

STUDIE

Innovationen für morgen: Chancen für eine klima- neutrale Chemieindustrie

Wie die Abkehr von fossilen Rohstoffen die Resilienz des
Industriestandorts steigert und neue Jobs schafft



Bitte zitieren als:

Agora Industrie, Carbon Minds und Fraunhofer IKTS (2025): Innovationen für morgen: Chancen für eine klimaneutrale Chemieindustrie. Wie die Abkehr von fossilen Rohstoffen die Resilienz des Industriestandorts steigert und neue Jobs schafft.

Studie

Innovationen für morgen: Chancen für eine klimaneutrale Chemieindustrie.

Wie die Abkehr von fossilen Rohstoffen die Resilienz des Industriestandorts steigert und neue Jobs schafft.

Erstellt von

Agora Industrie

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

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

www.agora-industrie.de

info@agora-industrie.de

Projektpartner

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)

Winterbergstraße 28 | 01277 Dresden

<https://www.ikts.fraunhofer.de>

Carbon Minds GmbH

Eupener Str. 165 | 50933 Köln

<https://www.carbon-minds.com>

info@carbon-minds.com

Projektleitung und Autor:innen

Paul Münnich

paul.muennich@agora-industrie.de

Lea Mohnen

lea.mohnen@agora-industrie.de

Projektteam

Paul Münnich, Lea Mohnen, Jasper Eitze, Dr. Julia Metz, Dr. Utz Tillmann (alle Agora Industrie); Prof. Dr. Thomas Kirschstein, Dr. Andrea Weiße, Dr. Daniela Pufky-Heinrich, Lisa Plümer (alle Fraunhofer IKTS); Dr. Leif Rohrbach, Dr. Raoul Meys, Ronja Hermanns (alle Carbon Minds); Prof. Dr. Ing. Christoph Wolff (Smart Freight Centre, Amsterdam und Universität zu Köln); Dr. Kathrin Böhling, Dr. Wilhelm Klümper (beide Agora Agrar)

Danksagung

Erst das Engagement vieler weiterer Kolleginnen und Kollegen hat diese Studie möglich gemacht. Für die tatkräftige Unterstützung bedanken möchten wir uns daher bei Fabian Barrera, Fedor Unterlöhner, Florie Gonsolin, Frank Peter, Christopher Berndt, Julian Somers, Mathias Koch, Dr. Matthias Deutsch, Nora Rauschke, Ying Ma (alle Agora Industrie); Alexandra Steinhardt, Benjamin Görlach, Émeline Spire, Fabian Huneke, Grace Williams, Dr. Jahel Mielke, Janne Görlach, Julia Bläsius, Lena Tropschug, Susanne Liebsch (alle Agora Energiewende); Dr. Christine Chemnitz, Prof. Dr. Harald Grethe (beide Agora Agrar); Antonia Sanllorente, Laura Heinemann (beide Fraunhofer IKTS). Im Projekt haben wir Workshops und Interviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Ministerien durchgeführt. Unser Dank gilt allen Mitwirkenden für ihre Unterstützung, Expertise und die konstruktiven Diskussionen.

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

Innovationen für morgen zu entwickeln ist seit jeher ein zentraler Treiber für eine sich dynamisch entwickelnde chemische Industrie. In der vorliegenden Studie zeigen wir auf, welche Chancen sich dabei auf dem Weg zur Klimaneutralität ergeben.

Das tun wir in einer Zeit, in der die chemische Industrie infolge geopolitischer Spannungen in einer tiefgreifenden Krise steckt. Seit fast drei Jahren schon stagniert die chemische Produktion auf einem Niveau, das rund 20 Prozent unter dem von Anfang 2022 liegt.

Eine Neuausrichtung auf klimaneutrale Produktion und innovativen Verfahren ist jetzt die Chance, um den Standort zu stärken und zukunftsfähig zu machen. Dazu zu gewinnen gibt es: gute Arbeitsplätze,

wirtschaftliche Resilienz, technologische Souveränität und Versorgungssicherheit.

Was es jetzt braucht, ist ein politischer Rahmen, der kurzfristig entlastet und langfristig neue Geschäftsmodelle eröffnet. Planungssicherheit, Investitionsanreize und ein klares Bekenntnis zum Standort sind entscheidend – für Unternehmen wie für Beschäftigte.

Diese Studie möchte einen Beitrag zur Debatte leisten – mit einer detaillierten Analyse verschiedener Transformationspfade, der Ermittlung von Wertschöpfungs- und Jobeffekten und dem Aufzeigen, welche politischen Schritte jetzt notwendig sind.

Ich wünsche eine angenehme Lektüre!

Dr. Julia Metz

Direktorin, Agora Industrie

→ Ergebnisse auf einen Blick

- 1 **Die geopolitische Zeitenwende fordert die Chemieindustrie heraus – durch den Wegfall von russischem Erdgas, anhaltend hohe Energie- und Rohstoffpreise sowie eine schwache Nachfrage aus wichtigen Kundenbranchen.** Eine strategische Neuausrichtung der Chemieindustrie in einem veränderten Umfeld ist bislang weitestgehend ausgeblieben. Mit einem Fokus auf Innovation, Versorgungssicherheit, guten Jobs und Klimaneutralität kann sich die Branche angesichts des verschärften Wettbewerbs und der geopolitischen Spannungen zukunftsfest aufstellen.
- 2 **Eine innovationsorientierte Chemieindustrie, die auf Klimaneutralität zielt, investiert in Bioökonomie und Recycling und schafft bis 2045 so bis zu 90.000 neue Jobs und 10 Milliarden Euro neue Wertschöpfung.** Eine stärker inländisch ausgerichtete Rohstoffbasis steigert zugleich die Resilienz des Industriestandortes. Durch internationale Handelspartnerschaften für grünes Methanol, Ammoniak und Ethanol können Unternehmen zudem Kosten optimieren und heimische Rohstoffe ergänzen.
- 3 **Durch eine Neuausrichtung kann die Chemieindustrie jährlich bis zu 80 Millionen Tonnen CO₂-Äq entlang der gesamten Wertschöpfungskette einsparen und zu 15 Millionen Tonnen CO₂-Äq Negativemissionen beitragen.** Damit ermöglicht die deutsche Chemieindustrie gesamtgesellschaftliche Klimaneutralität und kann als Frontrunner ihre Stärken Innovation und Technologieführerschaft ausspielen. Gleichzeitig kann sie sich wichtige Anteile an grünen Wachstumsmärkten sichern.
- 4 **Für zukunftssichere Chemiestandorte in Deutschland braucht es ein umfassendes Maßnahmenpaket.** Auf EU-Ebene sollte die Bioeconomy Strategy die Chemieindustrie als zentralen Sektor für eine rohstoffliche Biomassenutzung verankern. Ein Carbon Leakage Schutz muss erarbeitet werden, der die Weitergabe der CO₂-Kosten ermöglicht und die Wettbewerbsfähigkeit einer klimaneutralen Produktion stärkt. In Deutschland bietet die angekündigte Chemieagenda die Chance, Innovationen etwa im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu fördern, die Elektrifizierung zu stärken und Investitions- und Planungssicherheit zu schaffen.

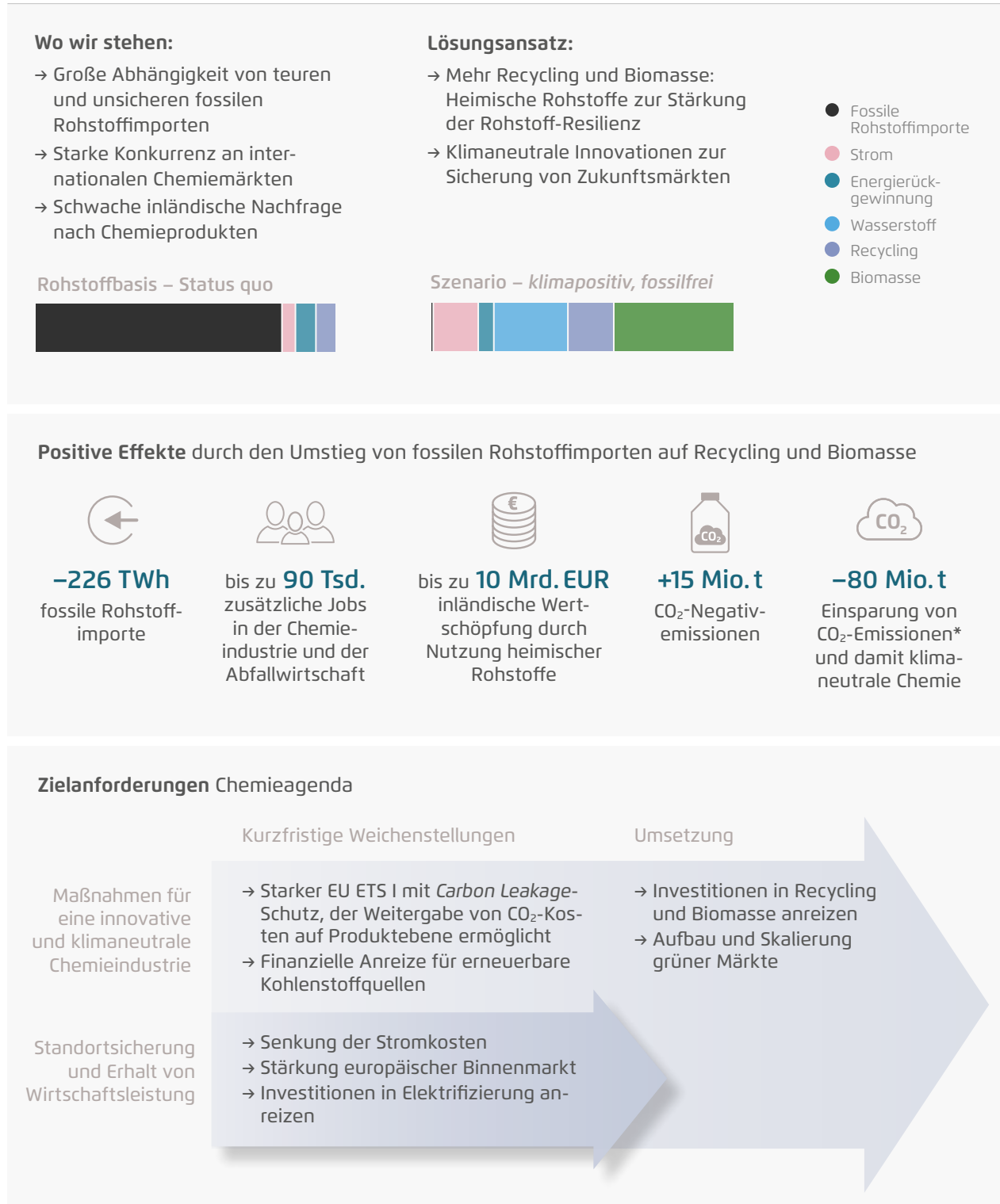
Inhalt

1	Einleitung und Zusammenfassung	5
2	Die chemische Industrie in Deutschland	9
2.1	Wirtschaftliche Struktur und aktuelle Herausforderungen	9
2.2	Heutiger Ressourcenbedarf und besondere Herausforderungen bei der Emissionsminderung	11
3	Schlüsselstrategien für eine innovative, resiliente und klimaneutrale Chemie	14
3.1	Elektrifizierung und Flexibilisierung des Energiebedarfs	14
3.2	Schließen des Materialkreislaufes	16
3.3	Umstieg auf erneuerbare Kohlenstoffe	20
3.4	Die Rolle von Wasserstoff in Ergänzung zu Elektrifizierung, Recycling und Biomasse	27
4	Methodischer Überblick und Szenarien-Definition	29
5	Modellierungsergebnisse: Ressourcenpfade für die chemische Industrie	32
5.1	Elektrifizierung der Energiebedarfe	33
5.2	Umstieg auf recycelten und erneuerbaren Kohlenstoff	35
5.3	Methanol im Kern der Transformation	37
5.4	CCS, Kohlenstoffmanagement und Negativemissionen	39
5.5	Investitionsbedarfe	40
5.6	Produktionskosten	42
5.7	Beschäftigungs- und Wertschöpfungspotenziale	45
6	Die Transformation in der Praxis: Einblicke in die Transformation von Verbundstandorten	49
7	Politische Handlungsempfehlungen	51
7.1.	Preisreize für klimafreundliche Produktion schaffen	51
7.2.	Investitionen anreizen	53
7.3.	Recycling- und Biomassepotenziale heben	53
7.4.	Stromkosten senken und Industrie-Stromverbrauch flexibilisieren	55
7.5.	Infrastrukturen aufbauen	56
7.6.	Märkte schaffen	57
8	Anhang	58
8.1	Techno-ökonomische Modellierung der Technologie- und Ressourcenpfade	58
8.2	Modellierung von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten	59
8.3	Szenarioannahmen und Rahmenparameter	62

1 Einleitung und Zusammenfassung

Ausgangslage, Effekte des Feedstock-Wechsels und Anforderungen an die Chemieagenda

→ Abb. A



Die chemische Industrie in Deutschland ist traditionell geprägt durch ihre Kernkompetenzen: Innovationsstärke sowie die erfolgreiche Entwicklung von Qualitäts- und Spezialprodukten. Trotz eines Hochpreisumfelds und zunehmenden internationalen Wettbewerbs hat sie sich stets erfolgreich weiterentwickelt. In der vorliegenden Studie werden Wege aufgezeigt, wie ein Fokus auf Innovationen und Resilienz der entscheidende Schlüssel für eine zukunftsfähige klimaneutrale Chemieindustrie in Deutschland sein kann.

Aktuell steht die Chemieindustrie unter erheblichem wirtschaftlichem Druck. Eine schwache Nachfrage im Inland, steigende internationale Konkurrenz und hohe fossile Energiepreise belasten die für Deutschland so zentrale Branche. Hinzu kommt die Abhängigkeit von fossilen Energie- und Rohstoffimporten, deren Risiken sich insbesondere mit dem Ende russischer Gaslieferungen deutlich bemerkbar gemacht haben. Die schwierige Ausgangslage ist dabei nicht das Resultat der Klimapolitik, sondern Folge globaler Überkapazitäten, fossiler Abhängigkeiten und struktureller Standortnachteile. Investitionszurückhaltung und Standortschließungen führen zu Verunsicherung in der Branche. Zugleich bleibt die Chemie ein zentrales Fundament der deutschen Wirtschaft: Sie ist eng mit vielen Industriezweigen verflochten und bildet die Grundlage wichtiger Wertschöpfungsketten. Global sieht sich die deutsche und europäische Chemie mit einer starken internationalen Konkurrenz konfrontiert und verliert seit rund 20 Jahren Anteile am Weltmarkt. Aktuell diskutierte Standortschließungen und der damit einhergehende drohende Stellenabbau zeigen: Der Chemiestandort Deutschland steht in Bezug auf seine Wettbewerbsfähigkeit auf globalen Märkten vor großen Herausforderungen – ganz unabhängig von klimapolitischen Maßnahmen und insbesondere auch bei einem Verbleib in fossiler Produktion.

Zugleich hat die deutsche Chemieindustrie mit einem breiten Unternehmens- und Produktportfolio und einem exzellenten Forschungsnetzwerk auch strukturelle Vorteile, die sie in eine gute Ausgangslage für Innovationssprünge in eine resilientere und klimaneutrale Zukunft versetzen. Die Branche

muss Märkte identifizieren, in denen sie durch ihre Kernkompetenzen wie Innovationskraft sowie die Entwicklung von Qualitäts- und Spezialprodukten Wertschöpfung in Deutschland und Europa halten kann. Sie muss sich fragen, welche Bereiche langfristig wettbewerbsfähig sein können und gemeinsam mit der Politik entscheiden, in welchen Bereichen eine heimische Produktion erforderlich ist, um die Resilienz des Industriestandortes zu gewährleisten.

