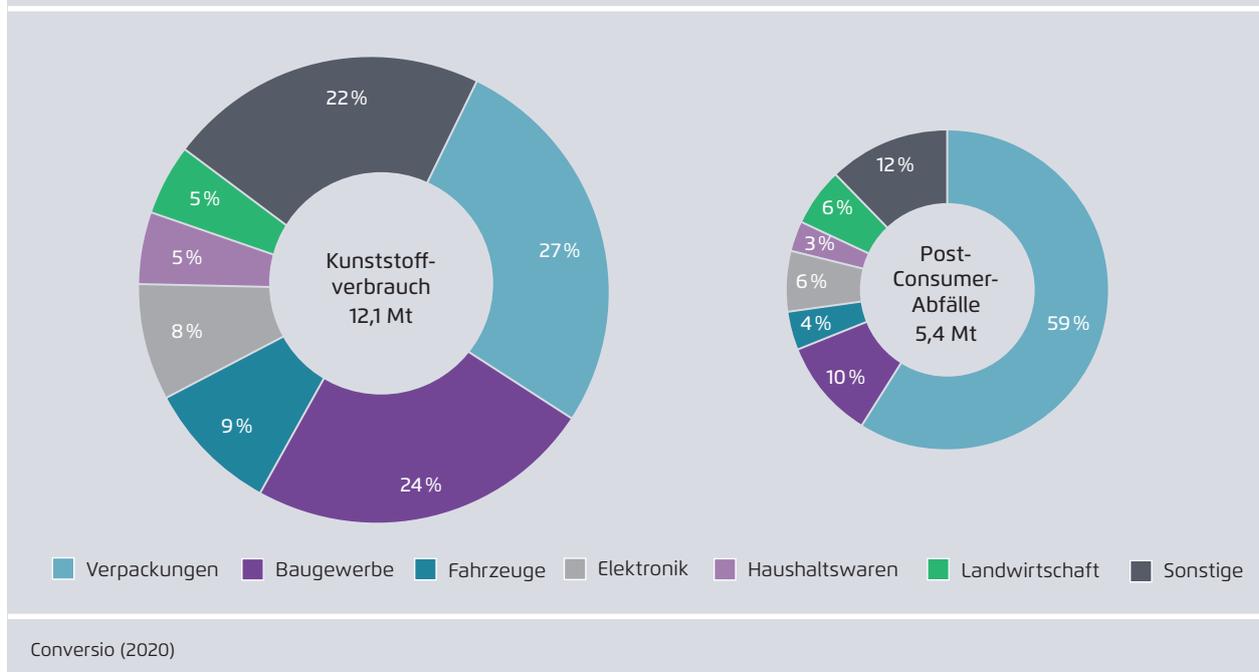
Ein großer Teil des fossilen Kohlenstoffs, der zur Herstellung organisch-chemischer Produkte (insbesondere Kunststoffe) verwendet wird, landet nach nur einer Nutzungsphase, die oft nur wenige Monate dauert, als CO₂ in der Atmosphäre. Bei Kunststoffen machen diese Emissionen am Ende der Lebensdauer in der Regel mehr als 50 Prozent der Lebenszyklus-Emissionen aus (vgl. Kapitel 2.2). Die Kreislaufwirtschaft ist ein zentrales Element zur strukturellen Reduzierung der Lebenszyklus-Emissionen von

Kunststoffen. Das Recycling von Kunststoffabfällen verringert Emissionen aus der Abfallverbrennung und reduziert zugleich den Bedarf an Rohstoffen. Indem Plastikabfall als lokale Ressource betrachtet wird, können fossile Importe durch regionale Wertschöpfung ersetzt werden. Kreislaufwirtschaftsstrategien können auch bei anderen chemischen Produkten als Kunststoffen eine wichtige Rolle bei der effizienten Energie- und Ressourcennutzung spielen, etwa bei der Wiederverwendung von Chemikalien (einschließlich anorganischer Chemikalien durch z. B. Leasing und Wiederverwendung von Kühlmitteln oder Lösungsmitteln). Diese Studie konzentriert sich jedoch auf die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft und insbesondere des Recyclings für den Bereich der Kunststoffe.

Wie in Abbildung 13 dargestellt, machten Kunststoffverpackungen im Jahr 2019 rund 27 Prozent des Kunststoffverbrauchs, aber 59 Prozent der Kunst-

Kunststoffverbrauch und Post-Consumer-Kunststoffabfälle in Deutschland 2019

Abbildung 13



stoffabfälle in Deutschland aus (Conversio 2020). Hohe spezifische Emissionen der Verbrennung und niedrige Recyclingraten führen zu großen CO₂-Emissionen am Ende der Lebensdauer.¹⁸ Theoretisch würde die Verbrennung des gesamten im Jahr 2019 verarbeiteten Kunststoffs (12,1 Mt) in etwa 34 Mt CO₂ verursachen.¹⁹ Emissionen aus der Verbrennung von Kunststoffabfällen werden normalerweise nicht dem Industriesektor, sondern dem Energiesektor zugeschrieben. Konzepte zur Vermeidung von Kunststoffabfällen und den damit verbundenen End-of-Life-Emissionen betreffen die gesamte

18 Aufgrund regulatorischer Anforderungen spielt die Deponierung von Kunststoffabfällen bei der Abfallbehandlung in Deutschland keine Rolle mehr und ist auch in der gesamten EU von abnehmender Bedeutung (2008/98/EC und Richtlinie (EU) 2018/851).

19 Es handelt sich hier um eine Näherung mit der Annahme, dass die Verbrennung einer Tonne Kunststoff 2,8 Tonnen CO₂ ausstößt. Die tatsächlichen Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Kunststoffen hängen unter anderem von der Zusammensetzung der Kunststoffabfälle ab.

Wertschöpfungskette und müssen unter Einbezug der chemischen Industrie, der Hersteller von Endprodukten (z. B. Kunststoffverpackungen) sowie der Abfallwirtschaft erarbeitet werden. Wichtige Maßnahmen zur Emissionsminderung sind die Verringerung der Gesamtmenge des produzierten Kunststoffs sowie die Verbesserung der Kreislaufführung durch Recycling. Die geplante Bepreisung der Emissionen aus der Abfallverbrennung im EU-ETS verbessert die Wirtschaftlichkeit von Kunststoffrecycling. Ab 2024 müssen EU-Mitgliedsstaaten die Emissionen aus kommunalen Müllverbrennungsanlagen messen, melden und verifizieren. Bis 2026 beabsichtigt die EU-Kommission einen Bericht über den Einbezug von Müllverbrennungsanlagen in den EU-ETS ab 2028 vorzulegen, mit einer möglichen Opt-out-Klausel bis spätestens 2030.

Der derzeitige regulatorische Rahmen zur Kreislaufwirtschaft – insbesondere das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – hat bisher nicht ausgereicht, um das Potenzial einer Kreislaufwirtschaft zu mobilisieren. Derzeit entwickelt die Bundesregierung eine

neue nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Eine effiziente Kreislaufwirtschaft reduziert nicht nur die CO₂-Emissionen, sondern erhöht die lokale Wertschöpfung durch die effiziente Nutzung wertvoller recyclingfähiger Abfallstoffe und verringert damit die Abhängigkeit von fossilen Energieimporten.

Effizientere Nutzung von Chemikalien

Um die mit Chemikalien verbundenen Emissionen zu reduzieren, gilt es, den effizienten, qualitativ hochwertigen und langfristigen Einsatz chemischer Produkte zu fördern und die Verwendung unnötiger und kurzlebiger Produkte zu vermeiden oder zu unterbinden. Hierfür können neben dem Verbot ausgewählter unnötiger und kurzlebiger Plastikprodukte auch Geschäftsmodelle gestärkt werden, die ganz auf Verpackungen verzichten und auf Wiederverwendung und Wiederbefüllung ausgerichtet sind. Innovative Geschäftsmodelle, die auf Sharing und Vermietung basieren, können bei gleichbleibendem Leistungsumfang die Nachfrage senken (z. B. Verpackung als Dienstleistung). Auch reparaturfreundlichere Materialien oder Produktdesigns können die Abfallmenge reduzieren.²⁰

Recycling

Das Recycling von chemischen Produkten – insbesondere von Kunststoffen – die das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht haben, hat einen doppelten Vorteil. Erstens führt Recycling zu einer Verringerung der Emissionen, die sonst bei der Verbrennung der Produkte entstehen würden. Gleichzeitig reduziert die Verwendung von recyceltem Material bei der

Herstellung neuer Produkte den Bedarf an neuen Rohstoffen. Für das Kunststoffrecycling existieren verschiedene Recyclingtechnologien, die grundsätzlich in mechanisches oder chemisches Recycling kategorisiert werden können.

Die gemeldeten hohen Recyclingraten in Deutschland, wie die von Conversio (2020) gemeldeten 39 Prozent oder die vom Umweltbundesamt (2021a) genannten 46 Prozent, täuschen darüber hinweg, dass der größte Teil der in Deutschland erzeugten Kunststoffabfälle verbrannt wird.²¹ Methodisch gesehen wird die Recyclingrate als der Anteil des verfügbaren, getrennt gesammelten Kunststoffs erfasst, der dem Recyclingprozess zugeführt wird. Material Economics schätzt jedoch, dass die tatsächliche Menge an Kunststoffabfall deutlich darüber liegt. Für die EU wird geschätzt, dass die Kunststoffabfallmengen etwa 50 Prozent höher sind als von Politik und Industrie angenommen (Material Economics 2022). Darüber hinaus werden bei der oft erwähnten hohen Recyclingrate die Verluste im Recyclingprozess nicht berücksichtigt. Wenn man die nicht erfassten Kunststoffabfälle miteinbezieht, kann man davon ausgehen, dass die tatsächliche Recyclingrate deutlich niedriger ist. Auf europäischer Ebene wird geschätzt, dass die tatsächliche Recyclingrate für Kunststoffe bei etwa 15 Prozent statt der angegebenen 35 Prozent liegt (Agora Industrie 2022b). Um das volle Recyclingpotenzial auszuschöpfen und sinnvolle Recyclingziele vorzugeben, muss die Methode zur Erfassung der Recyclingraten durch einen „Post Consumer Waste to Product“-Ansatz ersetzt werden, der alle Verluste sowie die unzureichende Sammlung von Kunststoffabfällen berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2.1).

20 Es gibt nur wenige verlässliche Daten über das CO₂-Minderungspotenzial durch die Vermeidung von unnötigen Verpackungen und die Förderung von Wiederverwendung und innovativen Produkten. Für Europa schätzt eine frühere Studie von Agora Industrie ein Emissionsreduktionspotenzial von 8 Mt CO₂-äq (Agora Industrie 2022b). Eine Studie von SYSTEMIQ schätzt, dass bis 2030 jährlich 5 Mt Kunststoffmüll eingespart werden können, was einem Ausstoß von etwa 14 Mt CO₂-äq entspricht (SYSTEMIQ 2022). Diese Werte entsprechen einer Reduktion von Kunststoffabfällen um sechs bis elf Prozent bis 2030.

21 Etwa 39 Prozent der 2019 in Deutschland getrennt gesammelten Kunststoffabfälle im dualen System wurden recycelt, während neun Prozent exportiert und mehr als 50 Prozent verbrannt wurden (Conversio 2020).

Mechanisches Recycling

Heute wird fast ausschließlich mechanisches Recycling angewandt. Mechanisches Recycling bzw. werkstoffliches Recycling ist ein Verfahren, bei dem sortierte Kunststoffabfälle eingeschmolzen und zu neuen Produkten verarbeitet werden. Mechanisches Recycling ist besonders effizient, da die molekulare Struktur der Kunststoffe, die Polymere, während des Prozesses weitestgehend intakt bleibt. Für hochwertiges mechanisches Recycling kommen nur Abfallströme infrage, die nur eine Kunststoffsorte und einen möglichst geringen Anteil an Verunreinigungen enthalten. Je höher der Anteil an Verunreinigungen ist, desto geringer ist die Qualität des Rezyklats. Bei hohen Verunreinigungen ist es schwierig, aus dem Rezyklat qualitativ hochwertige Produkte herzustellen. Das mechanische Recycling von gemischten Kunststoffabfällen führt meist zu einem Downcycling, also einem Recycling zu qualitativ minderwertigen Produkten. Typische mit Downcycling hergestellte Produkte sind Schallschutzwände, Paletten, Kabelrohre und Parkbänke (Huckestein und Plesnivý 2000).

Damit das Potenzial des mechanischen Recyclings mobilisiert und Downcycling unterbunden werden kann, muss die Sammlung von Kunststoffabfällen verbessert werden. Es müssen bessere Anreize für die Vorsortierung durch den Verbraucher geschaffen werden, damit mehr Kunststoff in die Sortier- und Recyclingsysteme gelangt (z. B. durch die Stärkung des dualen Systems oder durch Pfandsysteme). Gleichzeitig gilt es, die Sortiersysteme zu verbessern, um verfügbare Stoffströme besser nutzbar zu machen.²²

Mehrschichtige, schwarze und dunkle Verpackungen sowie die Kombination mehrerer unterschiedlicher

Polymere mit ähnlichen Eigenschaften in einem Produkt stellen für Sortieranlagen große Herausforderungen dar. Das automatisierte Sortieren von gemischten Kunststoffabfällen führt fast immer zu Polymerblends aus zwei oder mehr Polymeren – was häufig Downcycling zur Folge hat (Schyns und Shaver 2021, Ragaert et al. 2017). Durch „Design für Recycling“ können bereits beim Produktdesign alle Phasen des Produktlebenszyklus und insbesondere das Recycling berücksichtigt werden.²³

Eine Erfolgsgeschichte des mechanischen Recyclings ist das Pfand- und Recyclingsystem für PET-Flaschen. Die getrennte Sammlung und klare Standardisierung von PET-Flaschen ermöglicht sehr reine Abfallströme und damit eine sehr hohe Recyclingquote von 98 Prozent (GVM 2020). Eine Ausweitung des Pfandsystems über PET-Flaschen hinaus hat großes Potenzial und kann sehr effizientes Recycling von Kunststoffverpackungen ermöglichen.

Agora Industrie schätzt, dass die Recyclingraten für das mechanische Recycling in der EU von 15 auf 35 Prozent erhöht werden könnten (nach dem „Post Consumer Waste to Product“-Ansatz, vgl. Agora Industrie 2022b). Auch bei Abfallströmen mit einer hohen Qualität, die für hochwertiges mechanisches Recycling geeignet sind, kommt es durch den Schmelzvorgang zu einer Schädigung der Polymerketten, was die Kreislauffähigkeit durch diese Technologie begrenzt. Hinzu kommt: Heutzutage basieren viele Hightechverbundwerkstoffe auf der Kombination verschiedener Komponenten. Diese Verbundwerkstoffe können nicht mechanisch recycelt werden und es ist unwahrscheinlich, dass ein Design zum Zwecke des mechanischen Recyclings die geforderten Produkteigenschaften erfüllt (z. B. geringes Gewicht und hohe Steifigkeit für Windturbinenblätter).

22 Etablierte Sortiersysteme verwenden verschiedene Methoden wie die Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie, optische Farbsortierung, das Schwimm-/Sink-Verfahren und die manuelle Sortierung (Ragaert et al. 2017). Typischerweise werden unterschiedliche Sortierverfahren kombiniert, um eine möglichst hohe Sortierqualität zu gewährleisten.

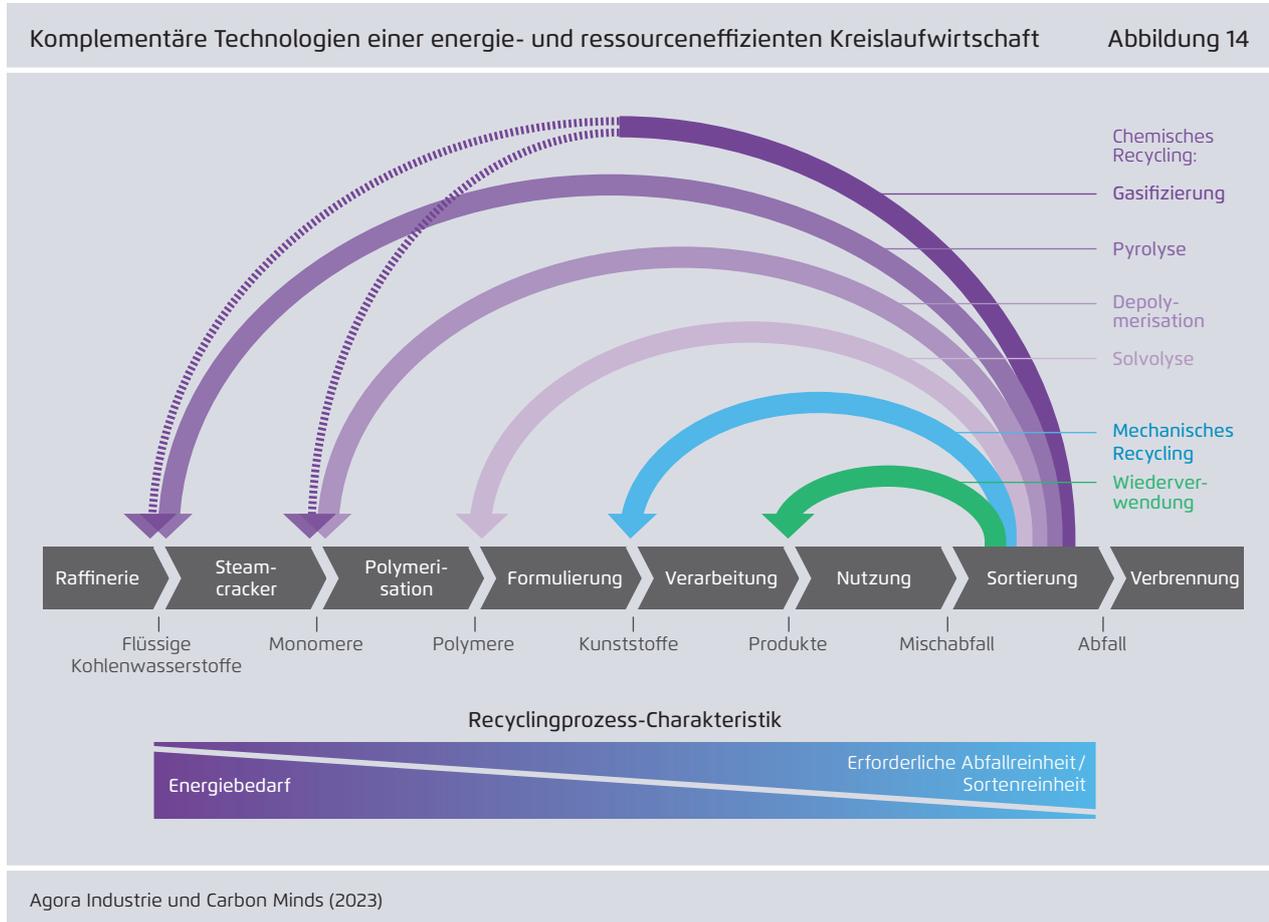
23 Beispiele für „Design für Recycling“ sind die Vermeidung von schwarzen Kunststoffen oder gemischten Verpackungen.

Chemisches Recycling

Chemisches Recycling ist ein Sammelbegriff für eine Reihe von Technologien, die das mechanische Recycling ergänzen und hohe Recyclingraten ermöglichen können. Beim chemischen Recycling werden Kunststoffabfälle nicht einfach geschmolzen, sondern in ihre chemischen Bausteine zerlegt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Recyclingansätze. Die Technologien erfordern unterschiedliche Kompositionen und Abfallreinheitsgrade und haben das Potenzial, sich gegenseitig effektiv zu ergänzen. Wie in Abbildung 14 dargestellt, können die Produkte aus den jeweiligen Recyclingtechnologien zu verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette rückgeführt werden. Chemische Recyclingtechnologien sind in der Regel deutlich energieintensiver als mechanisches Recycling und müssen mit Erneuerbaren Energien betrieben werden, um den CO₂-Ausstoß gegenüber der Primär-

produktion und der Abfallverbrennung zu mindern. Ebenso wie beim mechanischen Recycling kommt es beim chemischen Recycling aufgrund von Inhaltsstoffen, die nicht stofflich genutzt werden können, weil die dafür benötigte Energiemenge oder der Sortieraufwand unverhältnismäßig hoch wären, zu Prozessverlusten. Die Anwendung des chemischen Recyclings ist also ausdrücklich keine Alternative, sondern eine Ergänzung zu notwendigen Design-Anreizen zugunsten einer besseren Sortierfähigkeit und eines effizienteren Recyclings.

Insbesondere der Einsatz von chemischen Recyclingprozessen mit hohem Energiebedarf muss sorgfältig abgewägt werden. Der Prozess muss insgesamt zu einer deutlichen Reduzierung der CO₂-Emissionen und des Ressourcenbedarfs führen. Das chemische Recycling wird einen erheblichen Bedarf an Wasser-



Kurzübersicht der betrachteten Recyclingtechnologien		Tabelle 1
Recyclingtechnologie	Kurzbeschreibung	Optimale Abfallzufuhr
Mechanisches Recycling	Sortierte Kunststoffabfälle werden zur Herstellung neuer Kunststoffteile eingeschmolzen.	Reine Mono-Material-Abfälle (PET, PE, PP ...)
Solvolyse	Kunststoff wird durch Hitze und Lösungsmittel in eine Lösung seiner Bestandteile (meist Polymere und Additive) aufgelöst und getrennt.	Spezifische Mehrschichtverpackungen (z. B. PE-Aluminium)
Depolymerisation	Kunststoffe werden unter Verwendung verschiedener Lösungsmittel und Hitze (Methanolyse) in ihre Monomere zerlegt.	Polymergruppen (Polyester), reine Einzelpolymerabfälle
Pyrolyse	Polymere werden unter hohen Temperaturen und anaeroben Bedingungen (ohne Sauerstoff) in flüssige Kohlenwasserstoffe zerlegt.	Mischpolymere mit hohem Polyolefinanteil
Gasifizierung	Kunststoffabfälle werden mit Gasifizierungsmitteln (z. B. Dampf, Sauerstoff und Luft) erhitzt und in Synthesegas (Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid) umgewandelt.	Mischpolymere

Schyns und Shaver (2021), Saebea et al. (2020), Kusenbergl et al. (2022), Zhao et al. (2018)

stoff verursachen (Agora Energiewende 2021), und die Versorgung mit Wasserstoff muss mit der Dekarbonisierung des Energiesektors in Einklang stehen. Die wichtigsten Grundlagen hierfür sind in Kapitel 3.1.2 und 3.1.3 dargelegt.

Carbon Capture and Utilisation (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS)

Bei weder mechanisch noch chemisch recycelbaren Abfallmaterialien (z. B. Klebstoffe, Farben, nicht recycelbare Kunststoffe usw.) ist eine weitere technologische Option, um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen, die Verbrennung dieser Materialien und die Abscheidung und Nutzung des entstehenden CO₂ für neue Prozesse und Materialien (Carbon Capture and Utilisation, CCU). Im Vergleich zum mechanischen und chemischen Recycling ist dies die energieintensivste Option. Ein wichtiges Kriterium für den Ausbau der Recyclingwirtschaft ist die Energie- und Materialeffizienz. Aufgrund seines hohen Energiebedarfs ist CCU lediglich eine Ergänzung zu mechanischem und chemischem Recycling und zur Kreislaufführung nur eingeschränkt sinnvoll. Wo weder Recycling noch CCU sinnvoll sind, kann die CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and

Storage, CCS) als „letzte Instanz“ verhindern, dass CO₂-Emissionen den Kohlenstoffkreislauf verlassen und in die Atmosphäre gelangen.

Mit CCS kann verhindert werden, dass CO₂-Emissionen aus nicht recycelbaren chemischen Abfällen in die Atmosphäre entweichen. Der nicht recycelbare chemische Abfall kann als alternativer Brennstoff in der Industrie verwendet oder direkt in Abfallverbrennungsanlagen verbrannt werden, um Wärme und Strom zu erzeugen. Die daraus entstehenden Emissionen werden aufgefangen, zu Speicherstätten transportiert und langfristig unterirdisch gelagert. Dies ist lediglich in Industrien sinnvoll, die ohnehin Zugang zu einer CO₂-Infrastruktur benötigen, um mit Prozessemissionen umgehen zu können, die anderweitig nicht vermeidbar sind, wie etwa in der Zementindustrie (Agora Industrie 2022a). Hier können die Emissionen aus der Abfallverbrennung zusammen mit den Prozessemissionen aus der Klinkerproduktion effizient abgeschieden werden. Damit CCS als sinnvolle Option auf dem Weg zur Klimaneutralität in Betracht gezogen werden kann, ist die Abscheiderate entscheidend. In der Praxis können keine

CO₂-Abscheideraten von 100 Prozent erreicht werden, sodass die Restemissionen an anderer Stelle kompensiert werden müssten. Darüber hinaus muss eine CO₂-Infrastruktur aufgebaut werden, um das CO₂ zu geeigneten CO₂-Speichern zu transportieren. Außerdem stehen nur begrenzt CO₂-Speicher zur Verfügung (Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut, 2021). Es wird daher eine Strategie für das Kohlenstoffmanagement benötigt, in der klare Standards festgelegt werden, die den Zugang von anderweitig nicht vermeidbaren Restemissionen zu CO₂-Speicherstätten priorisieren. CCS kann daher nicht als Alternative zur Verwendung erneuerbarer Rohstoffe gesehen werden und darf den Ausstieg aus fossilen Rohstoffen nicht verzögern.

3.2.1 Potenziale und Grenzen des Recyclings in Deutschland

Die Kombination von chemischem und mechanischem Recycling hat das Potenzial, sehr hohe Recyclingraten zu erreichen. Die Schätzungen der erreichbaren Recyclingraten für die wachsenden Mengen an Post-Consumer-Kunststoffabfällen reichen von 75 Prozent (Agora Industrie 2022b) bis 85 Prozent (DECHEMA 2022).²⁴ In Deutschland wird das Potenzial von Kunststoffabfällen als Ressource jedoch durch drei Faktoren begrenzt:

1. Nicht recycelbare Kunststoffe

Viele Polymere kommen in Verbundwerkstoffen zum Einsatz, z. B. als Klebstoffe oder Beschichtungen und können häufig nicht recycelt werden. Bei diesen Anwendungen haftet der Kunststoff an anderen Materialien wie Stahl, Holz oder Papier. Die Trennung und das anschließende Recycling dieser Materialien sind in vielen Fällen nicht möglich. Von den 20,2 Mt der gesamten Polymer-

produktion im Jahr 2019 entfallen 7,9 Mt auf solche Anwendungen (Conversio 2020).

2. Unzureichende Sammlung von Kunststoffabfällen

Nicht alle Kunststoffe, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, landen auch im Abfall-Recycling-System. Wie bereits erwähnt, ist nach Schätzungen von Material Economics auf EU-Ebene die tatsächliche Menge an ausgedienten Kunststoffen um 50 Prozent höher als offiziell angegeben (Material Economics 2022).

3. Export von Kunststoffprodukten

Die deutsche Chemieindustrie ist ein stark exportorientierter Sektor. Bei Kunststoffen liegt der Exportüberschuss bei etwa 15 Prozent. Hinzu kommt, dass viele kunststoffhaltige Produkte ins Ausland vertrieben werden und am Ende ihrer Lebensdauer nicht für das Recycling in Deutschland zur Verfügung stehen (Conversio 2020).

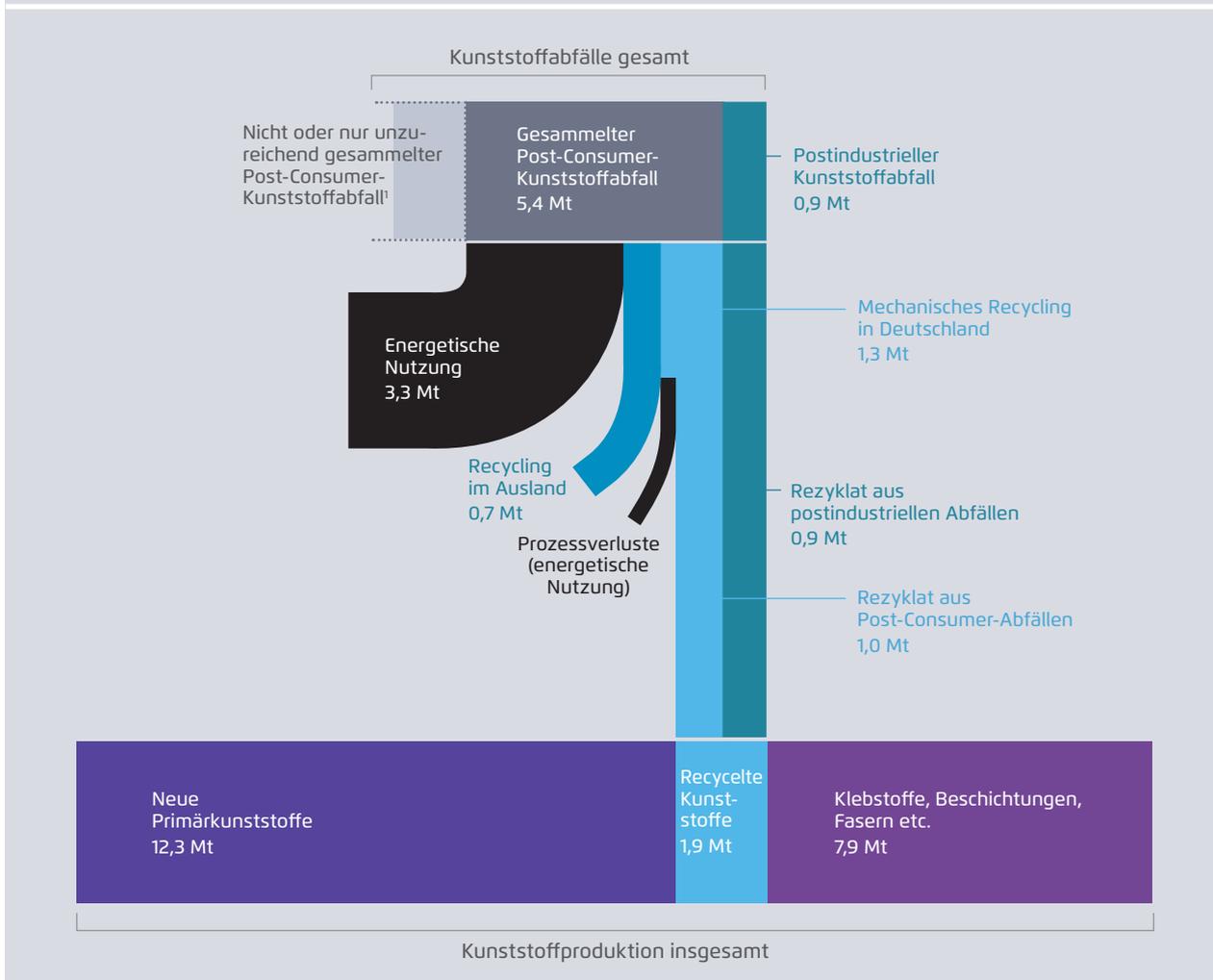
Wie in Abbildung 15 dargestellt, wurden im Jahr 2019 in Deutschland 5,4 Mt recycelbare Post-Consumer-Kunststoffabfälle gesammelt – 3,3 Mt (61 Prozent) wurden energetisch verwertet, 0,7 Mt zur Wiederverwertung ins Ausland exportiert und 1,3 Mt dem mechanischen Recycling zugeführt. Nach Prozessverlusten von 0,3 Mt wurde 1 Mt Rezyklat produziert. Zusätzlich zu den Post-Consumer-Abfällen fielen 0,9 Mt postindustrieller Abfälle an, die aufgrund der sehr guten Abfallreinheit zu fast 100 Prozent mit sehr geringen Verlusten stofflich verwertet wurden (Conversio 2020).