Diskussionen und Nachrichten über Standortschließungen verdeutlichen, dass das aktuelle Geschäftsmodell auf Basis fossiler Rohstoff- und Energieimporte sowie aufgrund der daraus resultierenden Energiekostenanstiege bereits heute stark von einem strukturellen Wandel betroffen ist. Die Dynamik des bereits angebrochenen strukturellen Umbruchs sollte zum Anlass genommen werden, den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Chemie, die Stärkung der europäischen Energiesicherheit und -resilienz, sowie den Umstieg auf fossilfreie Rohstoffe und Energien als eng miteinander verwobene Ziele zu begreifen und entschlossen voranzutreiben. In einem herausfordernden Umfeld eröffnet der konsequente Wandel hin zu einem nachhaltigen, von fossilen Rohstoffmärkten unabhängigeren Geschäftsmodell die Chance, global eine technologische Vorreiterrolle einzunehmen und frühzeitig wichtige Segmente grüner Märkte zu erschließen. Im Inland bietet der Wandel die Möglichkeit, durch den Umstieg auf erneuerbare Kohlenstoffquellen neue Arbeitsplätze und zusätzliche Wertschöpfung zu schaffen sowie Negativemissionen zu generieren. So kann die Chemie einen wichtigen Beitrag zu einer insgesamt klimaneutralen Gesellschaft leisten.

Die vorliegende Studie analysiert mögliche Pfade hin zu einer klimaneutralen Chemieindustrie aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Perspektive. Es werden verschiedene Ressourcenpfade, auf denen fossile Rohstoffe durch heimische erneuerbare Ressourcen wie Biomasse, Kunststoffrecycling, Strom und Wasserstoff substituiert werden, betrachtet und im Hinblick auf Energiebedarfe, Investitions- und Betriebskosten, Wertschöpfung und Beschäftigung verglichen. Ergänzend betrachtet die Studie die Möglichkeit, klimaneutrale Importe

auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette einzubinden: So wird der Import von grünem Wasserstoff, von den Zwischenprodukten Methanol, Ethanol und Ammoniak, sowie von grünen Basischemikalien wie Ethylen untersucht.

Der Umstieg von fossilen Ölimporten auf heimische erneuerbare Rohstoffe wie Biomasse und Kunststoffrecycling schafft bis zu 88.000 neue Arbeitsplätze und zusätzliche Wertschöpfung in Höhe von 5,1 bis zu 10,7 Milliarden Euro im Inland. Die Schnittstelle zwischen Biomasseproduktion und Chemieindustrie bildet dabei die Methanolwirtschaft. Produktionsschritte und Wertschöpfungsstufen, die bisher im Ausland stattgefunden haben, können so ins Inland verlagert werden. Biomasse ist ein dezentraler Rohstoff und bietet damit insbesondere auch dem ländlichen Raum Chancen, von einer zukünftigen Methanolwirtschaft zu profitieren.

Die Kombination heimischer Ressourcen mit dem Import klimaneutraler Zwischenprodukte ist ein Sweet-Spot: Gegenüber den vollständig auf heimische Ressourcen fokussierten Szenarien können die notwendigen Investitionen für neue Anlagen so von 50 auf rund 37 Milliarden Euro gesenkt werden. Die verbleibenden Investitionsbedarfe entsprechen bei einem linearen Investitionspfad rund 1,85 Milliarden Euro jährlich – etwa 12 Prozent der derzeit üblichen jährlichen Investitionen in der Chemiebranche. Auch bei einem teilweisen Import grüner Zwischenprodukte bietet der Umbau auf klimaneutrale Ressourcen hohe Potenziale für zusätzliche Jobs und Wertschöpfung im Inland. Es können 69.000 neue Arbeitsplätze geschaffen und die Wertschöpfung um 7,2 Milliarden Euro gesteigert werden. Weitere Wertschöpfungseffekte entstehen in der Abfallwirtschaft sowie durch die durch Löhne induzierte Wertschöpfung. Als starker Kostentreiber mit vergleichsweise geringen Beschäftigungseffekten erweist sich die Wasserstoffproduktion. Investitionen in Kunststoffrecycling, Biomasseverarbeitung und Methanolsynthese erweisen sich über verschiedene Szenarien hinweg als wirtschaftlich sinnvoll, da bestehende Potenziale kosteneffizient genutzt werden können. Die Studie zeigt: Jede zusätzlich stofflich genutzte Tonne Kunststoffabfall und

heimische Biomasse ist gut für den Standort, da sie neue Arbeitsplätze und Wertschöpfung schafft und zudem die Resilienz steigert.

Um den Hochlauf klimaneutraler Chemikalien zu ermöglichen, bedarf es einer wirksamen CO₂-Bepreisung, die auch beim Endprodukt ankommt.

Chemikalien werden international gehandelt – daher bestimmt sich auch ihr Preis am Weltmarkt. Umweltkosten, die durch die Produktion, Nutzung und Verbrennung von Chemieprodukten entstehen, werden auf diesen Märkten derzeit nicht eingepreist. Auch das Preissignal der CO₂-Bepreisung durch den EU ETS I (*European Union Emissions Trading System*) wird derzeit nicht auf Endproduktebene weitergereicht, sondern durch die Strompreiskompensation und die Vergabe kostenfreier Emissionszertifikate kompensiert. Damit sich erneuerbare und recycelte Produkte am Markt durchsetzen können, müssen gesellschaftliche Kosten und Nutzen eingepreist werden. Die Ausweitung des Europäischen CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (*Carbon Border Adjustment Mechanism*, CBAM) auf Chemikalien ist ein möglicher Lösungsansatz, wenngleich einige Ausgestaltungsfragen noch geklärt werden müssen, um der Komplexität der Chemieindustrie gerecht zu werden. Der CBAM erhebt beim Import von Industriegütern die CO₂-bezogenen Kosten, die durch die Produktion im Ausland zuvor nicht angefallen sind. Dadurch kann die Vergabe kostenloser Emissionszertifikate auslaufen, und die Mehrkosten können auf Produktebene weitergereicht werden, ohne die europäische Chemieproduktion einseitig zu benachteiligen. Beim Export von chemischen Produkten außerhalb von Europa braucht es ohne eine kostenfreie Zuteilung einen Ausgleichsmechanismus, der den Wettbewerbsnachteil am Weltmarkt verhindert.

Die Bepreisung direkter CO₂-Emissionen muss durch einen finanziellen Anreiz für den Umstieg von fossilen auf erneuerbare Kohlenstoffquellen ergänzt werden. Der größte Teil der Emissionsminderung durch den Umstieg auf erneuerbare Kohlenstoffquellen ergibt sich durch die Vermeidung vorgelagerter Emissionen während der Gewinnung fossiler Rohstoffe und nachgelagerter fossiler Emissionen bei der Nutzung und Verbrennung von Chemieprodukten.

Dieser gesellschaftliche Nutzen sollte auch finanziell angereizt werden. Der Emissionshandel bepreist bisher jedoch fast ausschließlich direkte Emissionen, die in der Produktion entstehen.¹ Eine rein heimische Produktion mit Fokus auf die Nutzung von Biomassepotenzialen lässt die Betriebskosten (exklusive CO₂-Preis) pro Produkttonne um rund 100 Prozent steigen – von derzeit knapp 1.000 Euro auf etwa 2.000 Euro pro Produkttonne. Die effektive Bepreisung direkter produktionsbedingter Emissionen würde im Status quo bei einem perspektivisch realistisch scheinenden CO₂-Preis von 132 Euro pro Tonne CO₂ eine Kostensteigerung von 100 Euro pro Produkttonne bedeuten.² Die Einbindung klimaneutraler Zwischenproduktimporte auf der anderen Seite senkt die Produktionskosten fossilfreier Chemikalien um rund 300 Euro beziehungsweise 15 Prozent. Unter der Annahme, dass auch Negativemissionen (ebenefalls zu 132 Euro pro Tonne CO₂) vergütet werden, können die Kosten für fossilfreie Chemikalien um weitere 130 Euro auf etwa 1.500 Euro pro Produkttonne gesenkt werden. Damit ergibt sich eine verbleibende Kostenlücke von rund 450 Euro pro Produkttonne (vgl. Abbildung 19). Eine zusätzliche Bepreisung fossiler Feedstocks beziehungsweise vor- und nachgelagerter Emissionen könnte diese Kostenlücke schließen. Auf Endproduktebene wirken sich die Kostensteigerungen für die Nutzung klimaneutraler Grundstoffchemikalien in vielen Fällen nur marginal aus. Die Mehrkosten für ein Getränk in einer fossilfreien Plastikflasche werden auf bis zu drei Prozent geschätzt, die Mehrkosten für fossilfreies Plastik in einem Auto auf rund ein Prozent (vgl. Infobox *Mehrkosten auf Produktebene*, S. 44).

Der Übergang zu Erneuerbaren Energien und Rohstoffen stellt die Branche vor eine außergewöhnliche Innovationsaufgabe. Die Lösung der Klimakrise ist nur mit dem Umbau der Chemieindustrie zu schaffen. Der enorme globale Zubau Erneuerbarer Energien und die sinkenden Gestehungskosten von

grünem Strom sind jedoch ein Indiz dafür, dass auch der Umstieg der Industrie auf erneuerbare Rohstoffe und grünen Strom nur eine Frage der Zeit ist. Europa kann dabei eine Vorreiterrolle einnehmen. Damit dies gelingt, ist politisches Handeln gefragt. Eine wirksame CO₂-Bepreisung ohne Ausnahmen, klare Leitplanken für Elektrifizierung, Rohstoffwende und Recycling sowie gezielte Unterstützung bei Investitionen und Infrastruktur sind entscheidend, um Planungssicherheit zu schaffen und den Umbau in Gang zu setzen.

Die Studie zeigt: Eine zukunftsorientierte klimaneutrale Chemie ist möglich und mit Innovationschancen für den Standort verbunden. Sie kann neue Märkte erschließen, damit langfristig auch Wettbewerbsfähigkeit sichern und gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zu Resilienz und Klimaneutralität leisten.

1 Der geplante Einbezug von Müllverbrennungsanlagen in den europäischen Emissionshandel ist in diesem Zusammenhang ein wichtiger Schritt.

2 Derzeit werden der Chemieindustrie für einen Großteil ihrer Emissionen kostenlos Emissionszertifikate zugeteilt, wodurch die CO₂-Emissionen kaum effektiv bepreist werden (vgl. Kapitel 2.1).

2 Die chemische Industrie in Deutschland

2.1 Wirtschaftliche Struktur und aktuelle Herausforderungen

Die chemische Industrie ist wirtschaftlich von großer Bedeutung für die deutsche und europäische Industrie.

Als viertgrößte Branche des verarbeitenden Gewerbes ist die deutsche Chemieindustrie verantwortlich für 6,6 Prozent der Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland (Destatis 2025b). Damit ist Deutschland der größte Chemiestandort Europas und der drittgrößte Chemieexporteur weltweit (VCI 2025d). Die chemische Industrie ist dabei eng mit anderen Bereichen des verarbeitenden Gewerbes verflochten. Rund 75 Prozent der Produkte gehen in die Weiterverarbeitung. Dabei sind neben der

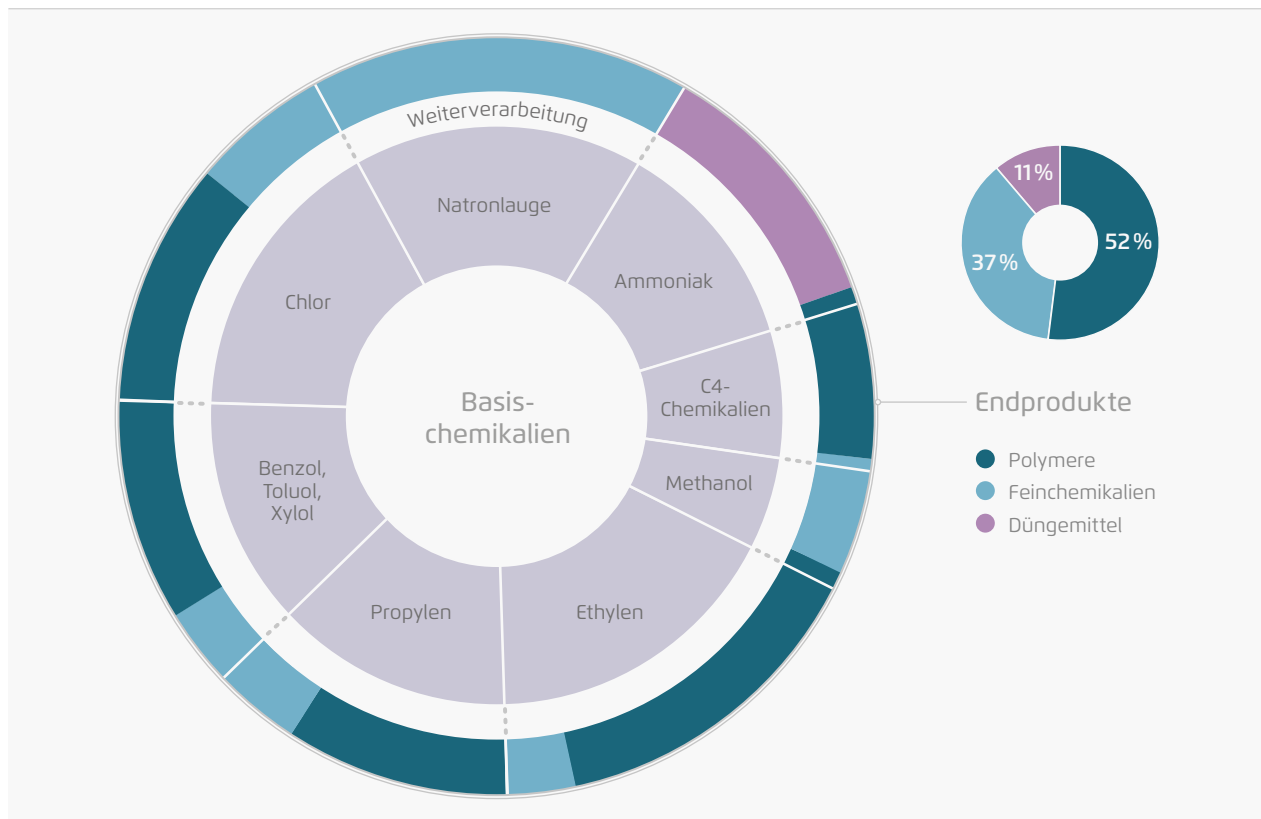
kunststoffverarbeitenden Industrie die Bauwirtschaft, der Fahrzeugbau sowie die Stahl- und Metallindustrie die wichtigsten Abnehmer der chemischen Produkte (VCI 2025a). Damit liefert die Chemieindustrie wichtige Vorprodukte für die nachgelagerten Wirtschaftszweige und steht am Anfang vieler Lieferketten.

Polymere, die Grundbausteine von beispielsweise Kunststoffen, stellen die wichtigste Produktgruppe der chemischen Industrie dar.

Die chemische Industrie in Deutschland ist durch ein heterogenes und diverses Produkt- und Prozessportfolio geprägt. Auf Endproduktebene machen Kunststoffe, also Produkte auf Basis von Polymeren, etwa 50 Prozent aller chemischen Produkte aus.

Abhängigkeit zwischen Basischemikalien und Endprodukten

→ Abb. 1



Agora Industrie (2025) basierend auf Agora Industrie und Carbon Minds (2023) und VCI (2021a, 2021b). Der Radiant entspricht den Massenströmen.

Fein- und Spezialchemikalien (zum Beispiel Farbstoffe), die vor allem auf anorganischen Vorprodukten beruhen, machen mit rund 32 Prozent die zweite wesentliche Produktkategorie aus (VCI 2025a). Daneben ist die Ammoniak- und Düngemittelproduktion ein wichtiger Zweig der deutschen Chemieindustrie.

Die chemische Industrie ist von komplexen, eng verwobenen Wertschöpfungsketten geprägt. Rund zehn Basischemikalien stellen den Ausgangspunkt für den Großteil der Endprodukte dar (vgl. Abbildung 1). Diese Basischemikalien sind Ethylen, Propylen und C4-Fraktion (Gruppe der Olefine), Benzol, Toluol und Xylol (Gruppe der Aromaten), Methanol, Chlor, Natronlauge sowie Ammoniak. Diese Basischemikalien sind der Ausgangspunkt für die Produktion von vielen Tausenden chemischen Produkten. Dabei sind die Produktionsprozesse häufig eng miteinander verwoben. An rund 40 Verbundstandorten deutschlandweit ist die Produktion verschiedenster Chemikalien durch die gemeinsame Nutzung von Infrastrukturen und industriellen Dienstleistungen miteinander verknüpft. Standorte, an denen mit *Steamcrackern* Basischemikalien (insbesondere Ethylen und Propylen) hergestellt werden, sind durch den engen Austausch von Energie und Materialströmen besonders stark integriert und ermöglichen die effiziente Produktion von chemischen Produkten. Derzeit werden deutschlandweit 13 *Steamcracker* an acht Standorten betrieben.³

Die chemische Industrie ist eine exportorientierte Branche. Rund 63 Prozent der erzeugten Waren werden im Ausland abgesetzt (Destatis 2024). Der wichtigste Absatzmarkt ist der europäische Binnenmarkt (EU 27 und sonstige) mit rund zwei Dritteln der Gesamtexporte, gefolgt von Asien und der nordamerikanischen Freihandelszone (NAFTA) mit jeweils rund 14 Prozent (VCI 2025b). Diese hohe Exportorientierung konnte über die Jahre aufrechterhalten

werden, indem die Wettbewerbsposition kontinuierlich durch Effizienzsteigerung und Innovation optimiert wurde. So hat die Chemieindustrie bereits in der Vergangenheit verschiedene Transformationsphasen durchlaufen, beispielsweise von Kohle zu Erdöl als Rohstoffbasis sowie eine zunehmende Wärmeintegration zur Senkung der Energiebedarfe und Emissionen. Viele Chemiebetriebe haben sich zunehmend auf Kernkompetenzen und Qualitätsprodukte fokussiert und sich vom Produkt- zum Lösungsanbieter gewandelt (Büchel et al. 2022). Die Handelsbilanz der Chemieindustrie hat sich dabei stark unterschiedlich über verschiedene Produktgruppen hinweg entwickelt. Während im Jahr 2024 vor allem die Sparten Fein- und Spezialchemikalien, die Polymerproduktion und die anorganische Grundstoffchemie deutliche Exportüberschüsse erzielten, wurden in der Kategorie Petrochemikalien und Derivaten zuletzt mehr importiert als exportiert (VCI 2025a). Gründe hierfür sind zunehmende Kapazitäten in der asiatischen Produktion, aber auch sinkende Ethanpreise und dadurch erstarkende Konkurrenz aus der US-amerikanischen Chemieproduktion.

Aktuell steht die Branche erneut vor großen Herausforderungen – dabei treibt insbesondere die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen die Energiekosten in die Höhe. Die chemische Industrie ist für rund 30 Prozent des Erdgasverbrauchs des verarbeitenden Gewerbes verantwortlich. Zusammengekommen machen Erdgas und Erdölderivate rund 80 Prozent des Energie- und Ressourcenbedarfs der Branche aus (VCI 2025c, Agora Industrie 2023). Infolge der Invasion Russlands in die Ukraine sind die Erdgaspreise sprunghaft angestiegen und liegen auch heute noch deutlich über dem Vorkrisenniveau. An den Erdölmärkten führten die Sanktionen gegen Russland und den Iran sowie Unsicherheiten in Bezug auf die US-Ölförderung zu Preisschwankungen und -anstiegen (VCI 2025c). Die steigenden Erdgaspreise haben die chemische Industrie in der Breite, insbesondere aber die energie- und ressourcenintensive Basischemie stark belastet. Der Verband der Chemischen Industrie weist für das Jahr 2023 gegenüber dem Jahr 2020 für den Einsatz von Naphtha beziehungsweise Rohbenzin einen Kostenanstieg um durchschnittlich rund 50 Prozent, für

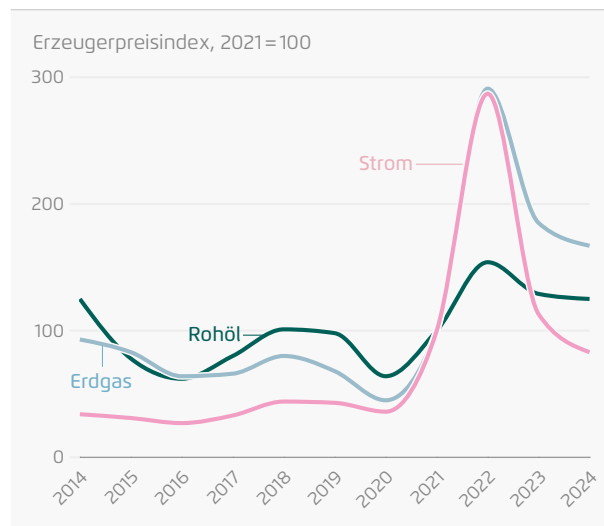
³ *Steamcracker* werden in Ludwigshafen, Gelsenkirchen, Köln-Worringen/Dormagen, Wesseling, Münchsmünster, Heide, Burghausen und derzeit noch in Böhlen betrieben. Für Böhlen wurde im Sommer 2025 die Stilllegung angekündigt. 11 der 13 *Cracker* werden auf Basis von Naphtha, LPG oder Gasöl betrieben, lediglich zwei *Cracker* können auch Ethan als Rohstoff verarbeiten (Scholz et al. 2023).

Erdgas sogar um rund 130 Prozent aus (VCI 2025c). Abbildung 2 zeigt die gewerblichen Erzeugerpreise für Erdgas und Rohöl im Vergleich zur Entwicklung des Börsenstrompreises.

Die höheren Erdgaspreise wirken sich auch auf die Strompreise aus – der verstärkte Ausbau Erneuerbarer Energien hat dazu beigetragen, den Preisanstieg abzumildern. Im Verhältnis zum Jahr 2020 lagen die Kosten der Branche für den Stromverbrauch im Jahr 2023 rund 30 Prozent höher (VCI 2025c). Auch hier ist der hohe Erdgaspreis Preistreiber beim Bezug von Netzstrom, zudem erzeugt die deutsche chemische Industrie einen hohen Anteil ihres Strombedarfs durch erdgasbetriebene Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Agora Industrie 2023). Entgegen häufig geäußerter Kritik dürften steigende CO₂-Preise im EU ETS I hingegen bislang nur einen geringen Einfluss auf die Energiekosten der Branche entfaltet haben. So erhielt die chemische Industrie für das Jahr 2022 kostenlose Emissionszertifikate in Höhe von rund 16,5 Millionen Tonnen – bei einer tatsächlichen Höhe von verifizierten, unter den EU ETS I fallenden Emissionen von rund 14,1 Megatonnen. Und auch im Jahr 2024 lag der Ausstattungsgrad der chemischen Industrie mit kostenlosen Zuteilungen bei 96,6 Prozent (DEHSt 2023, 2025a).⁴ Auch die Kosten durch indirekte Emissionen durch externen Strombezug werden der Branche zu großen Teilen erstattet. Die Chemieindustrie erhielt zuletzt den größten Anteil der Mittel zur Strompreiskompensation zur Erstattung indirekter CO₂-Kosten (DEHSt 2025b).

Neben hohen fossilen Energiepreisen belastet auch eine erstarkende globale Konkurrenz sowie sinkende Nachfrage aus Abnehmerbranchen infolge der schlechten Konjunkturlage im In- und Ausland die wirtschaftliche Lage der Industrie. Insbesondere China hat seine Produktionskapazitäten und seine globalen Umsatzanteile seit Beginn der 2000er-Jahre massiv ausgebaut. Anfang der 2000er-Jahre lag

Preisentwicklung von Rohöl, Erdgas und Strom → Abb. 2



Agora Industrie (2025) basierend auf Destatis (2025). Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte; Börsenpreis, indexiert (2021=100)

Chinas Anteil noch bei unter 10 Prozent des globalen Umsatzes, stieg aber bis 2022 rapide auf 40 bis 45 Prozent an. Während die chemische Produktion in Europa in den vergangenen Jahren leicht schrumpfte, wuchs die asiatische Produktion auch zwischen 2020 und 2023 weiter. Insgesamt bremsen die Industrierezession und die Energiekrise aber das Wachstum der Chemiebranche weltweit (VCI 2025d).

2.2 Heutiger Ressourcenbedarf und besondere Herausforderungen bei der Emissionsminderung

Aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs sowie der Abhängigkeit von fossilen Ressourcen steht die chemische Industrie vor besonderen Herausforderungen in Bezug auf den Klimaschutz und die Resilienz europäischer Lieferketten. Derzeit ist die Chemie der größte industrielle Verbraucher von fossilen Energien. Mit einem Anteil von 6,5 Prozent an den gesamtdeutschen Treibhausgasemissionen ist sie zugleich der zweitgrößte industrielle Emittent von Treibhausgasemissionen (VCI 2024a).

⁴ Krisenbedingt lag der Ausstattungsgrad mit freien Zuteilungen für die chemische Industrie in Deutschland in den Jahren 2022 und 2023 über 100 Prozent. Auch in den Jahren vor 2022 lag der Ausstattungsgrad der EU-ETS-I-pflichtigen Anlagen der deutschen Chemieindustrie mit freien Zuteilungen meist bei deutlich mehr als 90 Prozent der tatsächlichen Emissionen.

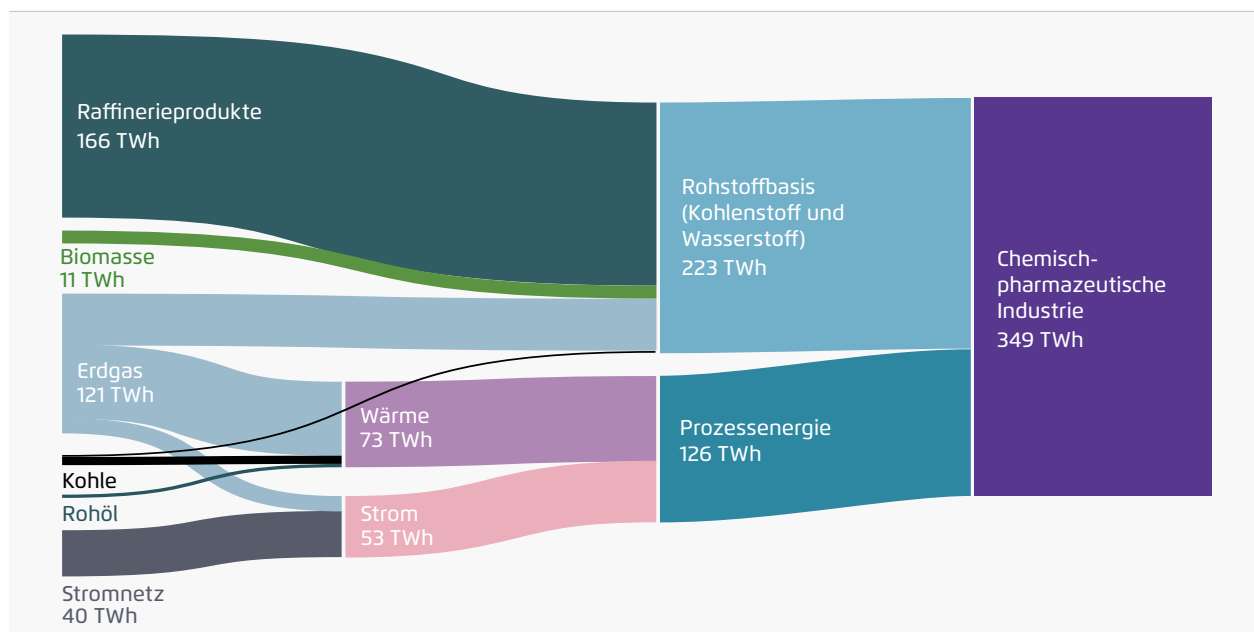
Die Verbrennung von Erdgas liefert rund 40 Prozent der Energiebedarfe der chemischen Industrie und ist damit derzeit ihr wichtigster Energieträger (VCI 2025c). Zuletzt hatte die Chemie mit rund 69 Terawattstunden einen Anteil von rund 30 Prozent am Erdgasverbrauch des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland (VCI 2025c). Auch die Verbrennung von Abfällen, Kohle oder auch Biomasse spielt vereinzelt eine Rolle. In vielen Fällen wird Erdgas in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) verbrannt, um Wärme und Strom bereitzustellen. KWK-Anlagen decken rund ein Viertel des Stromverbrauchs. Hinzu werden rund 40 Terawattstunden Strom aus dem Netz bezogen und beispielsweise zur Chlorproduktion genutzt (Agora Industrie 2023). Viele Produktionsprozesse insbesondere in der Basischemie sind von mittleren bis hohen Temperaturbedarfen geprägt. Besonders hohe Temperaturen werden derzeit vor allem in *Steamcrackern* benötigt, die Naphtha (ein Erdölprodukt) zu Basischemikalien (beispielsweise Ethylen) weiterverarbeiten. Dazu werden Nebenprodukte aus dem *Cracking*-Prozess

zurückgeführt und verbrannt. Die beim *Cracking* und bei anderen Prozessen resultierende Abwärme wird in der Regel weitergenutzt, um Prozesse, mit geringeren Temperaturen mit Wärme zu versorgen und beispielsweise Prozessdampf bereitzustellen. Prozessdampf, üblicherweise mit Temperaturen bis zu 500 Grad Celsius, wird in einer Vielzahl von Prozessen benötigt. Darüber hinausgehende Wärme- und Dampfbedarfe werden häufig durch erdgasbasierte KWK-Anlagen bereitgestellt. Auch elektrische Dampferzeuger werden vereinzelt in Zeiten günstiger Strompreise eingesetzt, um die konventionelle fossile Erzeugung zu entlasten und Kosten zu senken.

Die organische Chemie basiert auf rund 11 Millionen Tonnen Kohlenstoff, der bislang nahezu ausschließlich durch fossile Quellen bereitgestellt wird. Insgesamt macht diese stoffliche Nutzung fossiler Ressourcen rund 80 Prozent der Gesamtressourcenbedarfe der chemisch-pharmazeutischen Industrie aus (vgl. Abbildung 3). Dabei erfolgt die Nutzung von Naphtha, dem für die Chemie wichtigsten

Rohstoff- und Energieverbrauch in der chemischen Industrie in Deutschland, 2019

→ Abb. 3



Agora Industrie und Carbon Minds (2023) basierend auf VCI (2021a, 2021b). Die wichtigsten Rohstoff- und Prozessenergiequellen der chemisch-pharmazeutischen Industrie in Deutschland nach dem Energiegehalt (Heizwert). Raffinerieprodukte, die in anderen Sektoren verwendet werden, sind nicht abgebildet.