Durch die Verbesserung der Sammel- und Sortierinfrastruktur sowie die Einschränkung der Kunststoffverbrennung zur energetischen Nutzung kann die für das Recycling verfügbare Menge an Kunststoffabfällen erhöht werden. Doch aufgrund des hohen Exportanteils ist die Rolle von Kunststoffabfällen als Rohstoff für die chemische Industrie begrenzt. Vor allem chemische Recyclinganlagen benötigen sehr große Mengen an homogenen Kunststoffabfällen. Eine Möglichkeit, die Versorgung zu

²⁴ Das von Agora Industrie geschätzte Potenzial von 75 Prozent für die EU setzt sich aus 35 Prozent mechanischem Recycling und 40 Prozent chemischem Recycling zusammen (Agora Industrie 2022b).

Kunststoffabfälle und Kunststoffproduktion in Deutschland im Jahr 2019

Abbildung 15



Agora Industrie (2023) basierend auf Conversio (2020). ¹ Die Ergebnisse von Studien für die EU legen nahe, dass die tatsächliche Abfallmenge höher ist als die gesammelten Mengen (Material Economics 2022). Der tatsächliche Umfang im Fall von Deutschland muss noch weiter untersucht werden.

sichern, könnte der internationale Handel mit Kunststoffabfällen sein. Dieser ist derzeit streng reguliert, um die Entsorgung auf Deponien in Ländern mit niedrigeren Umweltstandards einzuschränken und inländisches Recycling zu stärken. Bei einer Reform des Rechtsrahmens für den Handel mit Abfällen muss sichergestellt werden, dass Exporte in Länder mit niedrigeren Recyclingzielen und -standards verhindert werden. Stattdessen bedarf es eines europäischen Ansatzes zur Anerkennung von Kunststoffabfällen als Ressource.

3.3 Ersatz fossiler durch erneuerbare Rohstoffe

Heutzutage ist die chemische Industrie für die Herstellung von kohlenstoffbasierten (organischen) Chemikalien und deren nachgelagerten Produkten, wie den meisten Polymeren und Kunststoffen, auf große Mengen an fossilen Rohstoffen angewiesen. Die meisten dieser fossilen Rohstoffe, in Deutschland etwa 166 TWh_{LHV}, sind Erdölderivate (z. B. Naphtha), die bei der Raffination von Rohöl gewonnen werden und in

der Regel in Cracker-Anlagen zu organischen Basischemikalien weiterverarbeitet werden – den Bausteinen der meisten chemischen Produkte.²⁵ Bezogen auf den Kohlenstoffgehalt entspricht dies etwa 11 Mt Kohlenstoff, die der deutsche Chemiesektor für die Produktion dieser organischen Basischemikalien benötigt. Die im vorherigen Abschnitt erläuterte Mobilisierung der Recyclingwirtschaft, wie auch die Einführung von weiteren Hebeln für die Kreislaufwirtschaft, senkt die Nachfrage nach Basischemikalien und ist daher entscheidend für die Reduzierung des Bedarfs an Kohlenstoffrohstoffen. Da ein vollständig geschlossener Kohlenstoffkreislauf jedoch nicht möglich ist (aufgrund von Endprodukten, die schwer zu recyceln sind, Recyclingverlusten und des Exports von Produkten), wird der chemische Sektor weiterhin neue Kohlenstoffquellen benötigen. Selbst wenn das Potenzial mechanischen und chemischen Recyclings vollständig mobilisiert wird, werden für das derzeitige

Produktionsniveau der Industrie immer noch etwa 9 Mt Kohlenstoff benötigt (vgl. Abbildung 16). Sowohl angesichts der erforderlichen Emissionsminderung wie auch der notwendigen Verringerung der Abhängigkeit von unsicheren fossilen Importen – die durch Russlands Krieg gegen die Ukraine verdeutlicht wurden –, müssen diese Rohstoffe aus erneuerbaren anstelle von fossilen Kohlenstoffquellen stammen.

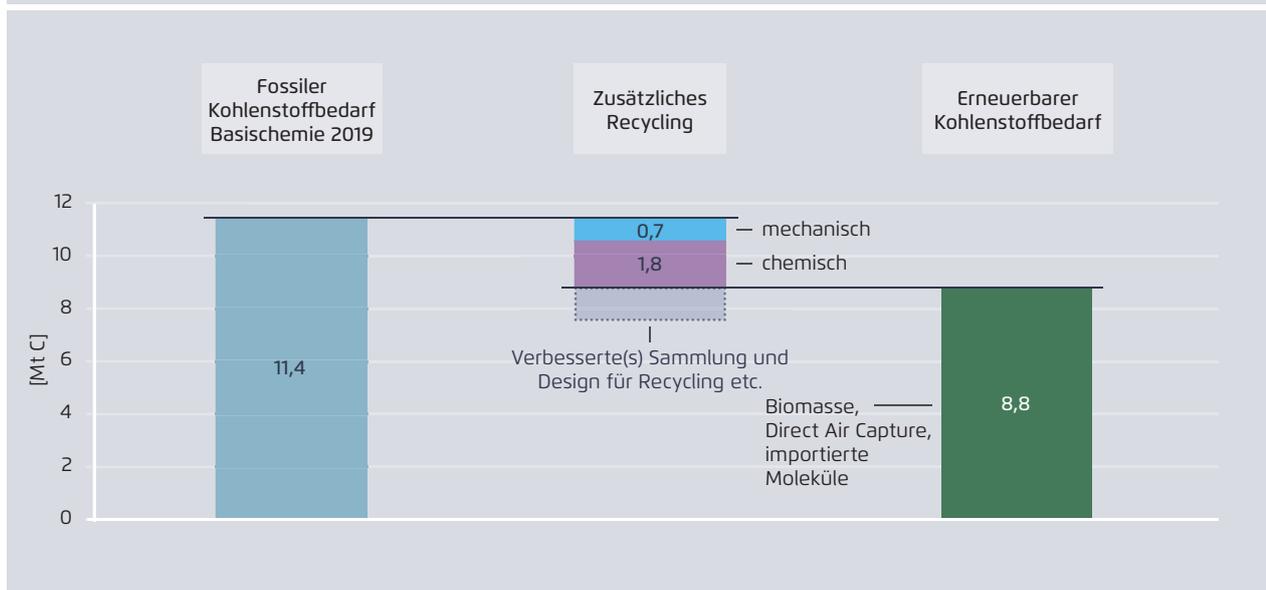
3.3.1 Erneuerbare Rohstoffquellen

Die möglichen zukünftigen Kohlenstoffquellen der chemischen Industrie lassen sich in zwei übergreifende Kategorien unterteilen: i) Aus der Luft oder aus industriellen Punktquellen **abgeschiedenes CO₂**. In Kombination mit erneuerbarem Wasserstoff können daraus Kohlenwasserstoffe produziert werden, die als chemische Ausgangsstoffe genutzt werden können. ii) In Biomasse gebundener **biogener Kohlenstoff**. Intelligente Prozesse haben das Potenzial, Biomasse energieeffizient zu chemischen Ausgangsstoffen und Endprodukten weiterzuverarbeiten.

25 Die organischen Basischemikalien umfassen Ethylen, Propylen, Methanol, Benzol, Toluol, Xylen (gemeinsam BTX) und C4-Chemikalien.

Bedarf an erneuerbarem Kohlenstoff der chemischen Industrie in Deutschland

Abbildung 16



Agora Industrie und Carbon Minds (2023). Geschätztes Recyclingpotenzial basierend auf einer maximalen „Post Consumer Waste to Product“-Recyclingrate von 35% für mechanisches Recycling und 40% für chemisches Recycling gemäß Agora Industrie (2022b).

Direct Air Carbon Capture and Utilisation (DACCU)-Verfahren scheiden CO₂ aus der Atmosphäre ab und stellen eine erneuerbare Kohlenstoffquelle dar. In Kombination mit erneuerbarem Wasserstoff können daraus Basischemikalien hergestellt werden (z. B. über das Methanol-zu-Olefin-Verfahren). Allerdings sind sowohl die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre als auch die Herstellung von Wasserstoff sehr energieintensive Prozesse. Die Umstellung fossiler auf erneuerbare Rohstoffe über das DACCU-Verfahren würde zu einer erheblichen zusätzlichen Nachfrage nach Wasserstoff und Strom aus erneuerbaren Quellen führen. Strom aus Erneuerbaren Energien wird auf absehbare Zeit eine knappe Ressource sein und sollte vorrangig für die effizientesten Anwendungen genutzt werden, die den größten CO₂-Minderungs- und wirtschaftlichen Mehrwert bringen, wie beispielsweise die Elektrifizierung der Wärmeversorgung von Industrie und Haushalten durch Power-to-Heat-Technologien wie Wärmepumpen und die Transformation des Mobilitätssektors. Der große Energiebedarf und die damit verbundenen hohen Kosten der DACCU-Verfahren beschränken ihren Einsatz auf Standorte mit kostengünstigem, im Überfluss verfügbarem Strom aus Erneuerbaren Energiequellen, was ihr Potenzial als umfassende Lösung für den Chemie-sektor in Deutschland infrage stellt.

Die Abscheidung und Nutzung von CO₂ aus industriellen Punktquellen (Point Source Carbon Capture and Utilisation, PSCCU) ist eine zweite mögliche Kohlenstoffquelle für die chemische Industrie. Industrielle Abgase haben gewöhnlich eine höhere CO₂-Konzentration, sodass der Abscheideprozess im Vergleich zum DAC-Verfahren weniger energieintensiv ist. Insbesondere große industrielle Emittenten wie Stahl- und Zementwerke sind Kandidaten für PSCCU. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass auch die Emissionen dieser CO₂-intensiven Industrien in Zukunft stark zurückgehen werden, da auch diese Branchen ihre Prozesse zur Klimaneutralität umstellen. Die Nutzung fossiler Rohstoffe verursacht unvermeidbare Restemissionen. Neben den Leckagen bei der potenziellen Abscheidung direkter Emissionen

(CO₂-Abscheideraten verbleiben auch in Zukunft unter 100 Prozent) kommt es schon bei der Gewinnung fossiler Rohstoffe zu flüchtigen Treibhausgasemissionen (vgl. Abbildung 7). Die Nutzung fossiler CO₂-Punktquellen birgt jedoch das Risiko, den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Ressourcen zu verzögern. Spätestens am Ende ihres Lebenszyklus verursachen Chemikalien, die auf fossilem Kohlenstoff basieren, CO₂-Emissionen, da die Recyclingraten auch im besten Fall deutlich unter 100 Prozent liegen. Im Kontext der Revision der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (2018/2001/EG) und des im Februar 2023 veröffentlichten Delegierten Rechtsaktes (C/2023/1086) ist davon auszugehen, dass genutztes fossiles CO₂ aus industriellen Punktquellen ab 2040 nicht mehr als vermieden gilt. Wie bei den DACCU-Verfahren werden auch bei den PSCCU-Verfahren große Mengen an erneuerbarem Wasserstoff und Strom benötigt. PSCCU kann daher, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, als ergänzende Technologie (insbesondere für das Recycling von biogenem Kohlenstoff) betrachtet werden, die jedoch dem mechanischen und dem chemischen Recycling sowie energieeffizienteren Kohlenstoffquellen nachsteht.

Die Nutzung von Biomasse als Kohlenstoffquelle kann eine entscheidende Rolle auf dem Weg zu einer klimaneutralen Chemikalienproduktion spielen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie Biomasse von der chemischen Industrie für die Herstellung biobasierter Chemikalien genutzt werden kann (vgl. Kapitel 3.3.2). Je nach Art der Biomasse und der verwendeten Verarbeitungstechnik kann dies weitaus energieeffizienter sein als die Herstellung von Chemikalien auf Basis von CO₂, das mittels DAC- oder PSC-Verfahren abgeschieden wurde. Biomasse ist eine potenziell erneuerbare, CO₂-arme Quelle für biogenen Kohlenstoff.²⁶ Zur Gewährleistung der Umweltverträglich-

26 Der CO₂-Fußabdruck von Biomasse hängt von den Treibhausgasemissionen entlang der Wertschöpfungskette der Biomasseproduktion sowie von den Opportunitätskosten und den Auswirkungen indirekter Landnutzungsänderungen ab.

keit sind strenge Nachhaltigkeitskriterien anzulegen. Dazu gehört auch, dass die Produktion der Biomasse der Biodiversität zugutekommt und zu nachhaltigen Landnutzungsformen beiträgt (vgl. Kapitel 3.3.3). In dieser Hinsicht spielt die Herkunft der Biomasse eine wichtige Rolle – zum Beispiel ob es sich hier um Abfälle und Rückstände aus dem Landwirtschafts- und Holzverarbeitungssektor, um Biomüll aus Haushalten und der Industrie oder um Primärbiomasse aus der Land- und Forstwirtschaft handelt.

Die Verwendung von biogenem und atmosphärischem Kohlenstoff hat das Potenzial, entlang der chemischen Wertschöpfungskette CO₂-Senken zu generieren. Es besteht ein wissenschaftlicher Konsens, dass dauerhafte **CO₂-Senken** erforderlich sind, um die Klimaschutzziele des Pariser Abkommens zu erreichen (IPCC 2022), und die Europäische Kommission bereitet bereits die Grundlagen für eine ordnungsgemäße Erfassung von CO₂-Senken vor (Europäische Kommission 2022).

Die Nutzung von biogenem oder atmosphärischem Kohlenstoff in einer material- und energieeffizienten Kreislaufwirtschaft ermöglicht einen CO₂-Senken-effekt. Biogener Kohlenstoff, der in Materialien und Produkten gespeichert ist, stellt dabei eine temporäre CO₂-Senke dar. Dieser klimapositive Effekt kann durch die umfassende Mobilisierung der Kreislaufwirtschaft maximiert werden – durch Anreize für längere Nutzungsdauern, die Förderung von Wiederverwendung, die Verbesserung des Produktdesigns zugunsten der Recyclingfähigkeit sowie die Weiterentwicklung mechanischer und chemischer Recyclingtechnologien. Die Abscheidung von CO₂ bei Müllverbrennungsanlagen zur Verwertung von nicht recycelbaren biobasierten Produkten und Chemikalien trägt dazu bei, den Kohlenstoffkreislauf zu schließen. Dabei können unvermeidbare End-of-Life-Emissionen entweder geologisch gespeichert (CCS) oder mit Wasserstoff kombiniert (CCU) werden, um erneuerbaren Kohlenstoff wieder in die Wertschöpfungskette rückzuführen. Ein effizienter Kohlenstoffkreislauf auf biogener Basis erfordert die enge Zusammenarbeit entlang der

gesamten Wertschöpfungskette und den Einbezug der Erzeuger von Biomasse, der chemischen Industrie, der Hersteller von Endprodukten sowie von Abfall- und Recyclingbetrieben.

Die Zertifizierung und Monetarisierung von CO₂-Senken innerhalb eines angemessenen Kontrollrahmens könnte auch eine zusätzliche Einnahmequelle darstellen, um finanzielle Anreize für mehr Kreislaufwirtschaft und die Anwendung von CCS bei der Verbrennung am Ende des Lebenszyklus zu schaffen. Der Betrieb von CCS-Technologien ist jedoch mit neuen Infrastrukturanforderungen verbunden, und es sind nur begrenzt nutzbare Speicherstätten vorhanden. Daher sollte diese Methode nur für Restemissionen verwendet werden, die nicht auf andere Weise vermieden oder, im Fall von biogenen Emissionen, verwertet werden können. Das volle Potenzial zur Schaffung von CO₂-Senken muss durch eine umfassende Lebenszyklusanalyse der gesamten Wertschöpfungskette bestimmt werden, die auch die CO₂-Bilanz der Biomasse-Inputs, der Produktions-, Nutzungs- und Recyclingphasen sowie der End-of-Life-Behandlung einbezieht.

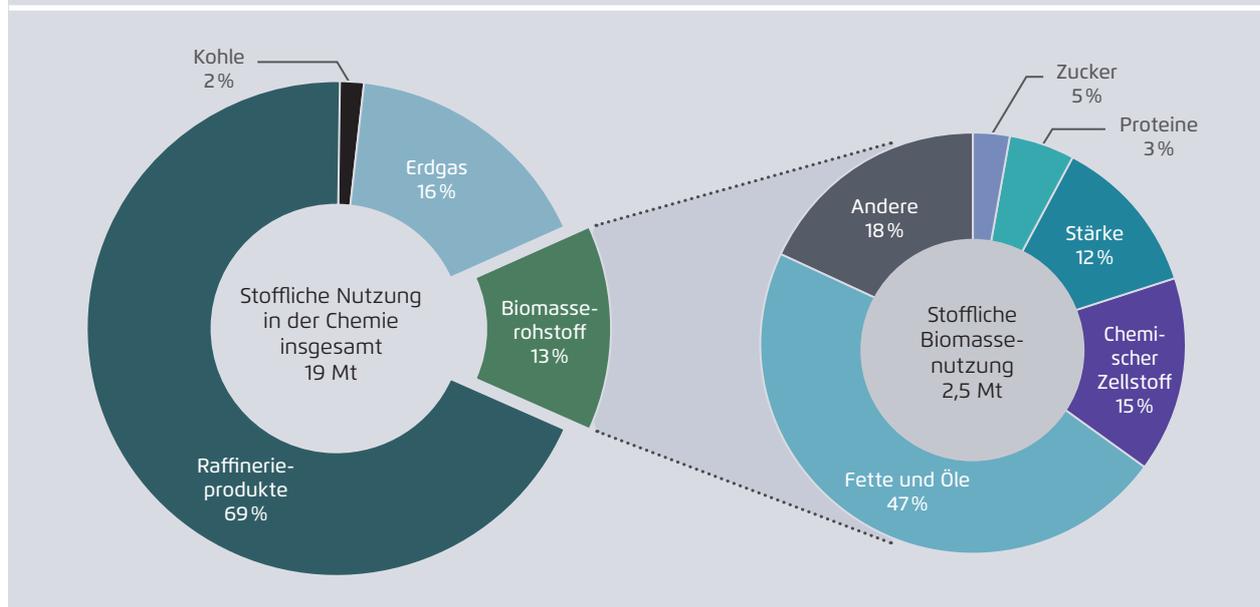
3.3.2 Pfade zu biobasierten Chemikalien

Biomasse ist ein wichtiger Rohstoff, der in der chemischen Industrie als Ersatz von fossilen Rohstoffen verwendet werden kann. Aktuell macht Biomasse mit etwa 13 Prozent (2,6 Mt) nur einen kleinen Teil des gesamten Rohstoffinputs der chemischen Industrie aus und wird hauptsächlich direkt für die Produktion von Spezialchemikalien wie Wasch-, Reinigungs- und Schmiermitteln verwendet (VCI 2021a). Fette und Öle, unter anderem aus Palmöl, Rapsöl und Sonnenblumenöl, machen den größten Anteil der Rohstoffe aus Biomasse aus.²⁷ Weitere wichtige biobasierte

²⁷ Die Nutzung von Speiseölpflanzen kann negative Effekte zur Folge haben, unter anderem aufgrund der direkten und indirekten Landnutzungsänderung (LUC und ILUC). Die Gesetzgebung auf europäischer und nationaler Ebene, einschließlich der überarbeiteten Erneuerbare-Energien-Richtlinie, zielt darauf ab, die Verwendung von Biokraftstoffen mit hohem ILUC-Risiko zu begrenzen.

Biomasse als Rohstoff für die Chemie in Deutschland 2019

Abbildung 17



Agora Industrie und Carbon Minds (2023) basierend auf VCI (2021a) und FNR (2020)

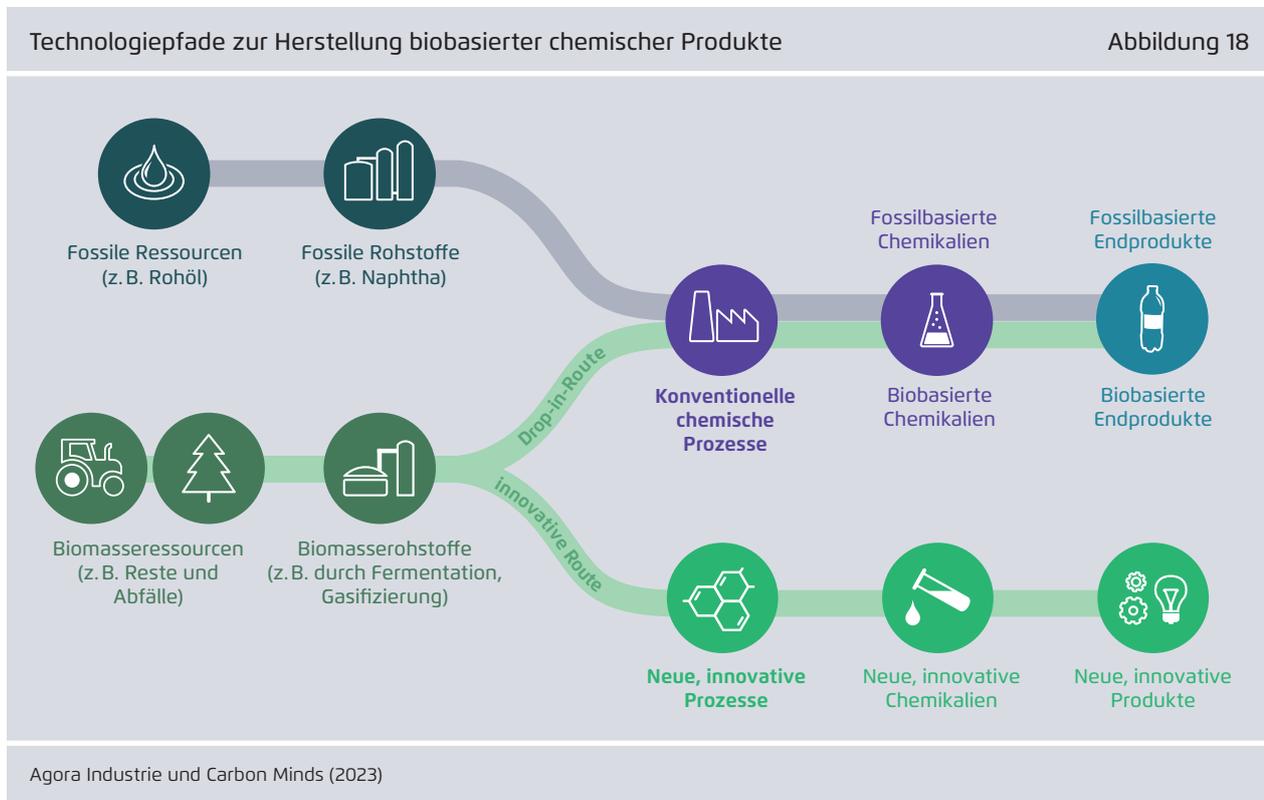
Rohstoffquellen sind chemische Zellstoffe, Stärken und Zucker (FNR 2020).

Trotz der gegenwärtig geringen industriellen Nutzung besteht großes Potenzial, die stoffliche Nutzung von Biomasse in der chemischen Industrie zu steigern und die chemische Wertschöpfungskette in eine zirkuläre Bioökonomie zu integrieren. Die große Vielfalt verfügbarer Arten von Biomasse sowie unterschiedlicher Chemikalien lässt zwei grundsätzliche Ansätze zur stofflichen Nutzung zu (siehe Abbildung 18):

Drop-in-Biochemikalien: Hier ist die biobasierte Chemikalie chemisch identisch mit einer bestehenden fossilbasierten Chemikalie und kann diese direkt innerhalb der bestehenden Produktionskette ersetzen. Diese Drop-in-Technik nutzt bestehende Prozesswege und Infrastrukturen, erfordert keine wesentlichen Prozessänderungen und produziert für einen bestehenden Markt. Zur biobasierten Herstellung von Basischemikalien stehen bereits heute Technologien im industriellen Maßstab bereit

(JRC 2019). Ein Beispiel für Drop-in-Chemikalien ist biobasiertes Ethylen zum Ersatz von fossilbasiertem Ethylen bei der Herstellung von Polymeren wie PE und PET. Die Herstellung identischer Ersatzstoffe für bestehende Petrochemikalien ist jedoch nicht die effizienteste Art, Biomasse zu nutzen, weder in Bezug auf die Energieeffizienz noch auf die Nutzung der natürlichen Molekularstruktur der Biomasse. Durch weitere Forschung und Entwicklung könnten neue, schnellere und effizientere Wege zur Herstellung von Drop-in-Chemikalien gefunden werden. Dies ist beispielsweise bei der Herstellung von aromatischem Anilin gelungen, einem wichtigen Zwischenprodukt bei der Erzeugung von Polyurethanen (PUR), die als Schaumstoffe in Produkten wie Matratzen verwendet werden. Anilin wird dabei durch die Zucker-Fermentation statt über erdölbasiertes Benzol hergestellt (Winter, Meys und Bardow 2021).

Innovative biochemische Alternativen: Biomasse kann auch zur Synthese neuartiger biobasierter Chemikalien und Materialien verwendet werden, die



kein identisches fossilbasiertes Äquivalent haben, aber ähnliche oder bessere Funktionsmerkmale oder Eigenschaften aufweisen oder in ihren Endverwendungen effizienter sind. Diese Chemikalien basieren in der Regel auf neuen, beispielsweise biochemischen Produktionsverfahren und können die bestehenden Infrastrukturen und Märkte nicht zwangsläufig nutzen. Da sie jedoch auf Biomasse statt auf fossile Rohstoffe zugeschnitten sind, können diese innovativen Produktionsverfahren Biomasse oft viel effizienter nutzen und manchmal Produkte mit besseren Eigenschaften hervorbringen. Neue, innovative Biochemikalien können unter anderem die Herstellung neuer Arten von biobasierten Kunststoffen, Zellulosefasern und biobasierten Schmierstoffen ermöglichen. Die zum Beispiel durch mikrobielle Fermentation von Zuckern hergestellte polymere Polymilchsäure (PLA) ist kompostierbar und kann Lebensmittelverpackungen auf fossiler Basis ersetzen. Derzeit sind biobasierte Kunststoffe teurer als fossile Alternativen (Meereboer 2020). Weitere

Forschung ist erforderlich, um innovative biobasierte Chemikalien in die Praxis zu bringen und industriell nutzbar zu machen. So stellt beispielsweise der Mangel an geeigneten großvolumigen und hochwertigen Anwendungen für Lignin derzeit einen Engpass für die umfassende, effiziente Nutzung von Biomasse dar. Die Mobilisierung des Potenzials von Lignin als neuer chemischer Rohstoff für die Herstellung von beispielsweise aromatischen Chemikalien mithilfe neuer Umwandlungsprozesse stellt eine große Chance dar.

Biobasierte Drop-in-Chemikalien und innovative biochemische Alternativen können den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Rohstoffe auf unterschiedliche Weise unterstützen:

Drop-in-Biochemikalien nutzen die bestehende Infrastruktur und profitieren von kommerziellen Technologien im industriellen Maßstab. Auch wenn dadurch Biomasse weniger effizient genutzt wird,

Bioraffinerien: Technologieoptionen zur Verarbeitung von Biomasse

Je nach Art und Eigenschaften der verfügbaren Biomasse können in Bioraffinerien unterschiedliche Umwandlungstechnologien eingesetzt werden. Diese Technologien werden typischerweise in biochemische Prozesse (z. B. Fermentation und anaerobe Gärung) und thermochemische Prozesse (z. B. Pyrolyse und Vergasung) unterteilt (Rathore und Singh 2021).

Biochemische Prozesse wie die Fermentation von Zuckern und Stärken und die anaerobe Gärung von Abfällen und Reststoffen sind etablierte Verfahren zur Umwandlung von Biomasse in Chemikalien und Brennstoffe wie Bioethanol und Biogas. Bei Holz, Forstabfällen und landwirtschaftlichen Reststoffen sind Flächennutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion verhältnismäßig gering. Holz, Forstabfälle und landwirtschaftliche Reststoffe sind zudem in relevanten Mengen verfügbar, bestehen aber aus lignozellulosehaltigen Strukturen, deren direkte Verarbeitung schwierig ist. Biomasse aus Lignozellulose muss zunächst vorbehandelt und in ihre Hauptbestandteile (Zellulose, Hemizellulose und Lignin) zerlegt werden, bevor die aus Zellulose und Hemizellulose gewonnenen Zucker zu einer Vielzahl von Chemikalien fermentiert werden können (IEA 2020). Bei der Fraktionierung von lignozellulosehaltiger Biomasse fallen große Mengen an Lignin an, die größtenteils als Abfallprodukt behandelt oder zur Energiegewinnung genutzt werden. Wenn jedoch neue wertschöpfende Verfahren, die zurzeit erforscht und entwickelt werden, erfolgreich sind und auf den Markt kommen, könnte Lignin eine wichtige Rolle als chemischer Rohstoff spielen. Fermentationsprozesse können eine Schlüsselrolle bei der Bereitstellung von Drop-in-Biochemikalien für bestehende Produktionswege spielen. Beispielsweise können die in Biomasse enthaltenen Zucker zu Ethanol fermentiert werden, das dann leicht zu Bioethylen verarbeitet werden kann, welches mit fossilem Ethylen identisch ist. Die Fermentation kann auch zur Herstellung alternativer Biochemikalien verwendet werden, zum Beispiel durch die Nutzung spezifischer Bakterien zur Fermentierung von in Hemizellulose enthaltenen Zuckern zur Herstellung von Milchsäure, dem Baustein von Polylactid (PLA), einem der derzeit am meisten produzierten Biopolymere.