Erdölprodukt, an einigen Standorten in enger Anbindung an die Erdölverarbeitung in Raffinerien. Die Naphtha-Produktion ist eng an die Produktion von beziehungsweise die Nachfrage nach Kraftstoffen für den Verkehrssektor gebunden. Mit einer infolge der zunehmenden E-Mobilität sinkenden Kraftstoffnachfrage ist mit einer sukzessiven Schließung von Raffineriestandorten zu rechnen – ein Trend, der sich bereits heute abzeichnet. Erdölprodukte werden in der Chemie zu rund 90 Prozent stofflich genutzt. Erdgas wird nur zu etwa 25 Prozent stofflich genutzt – beispielsweise zur Herstellung von Ammoniak und Düngemitteln. Erdgas und Erdölderivate sind die wichtigsten Ressourcen der Chemieindustrie und machen zusammen rund 80 Prozent der Rohstoff- und Energiebedarfe aus.

Für eine ganzheitliche Betrachtung der Klimawirkung der chemischen Produktion müssen neben den direkten Emissionen aus der Produktion auch die Emissionen der vor- und nachgelagerten Lieferkette in den Blick genommen werden. Durch die stoffliche Nutzung fossiler Rohstoffe wird Kohlenstoff in Produkten zwischengespeichert. Dieser

Kohlenstoff wird nach der Nutzungsphase als CO₂ emittiert, wenn das Produkt in der Abfallbehandlung verbrannt wird. Auch im Falle der in Europa stark eingeschränkten Deponierung ist mit Emissionen zu rechnen – in diesem Fall in Form von Methan. Diese *End-of-Life*-Emissionen machen mehr als die Hälfte der gesamten Lebenszyklusemissionen von Chemikalien aus. Berücksichtigt man zudem die indirekten Emissionen in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen durch die Gewinnung von fossilen Rohstoffen (insbesondere Methanemissionen), belaufen sich die Gesamtemissionen der chemischen Produktion in einer Lebenszyklusbetrachtung in etwa auf das Drei- bis Vierfache der direkten Emissionen (Agora Industrie 2023). Um diese fossilen Emissionen nachhaltig zu vermeiden, müssen fossile Kohlenstoffbedarfe durch erneuerbare Quellen ersetzt werden (vgl. Kapitel 3.3). Im Produktionsprozess entsteht durch die Verbrennung fossiler Energien somit nur ein Teil der insgesamt mit Chemikalien verbundenen Emissionen. Die vor- und nachgelagerten Emissionen stehen in direktem Zusammenhang mit Chemieprodukten, sind in der nationalen Treibhausgasbilanz jedoch nur zum Teil erfasst.

3 Schlüsselstrategien für eine innovative, resiliente und klimaneutrale Chemie

Eine Herausforderung bei der Transformation der Chemie ist ihre große Komplexität. Für die große Bandbreite der in Deutschland produzierten Chemikalien braucht es produkt- und standortspezifische Strategien für Klimaneutralität und Wettbewerbsfähigkeit. Dennoch zeichnen sich eine Reihe von Leitplanken ab, die der Chemie als Kompass für den Umbau dienen können. Bei technischen Richtungsentscheidungen sind stets auch die Auswirkungen auf regionale Herausforderungen und Chancen an den Standorten (vgl. Kapitel 6) sowie Beschäftigungseffekte zu berücksichtigen. Auch die Resilienz der Produktion gegenüber geopolitischen Schocks ist eine wichtige Perspektive, gerade in Bezug auf Importabhängigkeiten bei fossilen Ressourcen.

Durch die Kombination von Erneuerbaren Energien, heimischen Rohstoffen und resilienten Lieferketten kann die Chemieindustrie zur Generierung von Negativemissionen beitragen und sogar klimapositiv werden. Diese Strategien sind zugleich mit einer Reihe von *Co-Benefits* verbunden, die Wertschöpfung und Arbeitsplätze am Standort und die Resilienz der Lieferketten positiv beeinflussen. Eine kostenoptimale Kombination verschiedener Schlüsselstrategien und Technologien sowie die daraus resultierenden *Co-Benefits* und Kosten wurden im Rahmen dieser Studie auf Basis einer Modellierung quantifiziert und werden in Kapitel 5 dargestellt und analysiert.

3.1 Elektrifizierung und Flexibilisierung des Energiebedarfs

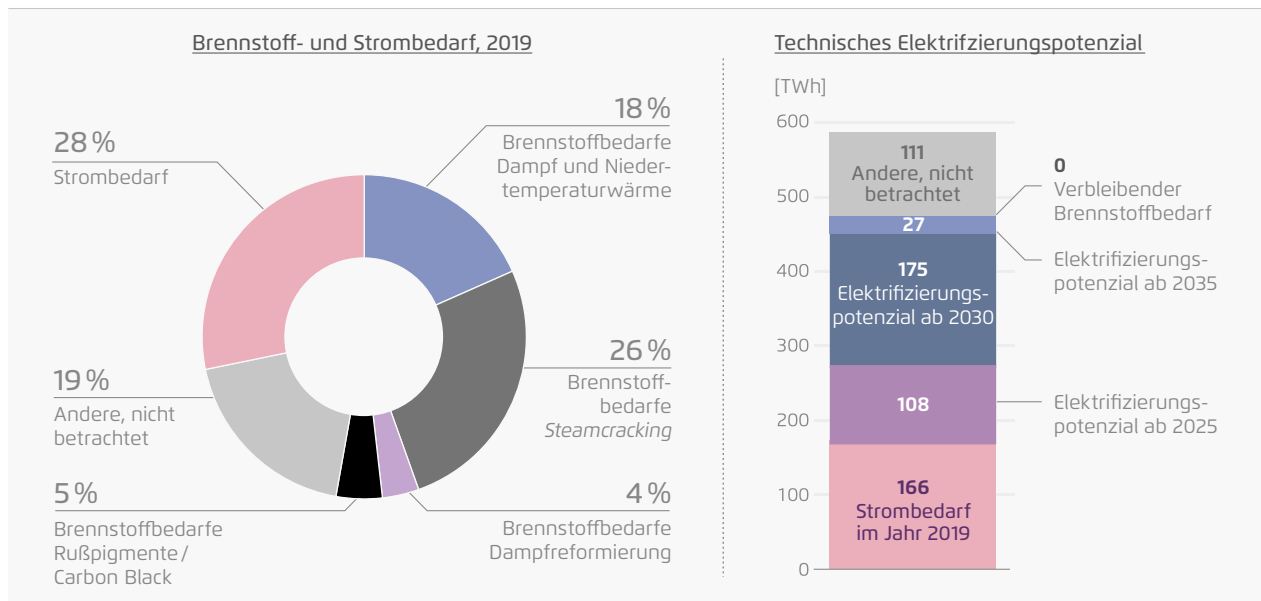
Die Dynamik beim Zubau Erneuerbarer Energien wie auch die sinkenden Gestehungskosten von grünem Strom zeigen: Die Elektrifizierung der Industrie bietet die Chance, die Energiekosten der Chemieproduktion mittelfristig zu senken. Zuletzt betrug der Anteil Erneuerbarer Energien am globalen Zubau von Stromerzeugungskapazitäten

92,5 Prozent (IRENA 2025). Gleichzeitig sind die Kosten für Solarmodule zwischen 2022 und 2024 um 30 Prozent gesunken (IEA 2024a). Batteriespeicher sind seit 2010 rund 90 Prozent günstiger geworden, und bis 2030 prognostiziert die Internationale Energieagentur eine weitere Kostendegression von bis zu 40 Prozent (IEA 2024b). Mit steigenden Anteilen an Erneuerbaren Energien im Stromsystem steigt auch die Anzahl an Stunden mit günstigen Preisen, in denen grüner Strom anstelle von teurerem fossilem Gas den Preis setzt. Damit auch die Chemieindustrie von dieser Dynamik profitieren und Kosten sowie Emissionen senken kann, muss sie ihren Energieverbrauch elektrifizieren, also von Gas auf Strom umsteigen, und flexibler als bisher mit dem Stromsystem interagieren.

Viele Technologien, die zur Elektrifizierung der Chemieindustrie benötigt werden, sind bereits verfügbar oder erlangen in den kommenden Jahren Marktreife. Wie aktuelle Analysen zeigen, sind in den kommenden zehn Jahren wesentliche technische Entwicklungen zu erwarten, die dazu beitragen, dass bis 2035 für nahezu alle Prozessenergiebedarfe in der chemischen Industrie strombasierte Prozesse zur Verfügung stehen (Fraunhofer ISI 2024). So kann davon ausgegangen werden, dass industrielle Großwärmepumpen mit Maximaltemperaturen von bis zu 200 Grad Celsius schon bald serienmäßig in den benötigten Leistungsklassen verfügbar sein werden. Auf höheren Temperaturniveaus bis 500 Grad Celsius kann Dampf in zunehmendem Maße über flexibel betriebene Elektrodenkessel in Kombination mit bestehenden Anlagen oder durch den Einsatz von Wärmespeichern elektrisch bereitgestellt werden (Fraunhofer ISI 2024). Prozesswärme oberhalb von 500 Grad Celsius wird vor allem in *Steamcrackern* zur Herstellung von Basischemikalien benötigt. Eine erste Demonstrationsanlage von BASF, Sabic und Linde in Ludwigshafen zeigt, dass die Elektrifizierung auch bei hohen Temperaturen technisch möglich ist (BASF 2024).

Brennstoff- und Strombedarf der europäischen Chemie und technisches Elektrifizierungspotenzial bis 2035

→ Abb. 4



Fraunhofer ISI (2024)

Die für die Wirtschaftlichkeit der Elektrifizierung entscheidenden Faktoren sind Energieeffizienz und Flexibilität. Die Umstellung auf strombasierte Verfahren bietet wesentliche Energieeffizienzpotenziale. Strombasierte Prozesse sind in der Regel effizienter als fossile Referenzanlagen. Die Effizienzsteigerung kann in einigen Fällen schon heute die Mehrkosten von Netzstrom bei Grundlastbetrieb gegenüber Gas kompensieren. Insbesondere Wärmepumpen bieten das Potenzial, den Primärenergiebedarf im Vergleich zu konventionellen Anlagen um bis zu drei Viertel zu verringern (Agora Industrie, Future Camp 2022). Auch die Flexibilisierung des Strombezugs kann dazu beitragen, Kosten zu senken, ohne dabei die Versorgungssicherheit nachgelagerter, kontinuierlicher Prozesse zu gefährden. Einige Chemieparks nutzen bereits elektrische Dampfkessel in Zeiten mit geringen Stromkosten. Auf diese Weise können Chemieunternehmen ihre fossile Wärmeproduktion zeitweise drosseln und Kosten und Emissionen sparen. Auch Wärmespeicher können sich Flexibilität zunutze machen, indem sie flexibel Wärme aus günstigem erneuerbarem Strom einspeichern und kontinuierlich Dampf ausspeichern, um nachgelagerte Prozesse zu versorgen. Die Energie wird dabei

in Form von Wärme gespeichert – beispielsweise in Spezialbeton oder Ziegelsteinen und kommt damit mit weniger seltenen Materialien aus als Batteriespeicher.

Ein flexibler Stromverbrauch senkt die Kosten des Stromsystems und steigert die Versorgungssicherheit. Ein flexibler Stromverbrauch trägt dazu bei, den Anteil teurer fossiler Energien am Strommix zu senken und den Bedarf an Reserveleistung zu reduzieren. Die Bundesnetzagentur hat in ihrem Bericht zur Versorgungssicherheit die Flexibilisierung des Verbrauchs – also die Möglichkeit, auf Marktsignale reagieren zu können – als zentrale Säule identifiziert (BNetzA 2025). Unter 500 Grad Celsius, wo Prozesswärme häufig in Form von Dampf oder Warmwasser zugeführt wird, ergeben sich gute Flexibilisierungsmöglichkeiten. In Prozessen, bei denen Wärme direkt im Prozess erzeugt und nicht in Form von beispielsweise Dampf zugeführt wird, sind Flexibilisierungspotenziale geringer. Ein Beispiel dafür sind elektrifizierte *Steamcracker*, deren Auslastung nur in engen Grenzen variiert werden kann. An dieser Stelle kann der Einsatz von Batteriespeichern eine Option sein, auf Marktsignale zu reagieren.

Die stärkere Einbindung Erneuerbarer Energien über die Elektrifizierung hat zur Folge, dass sich der Wärmebedarf aus Industriekraftwerken verringert.

Die Sektorenkopplung von Energie und Industrie hat zur Folge, dass Industriekraftwerke in Zukunft häufiger strom- als wärmegeführt betrieben werden, also vor allem Strom produzieren – und zwar dann, wenn die Produktionsmengen Erneuerbarer Energien gering und die Marktpreise entsprechend hoch sind. Insgesamt ist davon auszugehen, dass durch diese neue Aufgabe die jährlichen Betriebsstunden der Industriekraftwerke sinken. Industriekraftwerke müssen in diesem Sinne stärker als Teil eines effizienten Stromsystems begriffen werden und perspektivisch auf Wasserstoff umgestellt werden, um klimaneutral zu werden. Die Nachrüstung von *Carbon Capture and Storage* (CCS) an Industriekraftwerken in diesem Kontext ist mit einigen Risiken und Nachteilen behaftet: Vorgelagerte Emissionen aus der Gewinnung von Erdgas bleiben bestehen und auch die direkten Emissionen aus der Verbrennung können nicht vollständig abgeschieden werden. Auch kostenseitig ist CCS mit einigen Unsicherheiten behaftet, da Infrastrukturen noch aufgebaut werden müssen, Einspeicherkapazitäten in geologische Speicher absehbar begrenzt sein werden und sektorübergreifend ein

großer Bedarf aus verschiedenen Branchen nach CO₂-Einspeicherung besteht (vgl. Infobox CCS: *CO₂-Abspaltung und -Speicherung in der Chemie-industrie*, S. 19). In der chemischen Industrie sollte die Anwendung von CCS daher auf die Bereiche fokussiert werden, für die keine effizienteren Alternativen in Aussicht stehen.

3.2 Schließen des Materialkreislaufes

Kreislaufwirtschaft setzt schon vor dem Recycling an.

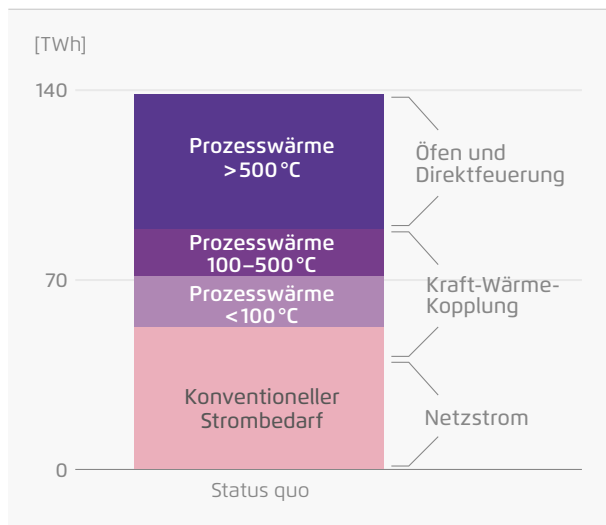
Eine Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten, eine höhere Materialeffizienz in Design und Produktion sowie neue Geschäftsmodelle wie Reparatur, Wiederverwendung oder Sharing können den Material- und Rohstoffbedarf deutlich senken. Damit sinken nicht nur Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, sondern es entstehen zugleich neue Wertschöpfungspotenziale. Solche Maßnahmen reduzieren Abfallmengen von vornherein und ergänzen damit das Recycling um eine wichtige Dimension der Ressourcenschonung (vgl. Agora Industrie, Systemiq 2023).