Thermochemische Prozesse können die in Biomasse enthaltenen Lignozellulose-Strukturen unter hoher Temperatur und hohem Druck in ihre Grundbausteine aufspalten, um biobasierte chemische Ausgangsstoffe zu produzieren. Während der Pyrolyse, die bei hohen Temperaturen (500 Grad Celsius) und ohne Zufuhr von Sauerstoff durchgeführt wird, zerfällt die Biomasse in ein Öl (Pyrolyseöl, auch als Bioöl bezeichnet), feste Biokohle und Synthesegas. Wie Pyrolyseöl aus Kunststoffabfällen kann biobasiertes Pyrolyseöl in bestehenden konventionellen Steamcrackern – oder in zukünftigen elektrischen Steamcrackern – für die Herstellung von Basischemikalien verwendet werden. Bei der Gasifizierung werden organische Materialien in Synthesegas (ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff) umgewandelt, indem sie bei hohen Temperaturen (> 700 Grad Celsius) erhitzt werden. Biobasiertes Synthesegas kann zur Produktion von biochemischen Rohstoffen wie Ethanol, Methanol oder sogar Naphtha verwendet werden, die dann zu wichtigen chemischen Bausteinen wie Olefinen und Aromaten (Benzol, Toluol und Xylol) weiterverarbeitet werden können, zum Beispiel durch Methanol-Umwandlung („Methanol to Olefins“ (MtO) und „Methanol to Aromatics“ (MtA)). Bereits heute wird global ein Großteil des Methanols über die Gasifizierung von fossilen Rohstoffen wie Kohle hergestellt und zur Herstellung von Olefinen durch MtO genutzt.

Es besteht großes Potenzial für die Entwicklung und den Markthochlauf von Bioraffinerie-Technologien, die verfügbare Rohstoffe und Umwandlungsprozesse effizient miteinander kombinieren. Zum Beispiel liefern sowohl die Fermentation von Zucker zur Herstellung von Bioethanol als auch die Gasifizierung von Biomasse zur Erzeugung von Synthesegas biogenes CO₂ als Nebenprodukt. Produktionsprozesse, die dieses biogene CO₂ mit erneuerbarem Wasserstoff kombinieren, um zusätzliche chemische Rohstoffe wie Methanol herzustellen, können die Effizienz des gesamten Biomasseverwertungsprozesses erhöhen. Die Nutzung von CO₂ aus biogenen Nebenprodukten kann im Vergleich zur Herstellung von chemischen Rohstoffen auf Basis von atmosphärischem CO₂ (DACCU) signifikante Mengen an Energie einsparen und gleichzeitig Synergien zwischen dem Chemie- und dem Energiesektor schaffen: In Kombination mit erneuerbarem Wasserstoff erhöht dieser Weg die Flexibilität des Stromsystems bei gleichzeitiger effizienter Versorgung der chemischen Industrie mit erneuerbaren Rohstoffen.

können sie kurz- und mittelfristig eine wichtige Rolle bei der Reduzierung des fossilen Rohstoffbedarfs spielen. Gleichzeitig ist es zwingend erforderlich, die Entwicklung alternativer biochemischer Verfahren zur effizienten Nutzung von Biomasse voranzutreiben.

Um die Produktion biobasierter Chemikalien ausweiten zu können, muss der Zugang zur benötigten Infrastruktur und Logistik sichergestellt werden. Kleinere Bioraffinerien könnten auf der logistischen Infrastruktur der Papier- und Zellstoffindustrie aufbauen und das Bindeglied zu großen Standorten der Chemiebranche bilden. Bereits heute existieren innovative Bioraffinerie-Konzepte, die auf der regionalen Forstwirtschaft als Rohstoffquelle basieren. Dabei werden zum Beispiel biobasiertes Monoethylglykol (eine Drop-in-Chemikalie, die bei der Herstellung von PET-Flaschen verwendet wird) und biobasierte funktionelle Füllstoffe produziert (eine innovative biobasierte Alternative zu Ruß, der bei der Herstellung von Gummi und Dichtungen verwendet wird).

3.3.3 Nachhaltige Mobilisierung und Nutzung von Biomasse

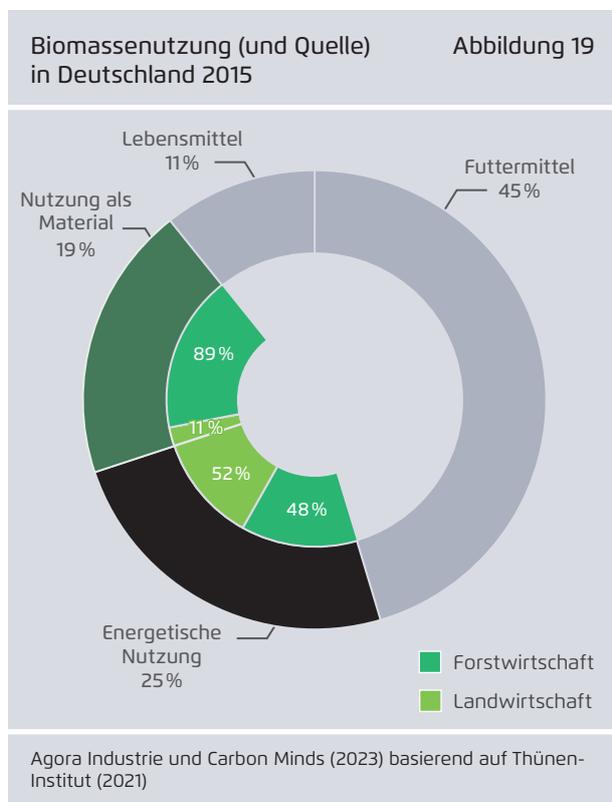
Biomasse gilt als erneuerbare Ressource, ist jedoch nur begrenzt verfügbar und wird in Zukunft einem zunehmenden Nachfragewettbewerb ausgesetzt sein. Der Wettbewerb um die Landflächen muss minimiert

werden, denn dadurch entsteht die Gefahr von negativen Umweltfolgen durch direkte und indirekte Landnutzungsänderungen (LUC und ILUC) sowie einer Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion. Darüber hinaus muss die Land- und Forstwirtschaft an neue klimatische Bedingungen angepasst werden, um die biologische Vielfalt, natürliche Kohlenstoffsinken und die langfristige Produktivität der Wälder zu sichern. Die Verwendung von Biomasse als erneuerbarem Rohstoff für die chemische Industrie erfordert, dass derzeitige Nutzungsmuster durch eine umfassende zirkuläre Bioökonomie ersetzt werden.

In Deutschland ist neben der Futter- und Lebensmittelproduktion die Bioenergie ein weiterer großer Endverbraucher von Biomasse. Wie in Abbildung 19 dargestellt, wird ein Viertel der Biomasse zur Produktion von Bioenergie genutzt (48 Mt)²⁸ und kommt in etwa zu gleichen Teilen aus der Land- und Forstwirtschaft. Die Nutzung von Biomasse als Material (38 Mt) basiert dagegen zu 89 Prozent auf forstwirtschaftlicher Biomasse (Thünen Institut 2021).

Biomasse spielt derzeit in verschiedenen Formen und Funktionen eine wichtige Rolle im deutschen Ener-

²⁸ Die jüngsten umfassenden Daten zur Produktion und Nutzung von Biomasse in Deutschland stammen aus dem Jahr 2015 (Thünen-Institut 2021).

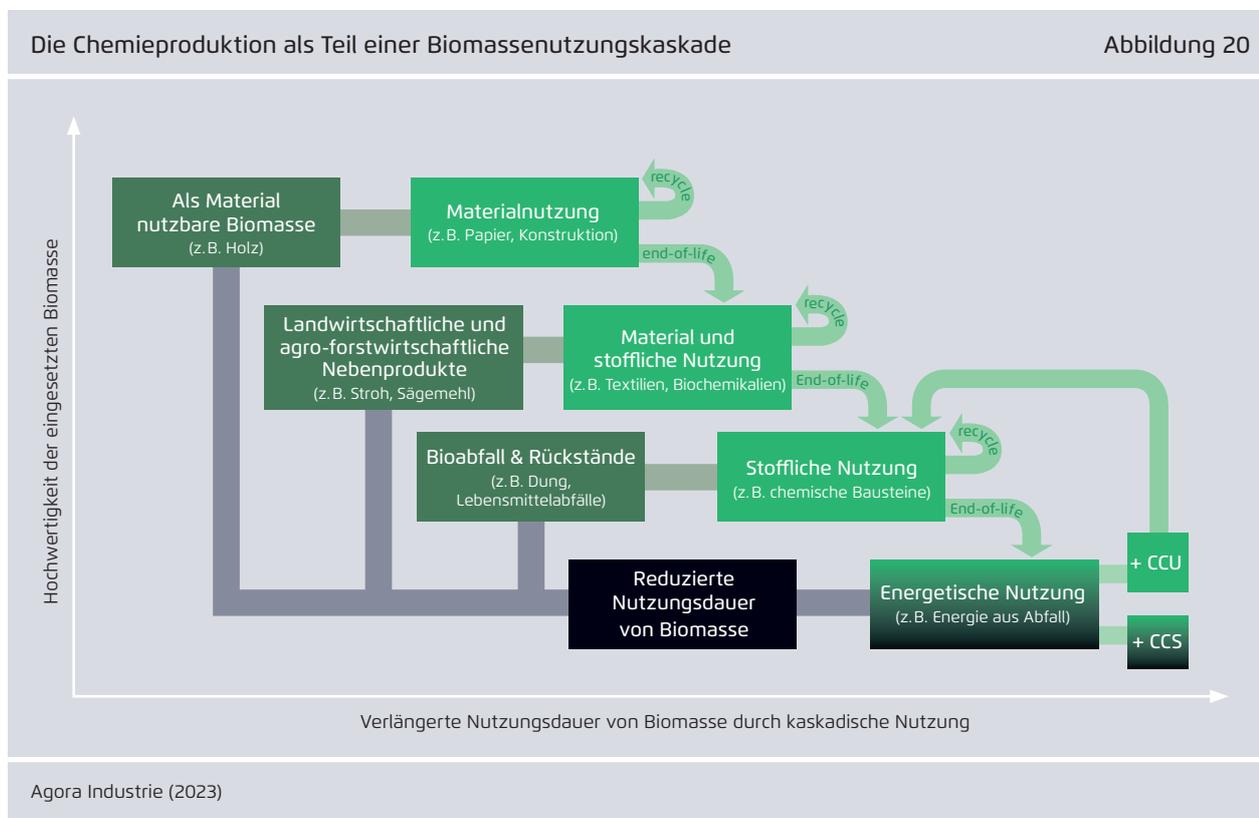


giesystem – als fester Brennstoff, flüssiger Biokraftstoff oder Biogas, zur Wärme- und Stromerzeugung und als Kraftstoff im Verkehr. Ihre Hauptverwendung ist die Wärmeerzeugung (171 TWh im Jahr 2021), größtenteils aus Holz und Holzabfällen (BMEL 2022). Für die Produktion von Strom (50 TWh im Jahr 2021) und Biokraftstoff (34 TWh) ist die wichtigste Quelle Biogas aus Energiepflanzen (z. B. Mais-Silage) (BMEL 2022). Die energetische Nutzung von Biomasse wurde in der Vergangenheit durch die europäische Klima- und Energiepolitik und ihre jeweiligen nationalen Umsetzungsstrategien unterstützt (Biomasse gilt im Rahmen des EU-ETS als CO₂-neutral, und Bioenergie wird für die Ziele für Erneuerbare Energien im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie mit angerechnet).

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und der wachsend konkurrierenden Nachfrage nach Biomasse wird es notwendig sein, effizienten Biomasseanwendungen den Vorrang zu geben.

Vorrang für eine effiziente Kaskadennutzung von Biomasse

Während gesellschaftlich nach alternativen Rohstoffen für ihre heute noch fossilbasierte Wirtschaft gesucht wird, gewinnt die Bioökonomie an Bedeutung. Dabei muss die erneuerbare, aber begrenzte Ressource Biomasse so effizient wie möglich eingesetzt werden. Anders gesagt: **Die Nutzung von Biomasse muss vorrangig in den Bereichen erfolgen, in denen es keine alternativen oder effizienteren Möglichkeiten zur Dekarbonisierung gibt.** Insbesondere sollten die Anwendungen bevorzugt werden, bei denen der biogene Kohlenstoff in ein Kreislaufsystem integriert werden kann, und in denen eine Wiederverwendung über viele Nutzungszyklen hinweg möglich ist. Indem biogener Kohlenstoff, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, so lange wie möglich in Produkten gebunden und im Kreis geführt wird, verlängert sich auch die Kohlenstoffnutzung. Wird Biomasse direkt als Energiequelle verwendet, so wird sie aus dem Kreislauf entfernt und steht für die Nutzung als vielseitiges Material und Quelle für biogenen Kohlenstoff nicht mehr zur Verfügung. Die Maximierung einer effizienten zirkulären Nutzung von Biomasse wird durch die **Nutzungskaskade** (vgl. Abbildung 20) abgebildet. Diese zielt auf die Mehrfachnutzung von Biomasse als Material und/oder Rohstoff ab und fördert die Wiederverwendung und das Recycling von Materialien und Molekülen. Nach mehreren kaskadischen Wiederverwendungszyklen können die Abfallprodukte am Ende ihrer recycelbaren Lebensdauer zur energetischen Nutzung verbrannt werden. Der Umstieg der chemischen Industrie auf erneuerbaren und insbesondere biogenen Kohlenstoff führt auch in zukünftigen Abfallströmen zu höheren erneuerbaren oder biogenen Anteilen. Der Einsatz von Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung in Anlagen zur Abfallverwertung kann den in Produkten enthaltenen erneuerbaren oder biogenen Kohlenstoff in eine dauerhafte CO₂-Senke überführen (Bioenergy and Carbon Capture and Storage; BECCS) oder durch Kombina-



tion mit der Verbrennung mit CCU zurückgewonnen und in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 3.2).

Neben den Vorteilen in Bezug auf Ressourceneffizienz und Emissionsminderung kann die Kaskadennutzung von Biomasse auch die Wertschöpfung erhöhen und insbesondere in ländlichen Regionen neue lokale Arbeitsplätze schaffen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Priorisierung und Maximierung der kaskadischen Nutzung von Biomasse die energetische Nutzung von Biomasse nicht vollständig ausschließt. Vielmehr wird sichergestellt, dass die Nutzungseffizienz von Biomasse über mehrere Lebenszyklen hinweg erhöht wird, anstatt dass auf nur eine einzige, direkte energetische Nutzung von hochwertiger Biomasse gesetzt wird.

Zwar ist die kaskadische Nutzung von hölzerner Biomasse in der heutigen Forst- und Holzwirtschaft bereits bis zu einem gewissen Grad etabliert, doch

können durch die Einbeziehung des Chemiesektors nachhaltige Kaskadennutzungen auf ein breiteres Spektrum von Biomasse ausgeweitet werden. Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, befinden sich Technologien zur effizienteren Nutzung von Biomasse in der Entwicklung – beispielsweise Verfahren zur effizienteren Nutzung der Ligninfraktion oder mikrobielle und enzymatische Prozesse zur Verwertung von Biomasse-Abfallströmen. Die chemische Wertschöpfungskette ist besonders gut geeignet, um die kaskadische Nutzung von Biomasse auszuweiten und den Wert verschiedener Biomasserohstoffe zu steigern.