Bislang wird der in chemischen Produkten gebundene Kohlenstoff kaum durch Recycling in Kreislauf geführt, sondern stattdessen am Ende des Produktlebenszyklus in die Atmosphäre emittiert.

Kohlenstoff ist der zentrale Baustein, aus dem organische Chemikalien hergestellt sind. Der Großteil des in den Produkten gebundenen Kohlenstoffs stammt aktuell aus fossilen Rohstoffen. Der gegenwärtige Bedarf an Kohlenstoff der deutschen chemischen Industrie beläuft sich auf rund 11 Millionen Tonnen pro Jahr und wird überwiegend über Raffinerien und *Steamcracker* aus Öl beziehungsweise Naphtha und zum Teil auch über Flüssiggas (LPG) bereitgestellt (Agora Industrie 2023). Kunststoffabfälle werden in Europa bislang überwiegend verbrannt. Insbesondere außerhalb von Europa ist zudem die Deponierung von Abfällen gängige Praxis, hierbei entstehen klimaschädliche Methanemissionen und darüber hinausgehende Schäden für Mensch und Umwelt. Kunststoffrecycling macht derzeit nur einen geringen Anteil an der Abfallverwertung aus. Unter der Annahme, dass der in Produkten enthaltene

Wärme- und Strombedarf

→ Abb. 5



Agora Industrie (2025) basierend auf Agora Industrie und Carbon Minds (2023)

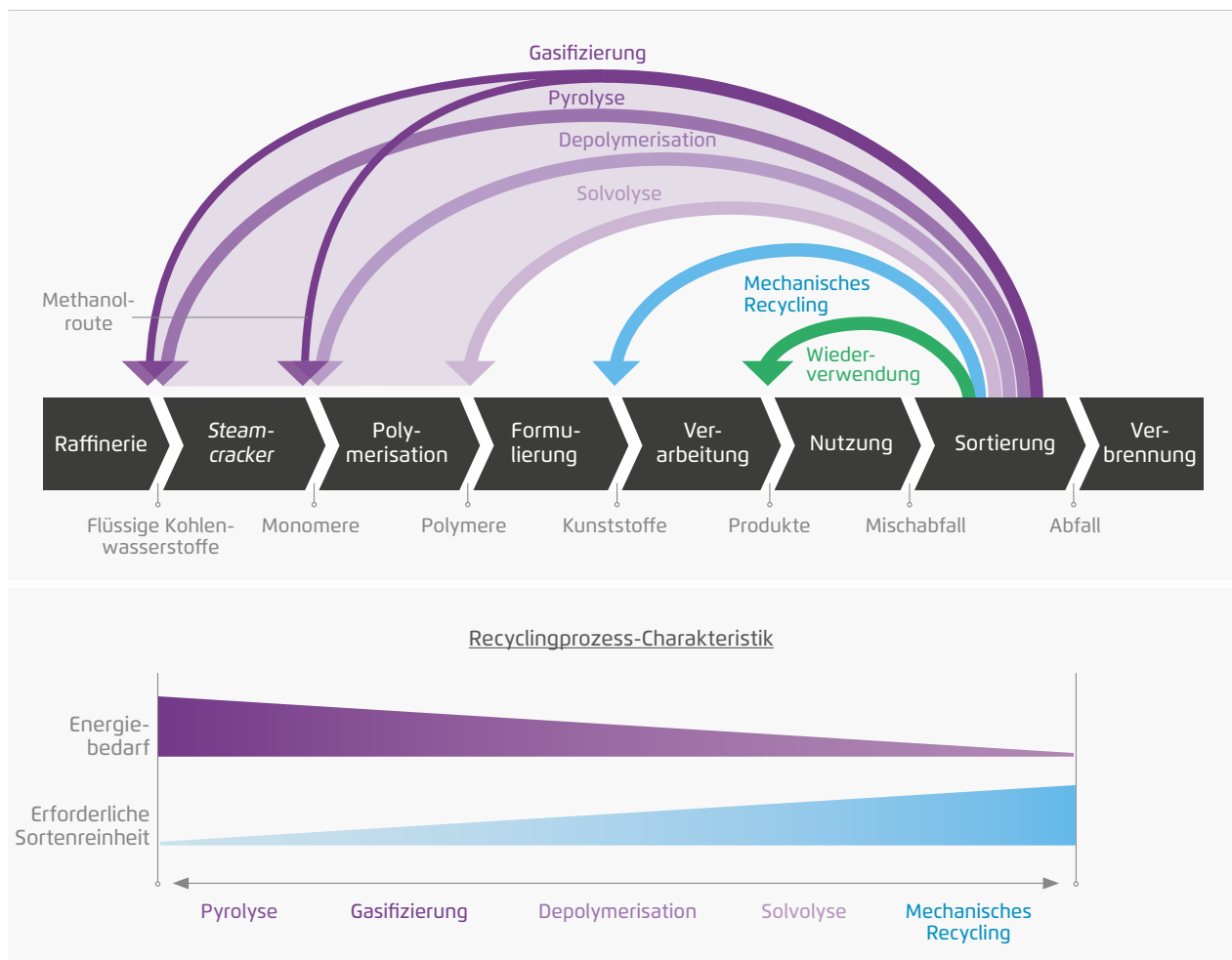
Kohlenstoff nach Ende der Nutzungsphase als CO₂ emittiert wird, machen die Emissionen am Ende der Lebensdauer mehr als die Hälfte der Gesamtemissionen entlang des Lebenszyklus von Kunststoffen aus (Agora Industrie 2023). Durch eine Steigerung des Recyclings bei der Abfallverwertung können nicht nur Emissionen in die Atmosphäre verhindert, sondern der Kunststoffabfall kann auch als wertvolle Ressource genutzt werden.

Die stoffliche Wiederverwertung von Kunststoffabfällen über das mechanische – und in begrenztem Maße das chemische – Recycling, ist von zentraler

Bedeutung, um die Ressourceneffizienz zu steigern und so den Bedarf an neu zugeführtem Kohlenstoff zu reduzieren. Sowohl mechanisches als auch chemisches Recycling führen Kohlenstoffe am Ende des Produktlebenszyklus in den Produktionskreislauf zurück (vgl. Abbildung 6). Bisher kommt nahezu ausschließlich das mechanische Recycling von Kunststoffprodukten zur Anwendung. Hierbei werden Abfälle sortiert, gereinigt und eingeschmolzen. Die entstehenden Rezyklate werden zur Herstellung neuer Produkte verwendet. Beim mechanischen Recycling bleibt die molekulare Struktur der Polymere weitestgehend intakt. Das macht

Komplementäre Technologien einer energie- und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft

→ Abb. 6



Agora Industrie und Carbon Minds (2023)

den Prozess vergleichsweise effizient, schränkt aber auch die Weiterverwendbarkeit der erzeugten Rezyklate ein. Eine hochwertige Weiterverwendung des Recyclingmaterials ist nur bei besonders reinen Abfallströmen möglich. Bislang werden Rezyklate jedoch häufig zur Produktion von qualitativ weniger anspruchsvollen Produkten wie Schallschutzwänden, Paletten oder Kabelrohren verwendet (Huckestein, Plesnivy 2000). Das etablierte Recyclingsystem rund um PET-Flaschen zeigt indes, dass durch Produktstandards sowie Sammel- und Sortiersysteme hohe Recyclingquoten von nahezu 100 Prozent sowie Rezyklat-Einsatzquoten bei der Herstellung von PET-Produkten von über 50 Prozent erreicht werden können (GVM 2024).

Die bestehenden Recyclingpotenziale werden bislang kaum ausgenutzt. Auf europäischer Ebene wird die tatsächliche Recyclingrate für Kunststoffe auf lediglich rund 15 Prozent geschätzt (Agora Industrie 2022). Deutlich höher liegende Zahlen aus öffentlichen Statistiken täuschen darüber hinweg, dass ein hoher Anteil der Kunststoffabfälle weiterhin in der Verarbeitung aussortiert und verbrannt wird. Darüber hinaus zeigen Materialflussanalysen, dass die tatsächliche Abfallmenge in Europa strukturell unterschätzt wird (Agora Industrie 2023). Um ein effizienteres mechanisches Recycling von Kunststoffabfällen zu ermöglichen, ist eine Reihe von Verbesserungen in der Produktion sowie beim Abfallmanagement notwendig. Die Recyclingfähigkeit von Kunststoffabfällen kann zum Beispiel durch optimierte Verpackungsdesigns (zum Beispiel Verzicht auf schwer trennbare Kunststoffverbunde oder nicht-recyclingfähige schwarze Kunststoffe) verbessert werden. Weiterhin kann die sortenreine Sammlung von Abfallströmen zu höheren Rezyklatqualitäten führen.

Das chemische Recycling stellt eine wichtige Ergänzung zum mechanischen Recycling dar, um die Herstellung von Kunststoffprodukten mit höheren Qualitätsanforderungen zu ermöglichen. Anders als das mechanische Recycling wird das chemische Recycling noch nicht im großtechnischen Maßstab angewandt. Beim chemischen Recycling werden die Kunststoffabfälle wieder in

ihre chemischen Bausteine zerlegt. Die so gewonnenen Stoffe können flexibler als beim mechanischen Recycling wieder zu Produkten mit hochwertigen Qualitätseigenschaften weiterverarbeitet werden. In Abhängigkeit des jeweiligen Verfahrens können die mittels chemischen Recyclings erzeugten Rohstoffe wieder an verschiedenen Stellen in den Produktionsprozess eingebracht werden (vgl. Abbildung 6). Die Gasifizierung und Pyrolyse bieten hierbei große Potenziale, da ihre Anforderungen an Abfälle vergleichsweise gering sind und ihre Produkte Synthesegas und Pyrolyseöl in Methanol-Anlagen und *Steamcrackern* – und damit in weiten Bereichen der chemischen Industrie – eingesetzt werden können. Die Schattenseite von Pyrolyse und Gasifizierung ist der hohe Energieaufwand. Verfahren wie die Solvolyse, beispielsweise zum Recycling von Matratzen, oder auch die Depolymerisation sind energieeffizienter, haben aber aufgrund der begrenzten Mengen der einsetzbaren Abfallfraktionen ein geringeres Potenzial. Die chemischen Recyclingverfahren sind somit als komplementäre Technologien zu verstehen, die dann sinnvoll eingesetzt werden können, wenn Kunststoffabfälle nicht mechanisch recycelt werden können (zum Beispiel Verbundkunststoffe). Selbst bei einem ambitionierten Hochlauf der technischen Recyclingkapazitäten ist jedoch davon auszugehen, dass ein relevanter Anteil der entstehenden Kunststoffabfälle nicht recycelt werden kann, da die Kunststoffe aufgrund der Anwendung nicht separat gesammelt oder abgetrennt werden können (zum Beispiel im Falle von Klebstoffen, Farben und bestimmten Verbundkunststoffen).

Kunststoffabfälle, die nicht recycelt werden können, sollten über intelligentes Produktdesign vermieden oder, sofern das nicht möglich ist, unter CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) verbrannt werden. Das Produktdesign hat einen entscheidenden Einfluss auf die Recyclingfähigkeit von Endprodukten (*Design for Recycling*). Auch auf lange Sicht werden jedoch anderweitig nicht verwertbare Abfälle verbleiben. Die Anwendung von CCS an Müllverbrennungsanlagen ist somit eine wichtige Strategie zur Emissionsvermeidung.

→ CCS: CO₂-Abspaltung und -Speicherung in der Chemieindustrie

Die Abspaltung von CO₂ in chemischen Produktionsprozessen ist in einigen Fällen sinnvoll – unter anderem aufgrund begrenzter Injektionskapazitäten aber nur für bestimmte Anwendungsfelder möglich.

Aktuelle Analysen von Agora Industrie (2025, angekündigt) zeigen, dass insbesondere die Injektionskapazitäten für abgespaltenes CO₂ kurz- und mittelfristig begrenzt sein werden. Im Betrieb oder mit einer finalen Investitionsentscheidung versehen sind bisher Einspeicherprojekte mit einer jährlichen Injektionskapazität von insgesamt etwa 10 Megatonnen CO₂. Neue oder noch nicht weitgehend geplante Projekte werden aufgrund einer durchschnittlichen Projektentwicklungszeit von im Mittel zehn Jahren erst deutlich nach 2035 zur Verfügung stehen. Um den von der EU-Kommission für 2035 erwarteten Speicherbedarf in Höhe von 144 Megatonnen CO₂ pro Jahr zu decken, müssten alle Speicherprojekte mit fortgeschrittenem Planungsstadium umgesetzt werden – eine aus logistischer, technischer und wirtschaftlicher Sicht optimistische Annahme. Die gesamte verfügbare Einspeicherleistung ist somit für alle Stützjahre ab 2030 mit großen Unsicherheiten behaftet. Für 2045 geht die EU-Kommission in einem ambitionierten Klimaschutzenszenario (S3) von jährlichen Einspeicherbedarfen in Höhe von rund 250 Megatonnen CO₂ aus, was einen ambitionierten Ausbau der Injektions- und Speicherkapazitäten voraussetzt. Die in dieser Studie angenommenen Einspeicherkapazitäten von rund 28 Megatonnen CO₂ pro Jahr für die deutsche Chemieindustrie entsprechen somit mehr als zehn Prozent der gesamten für die EU angenommen Injektionskapazitäten über alle Anwendungsbedarfe hinweg.

Zudem bestehen große Risiken unvorhergesehener Kostensteigerungen, welche die Gesamtkosten für die CO₂-Abspaltung und -Speicherung deutlich über das bislang angenommene Niveau steigern könnten.

Aktualisierte Kostenschätzungen auf Basis von Planungsdaten zeigen, dass die Transport- und Speicherkosten für CO₂ in der Praxis häufig deutlich höher ausfallen als zunächst angenommen, teilweise bis zu dreimal so hoch. Auf Basis von aktuellen Marktdaten muss von Transport- und Speicherkosten von Höhe von mindestens 80 Euro pro Tonne CO₂ ausgegangen werden (Agora Industrie 2025, angekündigt). Außerdem zeigen Erfahrungen aus bestehenden Projekten, dass geologische Risiken häufig erst in der Phase der Einspeicherung auftreten, was zu Kostensteigerung und geringeren Kapazitäten führen kann. Es besteht somit das Risiko, dass zu optimistische Kostenschätzungen die Kosteneffizienz von CO₂-Abscheidung anstelle von Vermeidung zu positiv bewerten und dass es im Laufe der Projektentwicklung zu deutlichen Kostensteigerungen kommt.

Vor diesem Hintergrund sollte die Nutzung von CCS in der chemischen Industrie auf zwei zentrale Anwendungsbereiche fokussiert werden: auf Emissionen, die anderweitig nicht vermeidbar sind, sowie auf Produktionsprozesse zur Verarbeitung von Biomasse, die einen Überschuss von biogenem CO₂ freisetzen.

Bei der Verarbeitung von Biomasse zu biobasiertem Methanol oder Ethanol kann an verschiedenen Stellen im Prozess überschüssiges CO₂ frei werden. Wird dieses biogene CO₂ dauerhaft gespeichert, können Negativemissionen erzielt, also dauerhaft CO₂ der Atmosphäre entnommen werden. Ein steigender Anteil von biogenem Kohlenstoff in verbrannten Abfallmengen zählt ebenfalls auf die Generierung von Negativemissionen ein.

Die Dimensionierung der CO₂-Transportinfrastruktur ist ein Balanceakt: Sie muss den Abtransport zum Teil dezentraler (biogener) CO₂-Quellen ermöglichen und gleichzeitig kosteneffizient sein. Der Aufbau einer CO₂-Transportinfrastruktur ist vor allem dort sinnvoll, wo anderweitig nicht vermeidbare CO₂-Emissionen in größeren Mengen anfallen. Eine Herausforderung ist die voraussichtlich stärker dezentrale Verarbeitung von Biomasse zu Methanol (Biomassegasifizierung und Methanolsynthese).

Hier sind relevante Mengen biogener CO₂-Emissionen zu erwarten, die zur Generierung von Negativemissionen genutzt werden können. Sofern ein direkter Anschluss an die CO₂-Infrastruktur nicht möglich ist, kann je nach Anlagengröße der Transport per Schiene oder sogar LKW zum nächstgelegenen CO₂-Knotenpunkt in Betracht gezogen werden.

Der Einsatz von CCS birgt Risiken durch *fossile Lock-ins*. Der Aufbau einer umfangreichen CCS-Infrastruktur kann Anreize für einen längeren Betrieb fossiler Anlagen bieten, für die bereits heute oder in naher Zukunft fossilfreie Alternativen zur Verfügung stehen. Ein Beispiel ist die Nutzung von CCS an industriellen Gaskraftwerken in der Chemieindustrie: Langfristig sind die Einbindung Erneuerbarer Energien, die Elektrifizierung und – in geringen Mengen – der flexible Einsatz von grünem Wasserstoff die ressourcen- und kosteneffizienteste Option zur Bereitstellung von Prozesswärme. Durch den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur und den (zunächst temporären) Einsatz von CCS an Gaskraftwerken könnte die Einbindung Erneuerbarer Energien, die Elektrifizierung und die Flexibilisierung des Betriebs von Kraftwerkskapazitäten unterminiert werden. Zudem müssen teure Infrastrukturen geschaffen und CCS-Anlagen mindestens zu Beginn gefördert werden, damit sie wettbewerbsfähig betrieben werden können. Mit der Klimaneutralität ist der Einsatz von fossilem Gas aufgrund von der grundsätzlich nicht vollständigen Abscheidung von CO₂-Emissionen auch mit CCS sowie aufgrund vorgelagerter Methanemissionen nicht vereinbar. Vor dem Hintergrund, dass der Umbau zur Klimaneutralität ganz wesentlich in den nächsten 20 Jahren ablaufen muss, ist die Nutzung von CCS als Übergangstechnologie zur Vermeidung fossiler Emissionen grundsätzlich möglich, aber aufgrund der hohen Investitionsbedarfe wenig aussichtsreich.

Mit einem steigenden Anteil von erneuerbarem Kohlenstoff in nicht-recyclingfähigen Abfällen wandelt sich die CO₂-Abscheidung in Müllverbrennungsanlagen von einer Strategie zur Emissionsvermeidung zu einer Maßnahme, die zur Generierung von Negativemissionen beiträgt. Auf diesem Weg kann durch Biomasse aufgenommenes und in Produkten temporär gespeichertes CO₂ dauerhaft der Atmosphäre entnommen werden und somit zur Generierung von Negativemissionen beitragen. In den bestehenden Produktionsstrukturen wird jedoch ein großer Anteil der Produktion ins Ausland exportiert und entzieht sich daher der Kontrolle über mögliches Recycling oder eine Verbrennung mit CO₂-Abscheidung. Zudem muss berücksichtigt werden, dass in der Praxis keine Abscheideraten von 100 Prozent erreicht werden können. Um nachgelagerte fossile Emissionen effektiv zu vermeiden, ist der Umstieg auf erneuerbare Kohlenstoffquellen daher alternativlos (vgl. Kapitel 3.3).

3.3 Umstieg auf erneuerbare Kohlenstoffe

Bestehende Kohlenstoffbedarfe lassen sich nicht ausschließlich auf Basis geschlossener Kohlenstoffkreisläufe decken. Das Recycling von Kunststoffabfällen ist ein elementarer Baustein, um den Bedarf an Kohlenstoff für die organische Chemie zu decken. Gleichzeitig sind Strategien zur Minderung des Bedarfs an Chemikalien wichtig. Selbst bei einem umfassenden Kreislaufwirtschaftsansatz ist eine vollständige Schließung des Kohlenstoffkreislaufs jedoch nicht möglich, da ein großer Anteil der produzierten Kunststoffe ins Ausland exportiert und somit dem heimischen Kohlenstoffkreislauf entzogen wird. Um die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffimporten zu reduzieren und die fossilen Emissionen am Ende des Lebenszyklus zu vermeiden, muss der verbleibende Bedarf an Kohlenstoff auf erneuerbare Quellen umgestellt werden. Hierzu kommen die Nutzung von

Biomasse und *Carbon Capture and Use* (CCU) infrage. Bei CCU wird CO₂ in Kombination mit erneuerbarem Wasserstoff zur Produktion von chemischen Grundstoffen wie Methanol, Ameisensäure oder Polyolen genutzt. Die Hebel für den vollständigen Umstieg von fossilen auf erneuerbaren Kohlenstoff sind qualitativ in Abbildung 7 dargestellt.

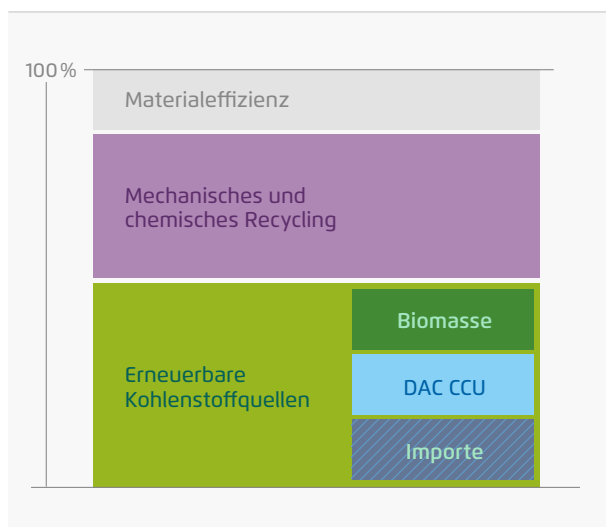
Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff (*Carbon Capture and Utilization*, CCU) ist besonders kostenintensiv und dient dem Klimaschutz nur im Falle von biogenem oder atmosphärischem CO₂. Zur Weiterverarbeitung von CO₂ zu Chemikalien wie Methanol werden große Mengen an grünem Wasserstoff benötigt. Grüner Wasserstoff wiederum benötigt große Mengen Grünstrom und investitionsintensiven Infrastrukturen und wird auch auf absehbare Zeit vergleichsweise teuer bleiben. Auch die Abscheidung von CO₂ geht mit großen Energiebedarfen und damit Kosten einher. Aufgrund einer geringen Konzentration von CO₂ in der Luft ist zudem die Abscheidung aus der Atmosphäre (*Direct Air Carbon Capture and Use*, DACCU) sehr energieintensiv. Eine Abspaltung und Nutzung von fossilem CO₂ an industriellen Punktquellen ist weniger energieintensiv als die Abscheidung aus der Luft, leistet

aber keinen Beitrag zum Klimaschutz: Wird fossiles CO₂ abgespalten und für die chemische Produktion verwendet, verzögert sich lediglich die Einbringung in die Atmosphäre. Tatsächlich könnte die Nutzung fossiler Punktquellen einem effektiven Klimaschutz sogar schaden, wenn die damit verbundenen fossilen *Lock-ins* den Ausstieg aus den fossilen Energien verzögern. Auch in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der EU wird die Nutzung von CO₂ aus fossilen Punktquellen allenfalls als Zwischenlösung angesehen. Mit dem Abschmelzen der Emissionsobergrenze des EU ETS I auf null bis zum Jahr 2040 endet auch die Möglichkeit, fossiles CO₂ aus industriellen Punktquellen über CCU zu nutzen und damit als vermieden zu deklarieren.

Die Nutzung von Biomasse als erneuerbare Kohlenstoffquelle bietet noch große Potenziale. Bislang wird Biomasse nur in geringem Umfang als Rohstoff für die chemische Industrie eingesetzt. Die geringe bestehende Biomassenachfrage wird vor allem direkt für die Produktion von Spezialchemikalien wie Wasch-, Reinigungs- und Schmiermitteln verwendet. Dabei werden aktuell vor allem Fette und Öle stofflich genutzt (rund 47 Prozent der stofflich eingesetzten Biomassen in der deutschen chemischen Industrie). Stärke und Zucker machen zusammen rund 17 Prozent der stofflich genutzten Biomasse in der Chemie aus, Zellstoff rund 15 Prozent (Agora Industrie 2023).

Hebel für den Umstieg auf erneuerbaren Kohlenstoff

→ Abb. 7

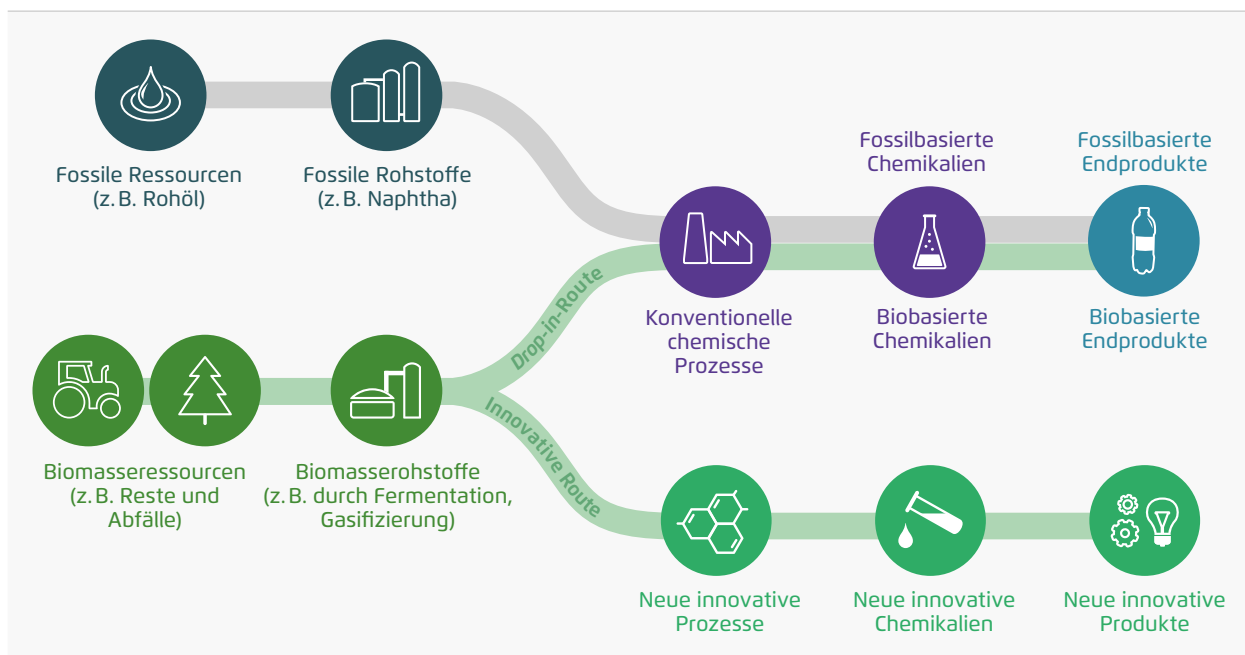


Agora Industrie (2025). Qualitative Darstellung; DAC = CO₂-Abscheidung aus der Luft; CCU = CO₂-Abscheidung und -Nutzung

Die tatsächliche Nutzbarkeit von Biomasse für die chemische Industrie ist jedoch deutlich breiter und lässt sich in zwei unterschiedliche Ansätze unterteilen. Auf Basis von Biomasse können sogenannte *Drop-in*-Chemikalien, wie beispielsweise biobasiertes Ethylen erzeugt werden, also biobasierte Basischemikalien oder Zwischenprodukte, welche chemisch identisch zu einer bestehenden fossilbasierten Chemikalie sind. Diese Zwischenprodukte lassen sich nahtlos in bestehende nachgelagerte Prozessketten einfügen, erfordern keine Veränderungen in den Prozessen, Infrastrukturen oder Produkteigenschaften in der nachgelagerten Wertschöpfungskette und bedienen einen bestehenden Markt. Zur Herstellung dieser Zwischenprodukte steht eine Reihe von Verfahren zur Verfügung:

Technologiepfade zur Herstellung biobasierter chemischer Produkte

→ Abb. 8



Agora Industrie und Carbon Minds (2023)

Über die Gasifizierung und Fermentation, die in der Modellierung dieser Studie berücksichtigt wurden, können Synthesegas, Methanol und Ethanol hergestellt werden, die in einem weiteren Schritt beispielsweise zu Ethylen verarbeitet werden. Alternativ können innovative biochemische Produktalternativen entwickelt werden, die kein identisches fossilbasiertes Äquivalent haben, aber vergleichbare oder sogar bessere Produkteigenschaften aufweisen. Da diese Verfahren auf die Nutzung der eingesetzten Biomasse zugeschnitten sind, können sie diese unter Umständen deutlich effizienter nutzen. Gleichzeitig erfordern sie in manchen Fällen den Aufbau neuer Produktionsrouten und Absatzmärkte. Um die Produktpalette und die Anwendungsbereiche dieser innovativen Verfahren zu erweitern und in großen industriellen Maßstäben zu skalieren, sind zusätzliche Forschung sowie der Zugang zu Kapital erforderlich. Damit Biomasse mittel- und langfristig eine nachhaltige Alternative zur Deckung der Kohlenstoffbedarfe darstellen kann, ist zudem ein Ausbau der nachhaltig nutzbaren Potenziale notwendig (vgl. Infobox *Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse in Deutschland*, S. 23).

Zur Biomasseverarbeitung stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die sich danach unterscheiden, welche Arten von Biomasse sie verarbeiten und welche Produktgruppen sie herstellen können. Die Fermentation von Zucker und Stärken sowie die anaerobe Vergärung von Abfall- und Reststoffen sind biotechnologische Prozesse, die bereits heute zur Produktion von Bioethanol und Biogas etabliert sind. Im Falle der Nutzung von Reststoffen kommen hier bislang aber vor allem nassbiogene Abfälle aus der Landwirtschaft (wie beispielsweise Gülle) zum Einsatz, während lignozellulosehaltige Biomasse (wie Holz und Stroh) vorbehandelt werden muss, um eine Fermentation zur Chemikalienproduktion zu ermöglichen. Über die Fermentationsroute kann Biomasse zu Bioethanol und in einem weiteren Schritt durch Dehydratisierung zu biobasiertem Ethylen verarbeitet werden, das in seinen stofflichen Eigenschaften mit fossilem Ethylen identisch ist. Alternativ kann die Fermentation von Biomasse auch zur Herstellung alternativer Biochemikalien oder Biokunststoffe verwendet werden, also neuartigen Produkten, die die Eigenschaften der Biomasse gezielt einsetzen, beispielsweise PLA auf Basis von Milchsäure. Eine

→ Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse in Deutschland

In Deutschland werden jährlich rund 185 Megatonnen Trockenmasse (TM) Biomasse produziert beziehungsweise mobilisiert.⁵ Ein Großteil davon wird als Futtermittel verwendet (circa 45 Prozent) sowie zur Erzeugung von Bioenergie (circa 25 Prozent). Nur knapp ein Fünftel der heimischen Biomasse wird stofflich genutzt, wobei es sich zumeist um Holzprodukte handelt. Um das Potenzial einer ökologisch tragfähigen Biomassenutzung durch die Chemie im Kontext der insgesamt verfügbaren Biomassepotenziale einzuordnen, können grundsätzlich drei verschiedene Quellen unterschieden werden: die Nutzung von bisher ungenutzten biogenen Reststoffen, die Umwidmung bestehender Biomasseströme in andere Anwendungsbereiche und die Erschließung neuer Biomassepotenziale. Im Sektor Forst und Holz fällt Restholz bei der Holzernte (Waldrestholz, Rinde), in Sägewerken (Sägespäne) und der Holzverarbeitung an. Eine erste Analyse der stofflichen und energetischen Verwendung von Restholz für das Jahr 2020 lässt darauf schließen, dass aktuell bestehende Restholzpotenziale bereits nahezu vollständig ausgenutzt werden (Mantau 2023). Ungenutzte, aber mobilisierbare Potenziale bestehen dagegen vor allem bei landwirtschaftlichen Nebenprodukten und Reststoffen mit circa 16,8 Megatonnen TM sowie Siedlungsabfällen und Klärschlamm mit circa 6,8 Megatonnen TM (Hennenberg et al. 2023).