Potenziale von Reststoff- und Abfallbiomasse

Biomasse aus Reststoffen und Abfallströmen steht nicht in direktem Wettbewerb mit der Lebensmittelproduktion und verursacht keine neuen und zusätzlichen Belastungen für die Umwelt und das Ökosystem. Damit stellt sie eine mögliche No-Regret-Option für die rohstoffliche Verwendung in der Bioökonomie

und der chemischen Industrie dar. Dazu gehören forstwirtschaftliche Reststoffe, landwirtschaftliche Nebenprodukte und Rückstände, industrielle Abfallstoffe und Siedlungsabfälle.

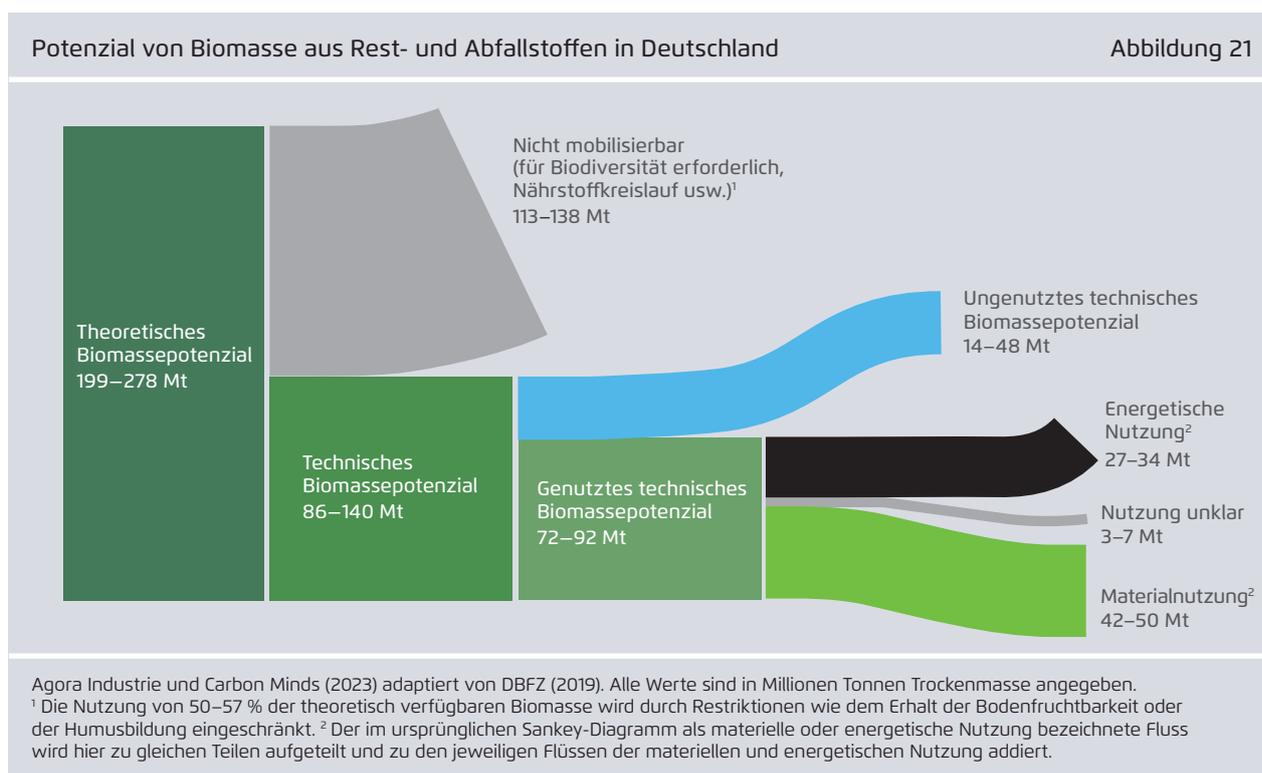
Zur Erfüllung wichtiger Umweltfunktionen wie beispielsweise der Humusbildung, dem Erhalt der Bodenqualität und der Förderung der Biodiversität muss ein großer Teil dieser Rest- und Abfallbiomasse in der Umwelt verbleiben. Das technische Nutzungspotenzial reduziert sich dadurch auf in etwa die Hälfte des theoretischen Biomassepotenzials. Vor diesem Hintergrund wird das technische Potenzial an verwertbaren biogenen Abfällen und Reststoffen in Deutschland auf 86 bis 140 Mt Trockenmasse (Mt_{TM}) geschätzt.²⁹ Der überwiegende Teil dieses Potenzials

(bis zu 84 Prozent) sind Rest- und Abfallstoffe aus der Forst- und Landwirtschaft (DBFZ 2019). Etwa 70 Prozent dieses technischen Potenzials werden bereits materiell, stofflich oder energetisch genutzt. Damit verbleiben etwa 14–48 Mt_{TM} an Abfällen und Restbiomasse, die ungenutzt sind und noch mobilisiert werden könnten (vgl. Abbildung 21). Diese setzen sich hauptsächlich aus Getreidestroh, Viehdung und Gülle sowie aus forstwirtschaftlichen Reststoffen zusammen.

Das ungenutzte Potenzial an Reststoff- und Abfallbiomasse von 14–48 Mt_{TM} entspricht bei einem Technologiemix aus Gasifizierung und Pyrolyse sowie der Methanol-Umwandlung zu Basischemikalien in etwa 2,5–8,6 Mt erneuerbarem Kohlenstoff.³⁰

29 Das Potenzial der Reststoff- und Abfallbiomasse bezieht sich auf das jüngste gemeinsame Referenzjahr 2015. Die große Spanne ist auf unterschiedliche Annahmen und Berechnungsmethoden zurückzuführen, z. B. zu Trockenmasseanteilen, tierartspezifischem Dung oder unterschiedlichen Verwertungs- und Abfuhraten.

30 Unter Annahme eines Kohlenstoffgehaltes der Biomasse von 50 Massenprozent (Trockenmasse) und eines durchschnittlichen Konversionsfaktors (Kohlenstoffwirkungsgrad) von Biomasse zu Olefinen durch Gasifizierung und MtO von 36 Prozent.



Das sind zwischen 25 und 80 Prozent des Kohlenstoffbedarfs von 11 Mt, den die deutsche chemische Industrie im Jahr 2019 für die Produktion der zehn Basischemikalien benötigte (vgl. Abbildung 22).

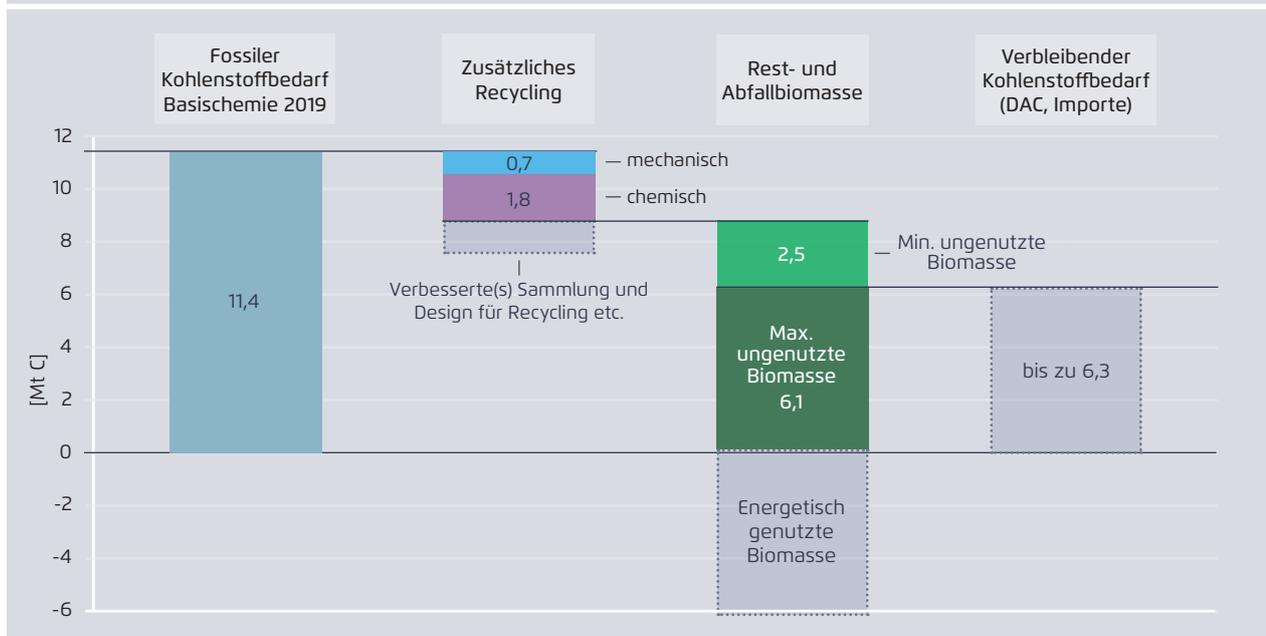
Darüber hinaus werden derzeit weitere 27-34 Mt_{TM} an Reststoff- und Abfallbiomasse energetisch genutzt. Einige dieser biogenen Reststoffe könnten entsprechend dem Ansatz der Kaskadennutzung in Zukunft einer materiellen und rohstofflichen Nutzung zugeführt werden. Dabei ist zu vermeiden, dass die Umleitung von Biomasseströmen aus der energetischen Nutzung zu einem erhöhten Einsatz fossiler Brennstoffe führt, insbesondere in größeren industriellen Verbrennungsanlagen. Es ist unbedingt erforderlich, dass bei der Umnutzung Substitutionseffekte berücksichtigt werden und dass sie parallel zum Ausbau Erneuerbarer Energien und der Elektrifizierung von Wärme, z. B. über Wärmepumpen, erfolgt (vgl. Agora Industrie und FutureCamp 2022).

Aus den Schätzungen der biogenen Reststoff- und Abfallbiomasse lässt sich ableiten, dass durch die Mobilisierung von derzeit ungenutzten Potenzialen und die Umnutzung von energetisch genutzter Biomasse auf eine höherwertige stoffliche Nutzung ein großer Teil der fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Quellen ersetzt werden könnte.³¹ Eine weitere

31 Es handelt sich hierbei um eine Momentaufnahme der historischen Mengen, die die Größenordnung von Verfügbarkeiten und Bedarfen an erneuerbarem Kohlenstoff zeigt. Sowohl die Produktionsmengen der chemischen Industrie als auch die Verfügbarkeit von Reststoff- und Abfallbiomasse können sich ändern (z. B. aufgrund möglicher Änderungen von landwirtschaftlichen Praktiken oder in der Forstwirtschaft, nicht zuletzt aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels).

Mobilisierung der Potenziale von Kreislaufwirtschaft und Biomasse als Kohlenstoffquelle für die deutsche Chemieindustrie

Abbildung 22



Agora Industrie und Carbon Minds (2023). Geschätztes Recyclingpotenzial basierend auf einer maximalen „Post Consumer Waste to Product“-Recyclingrate von 35 % für mechanisches Recycling und 40 % für chemisches Recycling gemäß Agora Industrie (2022b). Biomassepotenzial basierend auf Daten von 2015 (DFBZ 2019); angenommener Kohlenstoffgehalt der Biomasse von 50 %; angenommene durchschnittliche Prozesseffizienz von Biomasse zu Chemikalien von 36 %.

Quantifizierung dieses Potenzials für den Chemiesektor würde eine detailliertere Analyse der verschiedenen Arten von biogenen Abfällen und Rückständen und der technologischen Optionen zu ihrer Aufwertung erfordern. Es ist anzumerken, dass im Zuge der Transformation hin zur Klimaneutralität auch andere Sektoren erneuerbare Kohlenstoffquellen benötigen werden – wie etwa die Metallindustrie, die Kohlenstoff für metallurgische Prozesse braucht. Neben technologischen Innovationen spielt auch die Logistik aufgrund der geografisch verteilten Verfügbarkeit von Biomasse eine wichtige Rolle bei der Mobilisierung ihres Potenzials. Logistische Netzwerke entlang der gesamten Wertschöpfungskette sind erforderlich, um dezentrale regionale Biomasse-

quellen und Bioraffinerien mit größeren zentralisierten Verbrauchern im Chemiesektor zusammenzubringen. Die chemische Industrie kann und muss zur Entwicklung technologischer und logistischer Innovationen beitragen, die die Nutzung von Abfällen und Restbiomasse verbessern.

Durch die Mobilisierung des Potenzials von biogener Reststoff- und Abfallbiomasse in Verbindung mit einem stärker zirkulären Ansatz durch mechanisches (und ergänzend durch chemisches) Recycling kann die Nutzung fossiler Rohstoffe stark verringert werden. In Zukunft könnten dem Chemiesektor noch weitere Quellen für erneuerbaren Kohlenstoff zur Verfügung stehen. Chemische

Klimaintelligente Landnutzung: Synergien für Biodiversität und Resilienz, CO₂-Aufnahme und die Versorgung mit Biomasse

Eine klimaintelligente Bewirtschaftung von Wäldern und Agrarlandschaften hat das Potenzial, die Produktion von Biomasse in Einklang mit dem Schutz von Ökosystemleistungen, der Verbesserung der Biodiversität und der Erhöhung der Klimaresilienz zu bringen. Die Forstwirtschaft und der Holzsektor sind bereits wichtige Säulen der deutschen Bioökonomie und liefern einen Großteil der biogenen Rohstoffe. Gleichzeitig sind die Wälder in Deutschland zunehmend anfällig für Extremwetterereignisse, die mit dem Klimawandel zusammenhängen, wie schwere Dürren, Stürme, Waldbrände und Schädlingsbefall. Bereits heute werden Wälder, die überwiegend aus Nadelbäumen bestehen, schrittweise in Mischwälder umgewandelt, die gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels widerstandsfähiger sind.

Dadurch steigt jedoch das Angebot an Laubholz, das für gängige Materialanwendungen, beispielsweise als Bauholz, weniger geeignet ist. Die chemische Industrie kann neue und innovative Verwertungsmöglichkeiten für Laubholz bieten und somit einen Mehrwert für die nachhaltige Forstwirtschaft schaffen (BMEL 2021). Wenn die vielfältigen Auswirkungen auf die lokale Biodiversität, das Klima und die Bodenbeschaffenheit berücksichtigt werden, kann eine nachhaltige selektive Holzernte auch die CO₂-Senkenwirkung der Wälder erhöhen sowie ihre Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit steigern.

In ähnlicher Weise können klimafreundliche landwirtschaftliche Konzepte die Produktivität, die Widerstandsfähigkeit und den Klimanutzen der landwirtschaftlichen Biomasseproduktion erhöhen. Agroforst-Praktiken, wie zum Beispiel „alley-cropping“ oder Kurzumtriebsplantagen, können eine Reihe von ökologischen Vorteilen gegenüber konventioneller Landwirtschaft bieten, darunter die Verbesserung der Bodenqualität, die Förderung der Biodiversität, die Regulierung von Wasser- und Nährstoffkreisläufen, die Erhöhung der CO₂-Senkenfunktion und die Schaffung eines wirtschaftlichen Wertes durch die Kombination der Produktion von Nahrungsmitteln mit der von biogenen Rohstoffen (WBGU 2020).

Rohstoffe auf CO₂-Basis, die mit erneuerbarem Wasserstoff in Kombination mit atmosphärischem CO₂ (DACCU) hergestellt werden, wie Naphtha (über das Fischer-Tropsch-Verfahren) oder Methanol könnten aus Ländern mit großen Erneuerbaren-Potenzialen importiert werden. Die Einfuhr von Biomasse oder Rohstoffen auf Biomassebasis muss jedoch unter strengen Nachhaltigkeitskriterien sehr sorgfältig geprüft werden, um Landnutzungskonkurrenzen mit der Lebensmittel- und Futtermittelproduktion zu begrenzen und die Gefahr zu minimieren, dass die Umweltbelastungen in den Ausfuhrländern durch direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen (LUC und ILUC) verschärft werden.

Abschließend sei erwähnt, dass in der stofflichen Nutzung von Biomasse auch die Chance zur Verbesserung des Land- und Forstwirtschaftsmanagement in Deutschland besteht. Dafür muss der notwendige Umbau der Land- und Forstwirtschaft zugunsten von Klimaresilienz, Biodiversität und CO₂-Aufnahme mit einer nachhaltigen Rohstoffversorgung in einer klimaintelligenten Landnutzung zusammengebracht werden.

4 Handlungsempfehlungen

Der Wandel des Chemiesektors hin zur Klimaneutralität erfordert einen regulatorischen Rahmen, der mit den Klimazielen in Einklang steht. Vor allem ist ein effektiver CO₂-Preis von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der ehrgeizigen Ziele der jüngsten Reform des EU-ETS muss die Industrie in Europa noch vor 2040 klimaneutral sein. Das Preissignal für die Industrie in Europa, einschließlich der chemischen Industrie, wird in den kommenden Jahren stärker werden. Damit die Chemieindustrie schon heute notwendige Investitionen in klimaneutrale Technologien tätigt, sind weitere regulatorische Rahmenbedingungen erforderlich. Ziele und Maßnahmen müssen die gesamte Wertschöpfungskette – Upstream, Midstream und Downstream – abdecken (Agora Energiewende 2020).

- 1. Upstream:** Der Chemiesektor benötigt über neue Infrastrukturen einen **zuverlässigen Zugang zu Erneuerbaren Energien, Rohstoffen und Grundstoffen** zu wettbewerbsfähigen Preisen. Dafür ist die **Planung zusätzlicher Infrastruktur notwendig** – beispielsweise für erneuerbaren Wasserstoff und erneuerbaren Kohlenstoff (d. h. Biomasse, atmosphärisches CO₂). Zu den grundlegenden Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, gehören mehr verfügbare Landflächen für den Ausbau der Erneuerbaren Energien **und eine Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsverfahren**.
- 2. Midstream:** Es sollten wirtschaftliche und finanzielle Anreize für die Entwicklung, den Aufbau und den Betrieb von Schlüsseltechnologien geschaffen und es sollte den Risiken von „Carbon Leakage“ entgegengewirkt werden. Dazu gehören **Sonderförderprogramme**, die zügige Umsetzung von **Klimaschutzverträgen** als unterstützende Maßnahme und **klimaneutrale Produktionsstandards**.

3. Downstream: Der Chemiesektor benötigt eine verlässliche **Nachfrage und skalierbare Märkte** für klimaneutrale und zirkuläre Produkte – Märkte, die die vorübergehend höheren Kosten klimaneutraler Produkte abbilden und Anreize zur Integration der Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette bieten. So wäre zum Beispiel die Festlegung **klarer und ambitionierter Standards** in den EU-Vorgaben für nachhaltige Produkte ein wirksames Mittel, um die Nachfrage nach nachhaltig produzierten chemischen Produkten anzuregen.

4.1 Empfehlungen für direkte Elektrifizierung und Flexibilität

Die Elektrifizierung der Prozessenergie in der chemischen Industrie ist eine Strategie, die sowohl die Emissionen als auch die Abhängigkeit von fossilen Gasimporten noch in diesem Jahrzehnt erheblich reduzieren kann. Die folgenden Empfehlungen basieren auf der Studie *Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie* (Agora Industrie und FutureCamp 2022).

1. Zero-Carbon-Standard für Neuinvestitionen unter 500 Grad Celsius

Die Einführung eines verbindlichen **Zero-Carbon-Standards für Neuinvestitionen** in Prozesswärme bis 500 Grad Celsius ist für die Planungs- und Investitionssicherheit unverzichtbar. In den Temperaturbereichen, für die CO₂-freie Technologieoptionen bereits erhältlich sind, sollte für alle Neuinvestitionen ein gesetzlicher Standard gelten. Dies schafft Planungssicherheit für die industrielle Anwendung und den Anlagenbau und vermeidet Fehlinvestitionen in fossile Brennstoffsysteme. Der Standard sollte insbesondere die verbesserte Abwärmenutzung, die Dampf-Regeneration, Wärmepumpen, Elektrodenkessel, Solarthermie,

konzentrierende Solarthermie, geothermische Anlagen und integrierte Lösungen für Elektrifizierung und Abwärme umfassen. Der Einsatz von Biomasse und erneuerbarem Wasserstoff gehört aufgrund der auf absehbare Zeit limitierten Verfügbarkeiten in der Regel nicht dazu (Agora Industrie und FutureCamp 2022).

2. Minderung der Investitionsrisiken und Kompensation der Kostenlücke

Um den raschen Markthochlauf und die Skalierung der Produktion und Installation direktelektrischer Anlagen zu ermöglichen, sollte ein **Sonderförderprogramm für die direkte Elektrifizierung** aufgelegt werden. Durch die finanzielle Förderung von Leuchtturmprojekten können finanzielle Hürden überwunden und die direkte Elektrifizierung als neue Standardtechnologie etabliert werden. Die **Kosten für Netzanschlüsse, Installation und Integration in den Werksverbund sollten grundsätzlich mitförderfähig sein**. Sowohl die Abwärmenutzung (durch Wärmepumpen) als auch Elektrifizierungsmaßnahmen unter Nutzung des aktuellen Strommixes sollten förderfähig sein. Direkte Investitionen in Erneuerbare Energien können schon heute den Zugang zu kostengünstigem Strom ermöglichen. Der Staat sollte **Unternehmen unterstützen, die Grünstrom-PPAs unterzeichnen oder direkt in Erneuerbare Energien investieren**. Im Falle von PPAs sollte der Staat anfänglich die Ausfallrisiken übernehmen (Agora Energiewende und FutureCamp 2022).

3. Anreize für eine systemdienliche Flexibilität

Bestehende Regulierungen verhindern einen systemdienlich flexiblen Stromverbrauch – ein zentrales Element für eine erfolgreiche Energiewende. Um dies zu ändern, sind die Stromnetzentgelte zu **zeitlich und räumlich differenzierten Netzentgelten** zu reformieren. Die Anpassung der bestehenden Netzentgeltstruktur wird dafür nicht ausreichen. Die Anforderungen an eine zukünftige Netzentgeltstruktur wurden in einer separaten Studie von Agora Energiewende im Jahr 2021

dargelegt (Agora Energiewende, Consentec und RAP 2021). Darüber hinaus sollte im Rahmen der von der Bundesregierung initiierten *Plattform Klimaneutrales Stromsystem* die Einführung **zeitlich und räumlich aufgelöster Strompreissignale** geprüft werden.

4. Abbau von Fehlanreizen für fossile Technologien

Insbesondere KWK-Anlagen profitieren im geltenden Recht von einer Reihe von Steuerbefreiungen, die einen Umstieg auf direktelektrische Wärmeerzeuger unattraktiv machen. Steuerentlastungen für Erdgas oder andere in KWK-Anlagen eingesetzte Brennstoffe im Rahmen der Energiebesteuerung (§ 53a EnStG) zählen zu diesen Fehlanreizen, die beseitigt werden müssen. Hocheffiziente KWK-Anlagen sind dabei gänzlich von der Energiebesteuerung ausgenommen.³² Diese strukturellen Vorteile von fossilbetriebenen KWK-Anlagen müssen abgebaut werden, um ein *Level Playing Field* zu schaffen (Agora Energiewende und FutureCamp 2022).

4.2 Empfehlungen für Kreislaufwirtschaft

Die verstärkte Kreislaufführung in der chemischen Industrie (und insbesondere bei Kunststoffen) hat drei wesentliche Vorteile: 1) Sie **mindert die Emissionen am Ende des Lebenszyklus** und bietet eine Grundlage für die langfristige Bindung von Kohlenstoff; 2) Sie **minimiert den Bedarf an Rohstoffen** und die damit verbundenen Upstream-Emissionen; und 3) sie **reduziert die Importabhängigkeit** bei Primärrohstoffen und kann stattdessen **Sekundärrohstoffe für die lokale Wertschöpfung** mobilisie-

³² Weitere Fehlanreize sind die Befreiung des KWK-Stroms von der Stromsteuer (§ 9 StromStV), die explizite Förderung von KWK-Strom, der ins Netz eingespeist und vom Endverbraucher verbraucht wird (§ 7 KWKG), die Befreiung von Netzentgelten und Umlagen für selbst erzeugten Strom und die derzeit noch geltende Vergütung für vermiedene Netznutzungsentgelte (§ 18 StromNEV).

ren. Mit der anstehenden Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie kann Deutschland eine wichtige Grundlage für nachhaltiges Kohlenstoffmanagement schaffen. Die folgenden Empfehlungen basieren auf der Studie *Mobilising the circular economy for energy-intensive materials* (Agora Industrie 2022b).

1. Optimierte Kunststoffnutzung durch Produktvorgaben

Der wichtigste und stärkste Hebel der Kreislaufwirtschaft ist die optimierte Verwendung von Kunststoffen. Während zur langfristigen und effizienten Verwendung von hochwertigen Kunststoffen angeregt werden sollte, beispielsweise durch Produktvorgaben (z. B. in der EU-Ökodesign-Richtlinie), sollte gleichzeitig die nicht erforderliche Nutzung eingeschränkt werden, z. B. durch gesetzliche Vorgaben (vgl. die EU-Richtlinie zu Einwegkunststoffen). Das Ziel muss eine möglichst lange Produktlebensdauer sein. Weitere Anreize für die effiziente Nutzung von Kunststoffen sind die **Kombination von Produktvorgaben mit einer erweiterten Herstellerverantwortung** für die mit dem Endprodukt verbundenen Umweltkosten und die Einführung von **Vorgaben zu Lebenszyklusemissionen** (embodied carbon requirements).

2. Anreize für Recycling-gerechtes Design und die Entwicklung grüner Märkte

Produkte und Geschäftsmodelle müssen so gestaltet sein, dass 1) in der Produktion hohe Anteile an recycelten Materialien eingesetzt werden und 2) am Ende der Nutzungsdauer die Trennung von Materialien und somit hohe energie- und material-effiziente Recyclingraten, insbesondere durch mechanisches Recycling, ermöglicht werden. Ein Musterbeispiel für ein Recycling-gerechtes Design sind PET-Flaschen: Das deutsche **Pfandsystem** in Kombination mit strengen Vorgaben für Farben und Zusatzstoffe ermöglicht Recyclingraten von 98 Prozent (GVM 2020). Bei der Entwicklung eines grünen Marktes für recyceltes PET haben **Quoten für den Einsatz recycelter Materials** eine wichtige Rolle gespielt. Grüne Märkte sind wichtig, um

hochwertiges Recycling zu fördern und Downcycling zu vermeiden. Indem politische Maßnahmen, die das Design für Recycling fördern oder vorschreiben, mit Maßnahmen für grüne Märkte kombiniert und auf eine breitere Palette von Produkten ausgeweitet werden, lassen sich die CO₂-Minderung sowie die Energie- und Materialeffizienz maximieren.

3. Transparente Statistiken, Tracking-Methoden und ehrgeizige Recyclingziele

Damit angemessene Ziele festgelegt und Fortschritte messbar werden können, muss die Transparenz von Kunststoffströmen auf zweierlei Weise verbessert werden. 1) Es müssen bessere Statistiken entwickelt werden, die auch die **Mengen an Kunststoffabfällen abbilden, die nicht ordnungsgemäß entsorgt** werden. 2) Zukünftig müssen die Recyclingraten sowohl die Sammel- und Sortierverluste als auch die Verluste im Recyclingprozess umfassen. Die Zirkularität muss in Form einer **Post-Consumer-Waste-to-Product-Recycling-rate** erfasst werden.

4. Regulatorische Anerkennung und Markthochlauf des chemischen Recyclings als Ergänzung zur Maximierung von mechanischem Recycling

Besonders hohe Recyclingraten lassen sich durch die komplementäre Anwendung von mechanischem und chemischem Recycling erzielen. Mechanisches Recycling ist eine bewährte und besonders energie- und materialeffiziente Technologie, der Priorität eingeräumt werden sollte. Damit das Potenzial des mechanischen Recyclings ausgeschöpft werden kann, müssen weitere **Anreize für die getrennte Sammlung und die hochwertige Verwertung von Kunststoffen** am Ende ihrer Lebensdauer geschaffen werden (z. B. Optimierung des Produktdesigns und Fördermaßnahmen für **Sortierinfrastruktur**). Das chemische Recycling muss vollumfänglich als gültiges Recyclingverfahren anerkannt werden, das ergänzend zum mechanischen Recycling eingesetzt werden kann. Es muss dabei sicher-

gestellt werden, dass das chemische Recycling so energieeffizient wie möglich ist und mit Erneuerbaren Energien betrieben wird und nicht mit dem mechanischen Recycling um hochwertige Abfälle als Rohstoff konkurriert. Das chemische Recycling befindet sich noch in der Anfangsphase. Die **Finanzierung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten und die Förderung von Leuchtturmprojekten** können dazu beitragen, praktische Erfahrungen zu sammeln und den Markthochlauf zu beschleunigen.

4.3 Empfehlungen für erneuerbare Rohstoffe

Für einen erfolgreichen Umstieg von fossilen auf erneuerbare Rohstoffe sind sowohl ein langfristiges Zielbild als auch ein umfassendes Bündel politischer Maßnahmen erforderlich. Die anstehende Nationale Biomassestrategie der Bundesregierung muss die Rolle der stofflichen Nutzung von Biomasse in der chemischen Industrie für eine umfassendere zirkuläre Bioökonomie berücksichtigen. In der Konsequenz muss die Strategie die Überwindung derzeitiger Nutzungsmuster, insbesondere die **Abkehr von der rein energetischen Nutzung**, zum Ziel haben. Ausgehend von einer klaren Prioritätensetzung müssen bestehende und zukünftige gesetzliche Regelungen in allen Bereichen aufeinander abgestimmt werden – einschließlich Energie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Biodiversität und Umwelt. Momentan scheinen diese verschiedenen Politikbereiche teils gegensätzliche Ziele zu verfolgen.

1. Abbau von Fehlanreizen für die rein energetische Nutzung und Förderung der Kaskadennutzung

Die derzeitigen Regelungen, wie die Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU und das EU-ETS, behandeln Biomasse als CO₂-neutrale Energiequelle, vernachlässigen aber ihr Potenzial, fossile Rohstoffe zu ersetzen und CO₂-Senken zu

schaffen. Dieses regulatorische Ungleichgewicht schafft Anreize zugunsten einer geringwertigen energetischen Nutzung und muss durch Anreize für eine stoffliche Kaskadennutzung korrigiert werden. In Zukunft müssen zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Biomasse und deren Nutzung die **gesamte CO₂-Bilanz über den Lebenszyklus** sowie **weitere Umweltwirkungen** berücksichtigt werden. Gesetzliche Regelungen für Negativemissionen müssen Anreize zur Nutzung von biogenem Kohlenstoff in Materialien schaffen, die im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft so lange wie möglich in der Nutzung bleiben. Dadurch entstehende temporäre CO₂-Senken können in permanente CO₂-Senken überführt werden, wenn beispielsweise ihre Verbrennung am Ende des Lebenszyklus mit CCS kombiniert wird.