Das Potenzial zur Umwidmung von Stoffströmen und Landflächen besteht vor allem dort, wo die energetische Nutzung in den nächsten Jahrzehnten durch effizientere, klimafreundliche Alternativen abgelöst werden kann. Derzeit werden in Deutschland circa zwei Millionen Hektar Ackerland zum Anbau von Energiepflanzen genutzt. Diese Energiepflanzen dienen vor allem der Erzeugung von Biogas zur Strom- und Wärmeproduktion sowie der Produktion von Kraftstoffen für den Verkehrssektor. Durch den sukzessiven Ausstieg aus diesen Ackerkulturen können Landnutzungskonflikte entschärft und stattdessen mehrjährige Pflanzen angebaut werden, die sich für die Nutzung in der Chemieindustrie eignen und die Fläche gleichzeitig nachhaltiger nutzen. Eine derartige Möglichkeit zur nachhaltigen Umwidmung bestehender landwirtschaftlicher Nutzfläche besteht im Ausbau von Flächen mit schnellwachsenden Gehölzen in Form von Agroforstsystemen oder Kurzumtriebsplantagen. Diese Form der Landnutzung hat positive Nebeneffekte in den Bereichen Biodiversität, Erosionsschutz, Klimaanpassung und Stickstoffbelastung der Umwelt. Eine weitere Quelle nachhaltiger Biomasse können mittelfristig Paludikulturen sein. Für ein klimaneutrales Deutschland ist die Wiedervernässung eines Großteils der landwirtschaftlich genutzten Moore auf einer Fläche von über eine Million Hektar notwendig. Auf den wiedervernässten Flächen kann mit Pflanzen wie zum Beispiel Schilf und Rohrkolben Biomasse für die stoffliche Nutzung erzeugt werden.

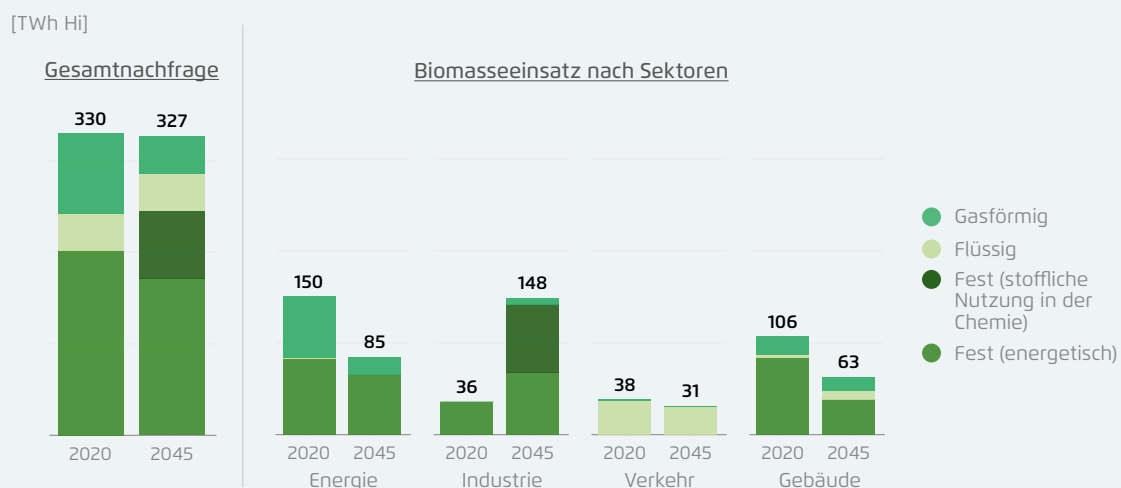
Die Szenario-Modellierung *Klimaneutrales Deutschland* der Agora Think Tanks zeigt, wie die bestehende Biomasse- und Landnutzung in Deutschland effizient umstrukturiert werden kann, sodass die Gesamtnachfrage konstant bleibt und gleichzeitig neue Bedarfe in der Industrie gedeckt werden können (vgl. Abbildung 9, Agora Think Tanks 2024). In diesem Szenario wird die Nutzung von Biogas im Energiesektor langfristig zurückgefahren, feste Biomasse wird in begrenztem Maße in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) für Wärmenetze ohne Anschluss an die Wasserstoffinfrastruktur eingesetzt. Im Verkehrssektor wird die Nutzung von Biokraftstoffen im Straßenverkehr durch die zunehmende Elektromobilität reduziert und durch die Nutzung im Schiffs- und Luftverkehr ersetzt. Im Gebäudebereich wird ein gewisser Teil der energetischen Nutzung von Biomasse durch kostengünstigere Wärmepumpen verdrängt. Gleichzeitig steigt die Nutzung von Holz im Bau, was auch zu einer langfristigen CO₂-Bindung in den Gebäuden beiträgt.

⁵ Beruhend auf dem *Bioökonomie-Monitoring 2015* (Bringezu et al. 2020); die Größenordnungen sind weiterhin gültig.

Neben der Chemieindustrie werden künftig auch andere Sektoren erneuerbaren Kohlenstoff benötigen, beispielsweise die Metallindustrie. Außerdem variiert die Nutzbarkeit biogener Rohstoffe je nach der Art der Biomasse. Eine detaillierte Analyse der ungenutzten Potenziale nach Art der Biomasse, räumlicher Verteilung sowie ihrer Eignung in unterschiedlichen Industrieprozessen ist daher notwendig. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und wachsenden Nachfrage nach Biomasse sollten die verfügbaren Stoffströme möglichst effizient genutzt werden und der Kaskadennutzung größere Priorität eingeräumt werden. Das heißt, Biomasse muss vor allem dort eingesetzt werden, wo keine alternativen oder effizienteren Möglichkeiten zur Defossilisierung zur Verfügung stehen. Außerdem muss auf eine Mehrfachnutzung und Wiederverwertung von Biomasse abgezielt werden. Eine energetische Nutzung sollte erst am Ende dieser Nutzungskaskade stehen.

Einsatz von Biomasse in den verschiedenen Sektoren* im Szenario Klimaneutrales Deutschland

→ Abb. 9



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). * ausgenommen Bauholz

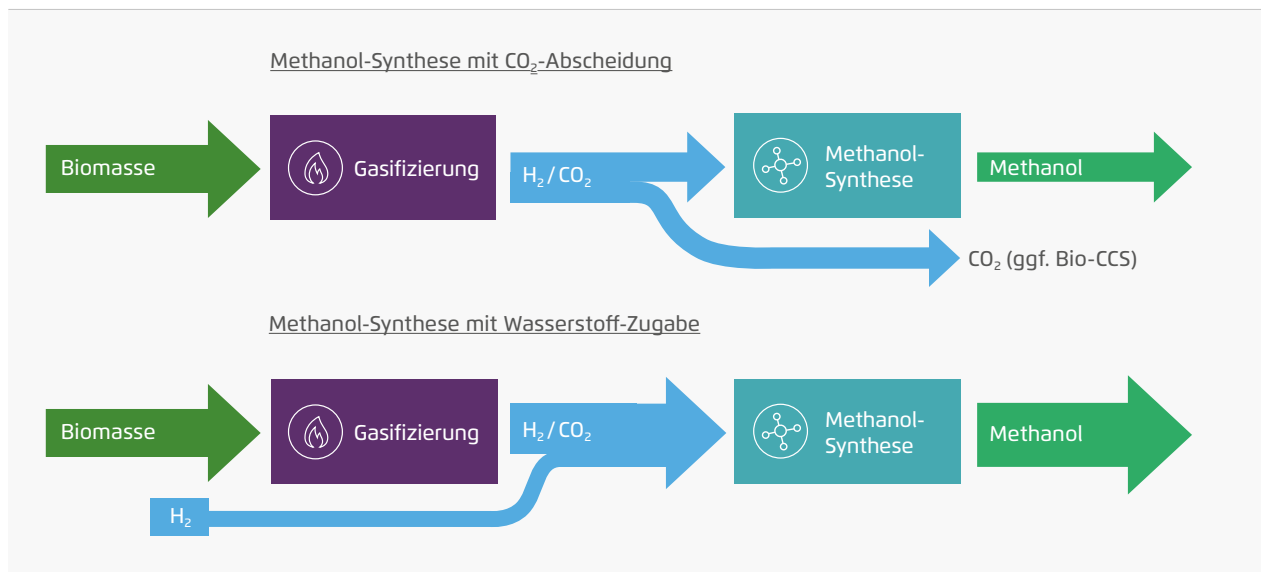
weitere Möglichkeit neben der biotechnologischen Verarbeitung für Biomasse stellen thermochemische Verfahren wie die Pyrolyse oder die Gasifizierung dar. In beiden Prozessen werden die in der Biomasse enthaltenen molekularen Strukturen unter hohem Energieaufwand – also unter hohem Druck und bei hohen Temperaturen – in ihre chemischen Bausteine zerlegt, um nutzbare Ausgangsstoffe zu erzeugen. Bei der Pyrolyse entsteht ein Öl, das ähnlich wie bei der Pyrolyse von Kunststoffabfällen in *Steamcrackern* eingesetzt werden kann. Bei der Gasifizierung von Biomasse entsteht

ein Synthesegas, das sich zur Weiterverarbeitung zu biobasiertem Methanol oder grünem Naphtha (Fischer-Tropsch-Naphtha) eignet.

Der tatsächliche Bedarf und die Wirtschaftlichkeit von Biomassenutzung hängen von einer Reihe von Faktoren ab. Entscheidend ist insbesondere der Biomassepreis, der stark von Art der Biomasse, ihrer Qualität und den erfüllten Nachhaltigkeitskriterien beeinflusst wird. Auch die Logistik ist ein wichtiger Kostenfaktor: Skaleneffekte beim Anlagenbau und -betrieb stehen hier den Mehrkosten durch längere

Steigerung der Biomethanol-Ausbeute durch Wasserstoff-Zugabe

→ Abb. 10



Agora Industrie (2025). Schematische Darstellung

Transportwege gegenüber. Für etablierte Verfahren wie die Ethanol- oder Biogasanlagen existieren bereits belastbare Referenzwerte für die Verarbeitungskosten. Bei bisher noch nicht großskalig eingesetzten Verfahren wie Gasifizierung und Methanolsynthese spielen jedoch weitere Variablen eine Rolle: Biomasse besteht – wie Methanol – vor allem aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Im Methanol ist pro Kohlenstoffeinheit jedoch mehr Wasserstoff enthalten. Um das gewünschte Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff zu erreichen, kann bei der Gasifizierung entweder Wasserstoff zugeführt oder Kohlenstoff in Form von CO₂ entnommen werden (vgl. Abbildung 10). Die Entnahme von CO₂ aus der Gasifizierung senkt die Methanol-Ausbeute pro Einheit eingesetzter Biomasse. Der Vorteil durch die Beimischung von grünem Wasserstoff bemisst sich daher an dem Preis und der Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff. Sind große Mengen Biomasse verfügbar, kann der Kohlenstoffbedarf der Chemie auch mit vergleichsweise kleinen Mengen Wasserstoff gedeckt werden, wodurch im Umkehrschluss größere Mengen an biogenem CO₂ entstehen. Bei stark begrenzter Biomasseverfügbarkeit werden hingegen höhere Mengen Wasserstoff benötigt. Auch die Möglichkeit zum Abtransport von abgeschiedenem biogenem CO₂ ist für die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Methanol-Projekte relevant, da sich

daraus perspektivisch Einnahmen durch die Erzeugung von Negativemissionen ergeben können.

Die Nutzung biogener Kohlenstoffquellen bietet wichtige Potenziale für Negativemissionen. Bei der Weiterverarbeitung von Biomasse zu biobasierten Plattformchemikalien wird ein Teil des enthaltenen Kohlenstoffs in Produkten gebunden, ein anderer Teil wird als biogenes CO₂ freigesetzt. Durch die Abscheidung und geologische Speicherung dieses CO₂ kann das zuvor von der Biomasse aufgenommene CO₂ dauerhaft gebunden und in Negativemissionen überführt werden. Dabei ist es wichtig, die Emissionsbilanz der Biomasse einzubeziehen. Voraussetzung für Negativemissionen ist die Nachhaltigkeit der eingesetzten Biomasse. Der CO₂-Fußabdruck von Biomasse hängt von zahlreichen Faktoren ab. Insbesondere bei landwirtschaftlich erzeugter Biomasse kann eine zusätzliche Nachfrage indirekte, nachteilige Landnutzungsänderungen auslösen, die die tatsächliche CO₂-Bilanz stark verschlechtern können. Bei Biomasse aus dem Wald müssen die Effekte auf die CO₂-Senkenleistung des Waldes berücksichtigt werden. Um beim Hochlauf der Biomassenutzung in der Chemie Negativemissionen zu erzielen, muss sichergestellt werden, dass sie zu einem nachhaltigen Umbau der Landnutzung beiträgt – etwa durch umfassende Strategien, Vorgaben und Standards.



Synergien einer biobasierten Chemieindustrie mit einer nachhaltigeren Landnutzung

Die Erschließung erneuerbarer Kohlenstoffquellen für die chemische Industrie kann einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren Nutzung von Biomasse und landwirtschaftlicher Fläche leisten. Hierfür müssen die Wechselwirkungen der Nachfrage nach verschiedenen biobasierten Rohstoffen mit Veränderungen im Landnutzungssystem – also in Land- und Forstwirtschaft – berücksichtigt werden. Die Studie *Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU* der Agora Agrar zeigt ein mögliches Szenario für den Umbau der europäischen Land- und Forstwirtschaft zur Klimaneutralität (Agora Agrar, 2024). Durch die geringere Nachfrage nach Futtermitteln und den Wegfall einjähriger Energiepflanzen können auf acht Prozent der landwirtschaftlichen Fläche schnellwachsende Gehölze oder Gräser – wie zum Beispiel Pappeln oder Miscanthus – mit einem hohen Kohlenstofftrag pro Fläche angebaut werden. Mit diesen Gehölzen wird das Angebot an fester Biomasse gegenüber 2020 aufgestockt, sodass neben den im Jahr 2045 verbleibenden Bedarfen für die energetische Nutzung auch feste Biomasse als Rohstoff für die chemische Industrie bereitgestellt werden kann.