2. Transparente Erfassung der Biomassepotenziale

Es werden mehr Daten und Analysen zur aktuellen und zukünftigen Verfügbarkeit und zum Nutzungspotenzial von Biomasse benötigt, die auch über die Art und Qualität der Biomasse Auskunft geben. Die **Verfügbarkeit wie auch die Nachfrage nach Biomasse werden sich in Zukunft voraussichtlich verändern**, und zwar aufgrund von Ernährungsumstellungen, der Abkehr von Verbrennungsmotoren (die zum Teil mit Biokraftstoffen betrieben werden) hin zur E-Mobilität im Verkehrssektor sowie einer verstärkten Elektrifizierung, die die Nutzung von Bioenergie für Heizzwecke in Gebäuden und in der Industrie ersetzt. Darüber hinaus wird es in manchen Ökosystemen nötig sein, mehr Biomasse unberührt zu lassen, um die vielfältigen Funktionen und Dienstleistungen für Klima, Biodiversität und Naturschutz zu ermöglichen. In anderen Ökosystemen hingegen kann eine nachhaltige (klimaintelligente) Landschaftspflege vorteilhaft sein. Die Effekte dieser Praktiken auf die **Verfügbarkeit von Biomasse für hochwertige Anwendungen sollten untersucht und transparent gemacht werden**.

3. Finanzierung von Forschung, Entwicklung und Pilotprojekten

Pilotprojekte, die den Anbau und die Ernte von Biomasse, die Sammlung, den Transport und die Verarbeitungslogistik sowie die Nutzung als industriellen Rohstoff miteinander verbinden, sollten sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene unterstützt werden, um **Anreize für die Entwicklung neuer biobasierter Wertschöpfungsketten** zu schaffen. Diese Projekte müssen mit den Biodiversitätszielen in Einklang stehen und sollten darauf abzielen, neue **Win-win-Allianzen** für die Landnutzung und die Industrie zu schaffen (z. B. auf der Grundlage von Paludikulturen). Der Zugang zur Finanzierung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten für Technologien, die die **Nutzung von Abfällen und Reststoffen verbessern**, sollte erleichtert werden. Der Schwerpunkt sollte auf Innovationen liegen, die effiziente Wege hin zu Biochemikalien aufzeigen, auf Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie **Leuchtturmprojekten im Zusammenhang mit der Kaskadennutzung von Biomasse**. Darüber hinaus können Dialog- oder Austauschplattformen zwischen Biomasseproduzenten und potenziellen Abnehmern die Entwicklung einer geeigneten Logistikinfrastruktur erleichtern, KMUs und kleinen Bioraffinerien Unterstützung bieten sowie Planungssicherheit und neue Geschäftsmodelle für Biomasseproduzenten schaffen. Eine von Verbänden getragene **Bioökonomie-Allianz** kann Biomasse-Netzwerke und -Cluster schaffen und die Verbreitung von vielversprechenden Ansätzen und Geschäftsmodellen ermöglichen.

4. Grüne Märkte für biobasierte Chemikalien

Grüne Märkte für biobasierte Chemikalien und nachgelagerte Produkte, die im Einklang mit den **strengen Nachhaltigkeitskriterien** für Rohstoffe aus Biomasse stehen, müssen gefördert werden. Dafür müssen Emissionen von Chemikalien über ihren gesamten Lebenszyklus transparent bilanziert und insbesondere die **Emissionen am Ende ihrer Lebensdauer** einbezogen werden, sodass die Emissionseinsparungen im Vergleich zur Verwendung fossiler Ressourcen deutlich werden. Diese End-of-Life-Emissionen können geschätzt werden, indem der fossile oder nicht fossile Kohlenstoffgehalt eines Produkts mit der derzeitigen durchschnittlich angewandten Methode zur Abfallverwertung (derzeit überwiegend die Verbrennung) kombiniert wird. Zusätzlich können verschiedene Instrumente zum Aufbau grüner Leitmärkte in Betracht gezogen werden, wie z. B. die Einführung von verbindlichen **Quoten für den Einsatz biogenen Kohlenstoffs** oder **Obergrenzen für die Lebenszyklusemissionen** bestimmter Produkte. Bei der Konzipierung dieser Instrumente muss darauf geachtet werden, dass sie 1) die **Ambitionen für die Kreislaufwirtschaft und insbesondere für hohe Recyclingraten nicht untergraben** und 2) mit klimaintelligenten Landnutzungspraktiken vereinbar sind und nachteilige Auswirkungen auf Ökosysteme und Kohlenstoffkreisläufe durch eine Intensivierung der Landnutzung oder durch direkte und indirekte Landnutzungsänderungen minimieren.

Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (2020): *A Clean Industry Package for the EU: Making sure the European Green Deal kick-starts the transition to climate-neutral industry.* URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_Clean_Industry_Package/A-EW_194_Clean-Industry-Package-EU_WEB.pdf

Agora Energiewende (2021): *No-regret hydrogen: Charting early steps for H2 infrastructure in Europe.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/no-regret-hydrogen/>

Agora Energiewende (2022): *Volle Leistung aus der Energiekrise. Mit Zukunftsinvestitionen die fossile Inflation bekämpfen.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/volle-leistung-aus-der-energiekrise/>

Agora Energiewende (2023): *Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/die-energiewende-in-deutschland-stand-der-dinge-2022/>

Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie/>

Agora Energiewende, Consentec und Regulatory Assistance Project (RAP) (2021): *Zukünftige Anforderungen an eine energiewendegerechte Netzkostenallokation.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/projekte/zukuenftige-anforderungen-an-eine-energiewendegerechte-netzkostenallokation-1/>

Agora Energiewende, Prognos und Consentec (2022): *Klimaneutrales Stromsystem 2035. Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-stromsystem-2035/>

Agora Industrie (2022a): *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation: Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaschutzvertraege-fuer-die-industrietransformation-gesamtstudie/>

Agora Industrie (2022b): *Mobilising the circular economy for energy-intensive materials. How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/mobilising-the-circular-economy-for-energy-intensive-materials-study/>

Agora Industrie und FutureCamp (2022): *Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/power-2-heat-1/>

BMEL (2021): *Charta für Holz 2.0* URL: <https://www.charta-fuer-holz.de/>

BMEL (2022): *Nutzen und Bedeutung der Bioenergie.* URL: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioeconomie-nachwachsende-rohstoffe/bioenergie-nutzen-bedeutung.html>

Carbon Minds (2020): *cm.chemicals database.* URL: <https://www.carbon-minds.com/>

CONVERSIO (2020): *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Kurzfassung der Conversio Studie.* URL: <https://www.vci.de/ergaenzen-de-downloads/kurzfassung-stoffstrom-bild-kunststoffe-2019.pdf>

DBFZ (2019): *Schlussbericht zum Vorhaben Arbeitsgruppe Biomassereststoffmonitoring (AG BioRestMo).* URL: <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22019215.pdf>

DECHEMA (2022): *Ergebnisdarstellung zur Chemischen Industrie. VCI-Fact-Finding Studie im Rahmen von Chemistry4Climate.* URL: <https://www.vci.de/themen/energie-klima/chemistry4climate/chemistry4climate.jsp>

Destatis (2022): *Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online.* URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>

European Commission (2022): *Carbon Removal Certification.* URL: https://climate.ec.europa.eu/action/sustainable-carbon-cycles/carbon-removal-certification_en

FNR (2020): *Stoffliche Einsatzmengen organischer Rohstoffe in der chemischen Industrie in Deutschland 2020.* URL: <https://mediathek.fnr.de/stoffliche-einsatzmengen-organischer-rohstoffe-in-der-chemischen-industrie-in-deutschland-2020.html>

Fraunhofer und Helmholtz (2022): *Tiefe Geothermie für Deutschland - Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende - Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft.* URL: <https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf>

GVM (2020): *Aufkommen und Verwertung von PET-Getränkeflaschen in Deutschland 2019. PET-Getränkeflaschen 2019 in Deutschland, Recycling- und Verwertungsquote.* URL: <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2020/10/2020-10-19-Kurzfassung-Verwertung-PET-Getraenkeflaschen-2019.pdf>

Huckestein und Plesnivý (2000): *Möglichkeiten und Grenzen des Kunststoffrecyclings, Chemie in unserer Zeit, Vol. 34, No. 5, pp. 276–286.* URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1521-3781%28200010%2934%3A5%3C276%3A%3AAID-CI-UZ276%3E3.O.CO%3B2-Q>

IEA (2020): *Bio-Based Chemicals - A 2020 Update.* URL: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-bio-based-chemicals-a-2020-update/>

IN4climate.NRW (2021): *Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme, Gelsenkirchen.* URL: https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2021/diskussionspapier-klimaneutrale-waerme-industrie-cr-in4climatenrw.pdf

IPCC (2022): *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi:10.1017/9781009157926.001.* URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

JRC (2019): *Insights into the European market of bio-based chemicals. Analysis based on ten key product categories, EUR 29581 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-79-98420-4, doi:10.2760/549564, JRC112989*

Kusenberg et al. (2022): *Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks: To decontaminate or not to decontaminate?*, *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 138, pp. 83–115. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X21005894>

Lupi (2017): *Fundamentals of Electroheat. Electrical Technologies for Process Heating*, Springer Link Bücher, Springer, Cham. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-46015-4>

Joormann und Laister (2019): *High Temperature Heat Pump Systems for District Heating & Process Steam. Presentation for Wuppertal Institute in the Workshop: „Power-to-Heat in Wärmenetzen“*

Madeddu et al. (2020): *The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat)*. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abbd02/pdf>

Material Economics (2022): *Europe's missing plastics - Taking stock of EU Plastics Circularity. Im Auftrag von Agora Industrie*. URL: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/euro-pes-missing-plastics/>

Meereboer et al. (2020): *Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites*, *Green Chem.*, 2020, 22, 5519–5558.

Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*. URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-vollversion/>

Ragaert et al. (2017): *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Rathore und Singh (2021): *Biomass to fuels and chemicals: A review of enabling processes and technologies*. URL: <https://doi.org/10.1002/jctb.6960>

Saebea et al. (2020): *Gasification of plastic waste for synthesis gas production*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.043>.

Schüwer und Schneider (2018): *Electrification of industrial process heat: long-term applications, potentials and impacts*, *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings, 4. Technology, products, and systems*. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7037/file/7037_Schuewer.pdf

Schyns und Shaver (2021): *Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review*, *Macromolecular rapid communications*, Vol. 42, No. 3, e2000415. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/marc.202000415>

SYSTEMIQ (2022): *ReShaping Plastics: Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe*. URL: <https://plasticseurope.org/reshaping-plastics/>

Thünen-Institut (2021): *Project brief - Systematisches Monitoring der Bioökonomie (MoBi)*. URL: https://www.thuenen.de/media/publikationen/project_brief/Project_brief_2021_01.pdf

Umweltbundesamt (2021a): *Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten – Kunststoffabfälle*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#kunststoffe-produktion-verwendung-und-verwertung>

Umweltbundesamt (2021b): *Industrielle Produktion von Ammoniak*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/industrielle-produktion-von-ammoniak>

VCI (2021a): *Chemiewirtschaft in Zahlen 2021.*

URL: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chiz-historisch/chemiewirtschaft-in-zahlen-2021.pdf>

VCI (2021b): *Daten und Fakten im Überblick Branchenporträt, 2019.* URL: <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/branchenportraet-der-deutschen-chemisch-pharmazeutischen-industrie.jsp>

VCI (2022a): *Energiestatistik im Überblick.*

URL: <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/vci-statistik-grafiken-energie-klima-rohstoffe-chemie.jsp>

VCI (2022b): *Gasembargo bringt Versorgungsengpässe.* URL: <https://www.vci.de/themen/ukraine-krieg/wirtschaftliche-auswirkungen/gasembargo-bringt-versorgungsengpaesse.jsp>, Stand vom 01. Juli 2022.

VCI (2023): *Sector Group Chemical Parks within the German Chemical Industry Association (VCI).*

URL: <https://chemicalparks.com/chemical-parks/list-of-chemical-parks>, Stand vom 18. April 2023

Winter, Meys und Bardow (2021): *Towards aromatics from biomass: Prospective Life Cycle Assessment of bio-based aniline, Journal of Cleaner Production, Vol. 290, p. 125818.*

Zhao et al (2018): *Solvent-based separation and recycling of waste plastics: A review.* URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29960198/>

Publikationen von Agora Energiewende

AUF DEUTSCH

Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland

Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie

Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung des Energiewirtschaftsrechts an unionsrechtliche Vorgaben

Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

Ein neuer Ordnungsrahmen für Erdgasverteilnetze

Analysen und Handlungsoptionen für eine bezahlbare und klimazielfkompatible Transformation

Rückenwind für Klimaneutralität

15 Maßnahmen für den beschleunigten Ausbau der Windenergie

Klimaneutrales Stromsystem 2035 (Zusammenfassung)

Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann

Stellungnahme zum Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032 der Fernleitungsnetzbetreiber

Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022

Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023

Volle Leistung aus der Energiekrise

Mit Zukunftsinvestitionen die fossile Inflation bekämpfen

Durchbruch für die Wärmepumpe

Praxisoptionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand

Power-2-Heat

Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie

Schutz in der fossilen Energiekrise

Optionen für Ausgleich und Entlastung

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl) – Update

Aktualisierte Analyse zur Stahlbranche

Klimaneutrales Stromsystem 2035 (vollständige Studie)

Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Zement)

Analyse zur Zementbranche

Publikationen von Agora Energiewende

AUF ENGLISCH

15 Insights on the Global Steel Transformation

Decarbonisation in State-Owned Power Companies

Briefing from the workshop on 28–29 September 2022

From coal to renewables

A power sector transition in Kazakhstan

12 Insights on Hydrogen – Argentina Edition

Breaking free from fossil gas

A new path to a climate-neutral Europe

How Europe can make its power market more resilient

Recommendations for a short-term reform

Argentina as a hub for green ammonia

A forward-looking development strategy for addressing the global energy and climate crises

Overview of China's Energy Transition 2022

Chapter on Oil

Transforming industry through carbon contracts (Steel)

Analysis of the German steel sector

The driving forces behind the green transition in Europe and South Korea

A comparison between the European Green Deal and the Korean Green New Deal

Overview of China's Energy Transition 2022

Chapter on Natural Gas

Coal Phase-Out in Germany

The Multi-Stakeholder Commission as a Policy Tool

Powering the Future of the Western Balkans with Renewables

Climate-neutral power system 2035 (Full study)

How the German power sector can become climate-neutral by 2035

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-energiewende.de

Über Agora Industrie

Agora Industrie erarbeitet unter dem Dach von Agora Energiewende Strategien und Politikinstrumente für eine Transformation der Industrie zur Klimaneutralität – in Deutschland, Europa und international. Agora Industrie agiert unabhängig von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen und ist ausschließlich dem Klimaschutz verpflichtet.



Unter diesem Scan-Code steht diese Publikation als PDF zum Download zur Verfügung.

Agora Industrie

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-industrie.de

info@agora-industrie.de