Durch die Nachfrage nach lignozellulosehaltiger beziehungsweise holziger Biomasse kann die Chemieindustrie den nachhaltigen Umbau der Land- und Forstwirtschaft unterstützen. Für Anbaubiomasse gilt: Lignozellulosehaltige Biomasse lässt sich weitaus umweltfreundlicher erzeugen als beispielsweise Stärke, Zucker oder Pflanzenöle. Schnellwachsende Bäume oder Gräser haben gegenüber einjährigen Ackerkulturen eine Reihe von ökologischen Vorteilen: Über die geerntete Biomasse hinaus wird Kohlenstoff auf der Fläche gebunden, der Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ist in der Regel nicht notwendig und die Pflanzen tragen potenziell zu Erosionsschutz, Biodiversität und Klimaanpassung bei. Auch die Nutzung von einjährigen Ackerkulturen wie Zuckern, Stärke oder Pflanzenöl für die Chemieindustrie ist denkbar, sollte aber insbesondere in Bezug auf direkte und indirekte Landnutzungsänderungen abgewogen werden.

In der Spezialchemie hat die Verarbeitung von zum Beispiel Pflanzenölen einen festen Platz und wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Die für eine Weiterverarbeitung in der Chemie oft günstigen Eigenschaften der Rohstoffe aus einjährigen Ackerkulturen stehen aber potenziell nachteiligen Umweltauswirkungen gegenüber. Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen können die Emissionseinsparung des Umstiegs der Chemieindustrie auf Biomasse stark einschränken oder sogar unterm Strich zu Emissionssteigerungen führen. Der Anbau lignozellulosehaltiger Biomasse birgt ein geringeres Risiko für klimaschädliche indirekte Landnutzungsänderungen als der Anbau anderer Ackerkulturen und sollte daher priorisiert werden (Valin et al. 2015). Die Nutzung inländischer Biomasse bietet den Vorteil, dass Nachhaltigkeitsanforderungen transparent kontrolliert und umgesetzt werden können.

Damit landwirtschaftliche Betriebe in die Produktion von lignozellulosehaltiger Biomasse für die Chemieindustrie einsteigen, sind finanzielle Anreize und Planbarkeit notwendig. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist die Schaffung von Märkten für erneuerbare Chemikalien und dadurch Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Biomasse. Darüber hinaus können Erlöse aus der Generierung von Negativemissionen und der Bereitstellung weiterer Umweltdienstleistungen (wie etwa die Steigerung der Biodiversität, Erosionsschutz und Klimaanpassung) dazu beitragen, den Anbau lignozellulosehaltiger Biomasse zu einem profitablen Geschäftsbereich zu machen.

→ Die Rolle von Negativemissionen zur Erreichung der Klimaziele

Auch bei einem konsequenten Umstieg auf Erneuerbare Energien und Rohstoffe bleiben in einigen Gesellschaftsbereichen schwer vermeidbare Treibhausgasemissionen bestehen. Die Studie *Klimaneutrales Deutschland* der Agora Think Tanks berechnet, dass in der Landwirtschaft auch bei einem ambitionierten Transformationsszenario im Jahr 2045 Restemissionen von rund 23,4 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten verbleiben würden (Agora Think Tanks 2024). In der Industrie ist davon auszugehen, dass unvermeidbare Restemissionen bestehen bleiben, insbesondere aufgrund nicht abgeschiedener Prozessemissionen, der Nutzung fluorierter Treibhausgase und aus der Produktnutzung. Auch in den Wertschöpfungsketten chemischer Produkte bleiben an einigen Stellen kaum vermeidbare Treibhausgasemissionen bestehen, die andernorts kompensiert werden müssen – etwa Stickstoffemissionen bei der Nutzung von Düngemitteln in landwirtschaftlichen Prozessen oder bei bestimmten chemischen Reaktionen. Insgesamt belaufen sich die Restemissionen in 2045 über alle Sektoren hinweg auf rund 65 Megatonnen CO₂-Äq. Um die Klimaziele zu erreichen, reicht es daher nicht aus, Emissionen nur zu vermeiden oder zu verringern. Zusätzlich sind Maßnahmen erforderlich, die aktiv CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und dauerhaft speichern.

Die EU-Klimaziele sowie die deutsche Klimastrategie haben zum Ziel, bereits ab 2030 Negativemissionen zu erzeugen. Für die Generierung von Negativemissionen sind grundsätzlich biologische und technische Senken denkbar. Die CO₂-Senkenwirkung von Wäldern und Meeren ist aufgrund der Überlastung der Ökosysteme mit großen Unsicherheiten behaftet. Bei einer ambitionierten Umstellung bestehender Landwirtschaftssysteme und umfassenden Maßnahmen zur Stärkung von Wäldern, Mooren und Agroforstsystemen und unter Berücksichtigung von Kalamitäten geht die Modellierung *Klimaneutrales Deutschland* von einer jährlichen Senkenleistung von 35 Megatonnen CO₂ im Jahr 2045 aus. Der Entwicklung technischer Senken – wie beispielsweise durch die Verarbeitung von nachhaltiger Biomasse oder synthetischer Rohstoffe auf Basis von atmosphärischem CO₂ in Kombination mit CCS – ist somit von zentraler Bedeutung für die Erreichung der Senkenbedarfe.

3.4 Die Rolle von Wasserstoff in Ergänzung zu Elektrifizierung, Recycling und Biomasse

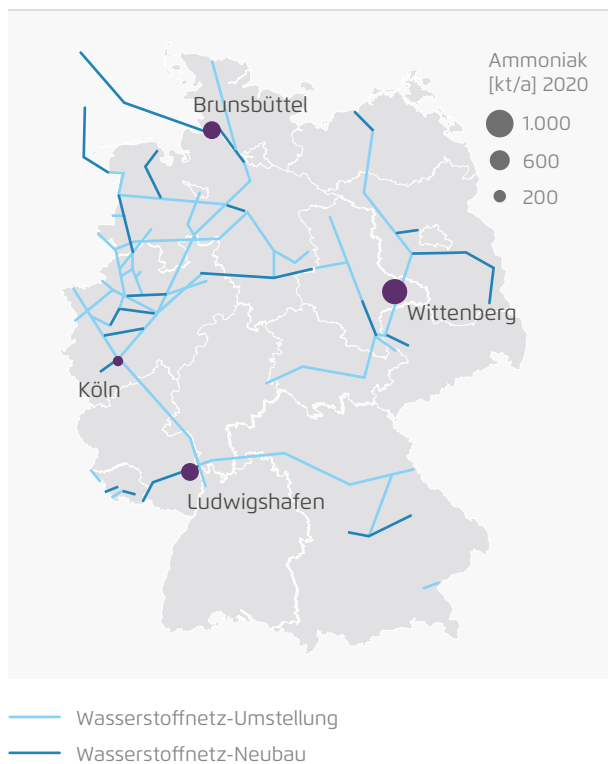
Der Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff begleitet die energetische und stoffliche Transformation der chemischen Industrie und ergänzt die Elektrifizierung der Energiebedarfe sowie den Umstieg auf Recycling und Biomasse. Grauer Wasserstoff auf Basis fossiler Rohstoffe wird bereits heute in großem Umfang zur Produktion von Ammoniak für die Düngemittelproduktion, in Raffinerien sowie in kleineren Mengen in der Methanolproduktion verwendet. Der Wasserstoff wird dabei überwiegend aus Erdgas und Wasser durch Methanreformierung gewonnen, wodurch hohe Treibhausgasemissionen entstehen. Der hohe Wasserstoffbedarf macht die

Ammoniakproduktion zum größten industriellen Verbraucher von Erdgas. Dabei ist die Ammoniakproduktion in Deutschland auf nur vier Standorte konzentriert (vgl. Abbildung 11). In kleineren Mengen kommt Wasserstoff zudem bei der Hydrierung von Ölen und Fetten sowie als Zusatz in anderen chemischen Produktionsprozessen zum Einsatz. Diese bestehenden Wasserstoffbedarfe müssen künftig auf klimaneutralen Wasserstoff umgestellt werden. Zusätzlich zu diesen bestehenden Bedarfen werden durch die Transformation auch neue stoffliche und energetische Wasserstoffbedarfe entstehen.

Durch die bestehenden Bedarfe an Wasserstoff, insbesondere in der Ammoniakproduktion, kann die chemische Industrie ein wichtiger Ankerkunde für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft werden.

Standorte der Ammoniakproduktion und geplanter Verlauf des Wasserstoff-Kernnetzes, 2030

→ Abb. 11



Agora Industrie (2025) basierend auf Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019), UBA (2021), EU Transaction Log und FNB Gas

Die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff in der deutschen Ammoniakproduktion kann einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Resilienz der heimischen Düngemittelproduktion zu stärken und zugleich klimaneutral umzubauen. Da grauer Wasserstoff in bestehenden Produktionsverfahren teilweise oder vollständig durch grünen Wasserstoff ersetzt werden kann, lässt sich über die Ammoniakbranche eine planbare Nachfrage nach grünem Wasserstoff schaffen und gleichzeitig hohe Emissionseinsparungen erzielen. Damit verbunden sind jedoch zusätzliche Investitionen in Infrastrukturen für die Erzeugung, den Transport und die Speicherung von Wasserstoff. Eine Alternative wäre der Import von Düngemitteln oder von Ammoniak als Ausgangsstoff für die Düngemittelproduktion. Dies könnte zwar mit Kostenvorteilen verbunden sein, würde jedoch bestehende Importabhängigkeiten aufrechterhalten und weiter verschärfen. Eine zumindest teilweise

Dekarbonisierung der Ammoniakproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff bietet hingegen das Potenzial, die gesamtwirtschaftliche Resilienz und heimische Produktion zu stärken und zugleich eine zentrale Rolle für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft einzunehmen. Selbst bei einer nur teilweisen Umstellung der aktuellen Ammoniakproduktion auf grünen Wasserstoff entstünde eine substantielle Nachfrage nach grünem Wasserstoff, die bei gesicherter Abnahme Investitionsanreize für Akteure entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette bieten könnte.

Neben den bestehenden Bedarfen entstehen in einer klimaneutralen Chemieindustrie neue Wasserstoffbedarfe, insbesondere in der Methanolwirtschaft. Bei der Verarbeitung von Biomasse und Kunststoffabfällen (chemisches Recycling) kann Wasserstoff eingesetzt werden, um die Produktausbeute zu erhöhen. Durch die Wasserstoffzugabe wird dabei mehr Kohlenstoff in Produkten gebunden und weniger in Form von CO₂ emittiert. Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff in der Rohstoffherzeugung für die organische Chemie kann also einen wichtigen Beitrag leisten, um Effizienzen in der heimischen Ressourcennutzung zu heben. Dies gilt insbesondere für Standorte, die frühzeitig durch das Kernnetz angeschlossen oder an denen größere Mengen Biomasse und Kunststoffabfälle verarbeitet werden sollen.

In geringem Maße kann Wasserstoff auch zur Bereitstellung von Prozessenergie sinnvoll sein. Für den Großteil der Prozesswärme-Bedarfe in der chemischen Industrie ist die direkte Elektrifizierung bis 2035 technisch machbar und stellt die kosteneffizienteste Option für klimaneutrale Prozesswärme dar. Industriekraftwerke (Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) werden auch in Zukunft Teil der Chemiestandorte sein und perspektivisch auf Wasserstoff umgestellt werden müssen. Ausgehend von Preisanreizen am Strommarkt wird ihr Betrieb in Zukunft stärker am Stromsystem ausgerichtet und damit flexibler sein. Darüber hinaus kann es einzelne Anwendungen geben, in denen die direkte Elektrifizierung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich ineffizient ist. Die daraus resultierenden Wasserstoffbedarfe können, sofern keine Anbindung an das Wasserstoff-Kernnetz besteht, auch lokal erzeugt werden.

4 Methodischer Überblick und Szenarien-Definition

Die Schlüsselstrategien Elektrifizierung, Kreislaufwirtschaft und der Einsatz erneuerbarer Kohlenstoffquellen sind in der Theorie sinnvolle Maßnahmen, um die Emissionsbilanz der Chemieindustrie zu verbessern. In Kombination mit einem effizienten *Carbon Management* durch den gezielten Einsatz von Wasserstoff und CCS ergibt sich die Möglichkeit, Negativemissionen zu generieren. Der Umstieg auf Erneuerbare Energien und Rohstoffe verspricht zudem, zur Standortresilienz beizutragen. Letztlich bestimmen aber die Ressourcenbedarfe und die Kosten, ob ein technisch möglicher Transformationspfad auch in der Praxis umgesetzt werden kann. Die Effekte auf Beschäftigung und Wertschöpfung bestimmen die Akzeptanz der Umsetzung.

Die Technologie- und Ressourcenpfade dieser Studie analysieren die Umsetzung der Schlüsselstrategien mit Blick auf Investitions- und Betriebskosten, Beschäftigung und Wertschöpfung. Die Studie soll Einblicke in Kosten und Nutzen einer größeren Standortresilienz sowie in das Potenzial der Bereitstellung von Negativemissionen geben. Sie soll *Trade-Offs* zwischen verschiedenen Technologiepfaden identifizieren und robuste Strategien für die Transformation ableiten.

Die Grundannahme aller Szenarien ist, dass die chemische Industrie in Deutschland in ihrer Breite erhalten bleibt. Es wird angenommen, dass die Nachfragemengen einzelner Endprodukte unter anderem aufgrund von Effizienzsteigerungen in der Materialnutzung sowie der Substitution durch andere Materialien leicht zurückgehen. Die Mengen der produzierten Grundstoffe und Intermediäre sinken in allen Szenarien jährlich um 0,6 Prozent, die produzierte Menge an Polymeren sinkt um jährlich 0,2 Prozent.

Drei Ressourcenpfade untersuchen verschiedene technologische Ausrichtungen und die Rolle eines vollständigen Ausstiegs aus fossilen Ressourcen. Zwei Ressourcenpfade untersuchen dabei die

vollständige Defossilisierung der Kohlenstoffbasis bei gleichzeitiger Fokussierung auf die Nutzung heimischer Ressourcen:

- Der Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“ analysiert die umfassende Nutzung heimischer Biomasse als Kohlenstoffquelle. Dafür wird angenommen, dass die Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse für die chemische Industrie ambitioniert ausgebaut wird.
- Der Ressourcenpfad „Heimischer Wasserstoff“ analysiert eine Chemieindustrie, die umfassend auf die Nutzung von heimisch produziertem Wasserstoff sowie biogenem oder atmosphärischem CO₂ setzt, um die Kohlenstoffbedarfe zu decken. Die Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse ist stark begrenzt.
- Im Pfad „Teilfossil“ können weiterhin fossile Ressourcen zur Deckung der Kohlenstoffbedarfe genutzt werden. Um dennoch Klimaneutralität zu erreichen, steht in diesem Szenario eine leicht größere Kapazität zur geologischen Speicherung von CO₂ zur Verfügung.

Drei Importszenarien untersuchen, wie sich eine deutsche Chemieindustrie internationalen Handel durch günstigere Kosten zunutze machen kann und welche Effekte sich daraus für die inländische Beschäftigung und den heimischen Ressourcenbedarf ergeben. Untersucht wird der Import von klimaneutralen chemischen Ausgangsstoffen und Zwischenprodukten auf verschiedenen Ebenen der Wertschöpfungskette: der Import von Wasserstoff, der Import von Zwischenprodukten wie Methanol, Ethanol und Ammoniak sowie der Import von Grundstoffchemikalien beziehungsweise *High-Value Chemicals* (HVC). Der Kostenvorteil der ausländischen Produktion bei den Energie- und Rohstoffkosten wurde mit dem Faktor 0,7 angenommen. Aufgrund der Grundannahme, dass die chemische Industrie in ihrer Breite in Deutschland verbleiben soll, wurde exogen vorgegeben, dass je Produkt maximal 30 Prozent des gesamten Bedarfs importiert werden können. Tabelle 1

zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Szenarien und die zentralen Rahmenparameter. Eine detaillierte Aufstellung ist in Anhang 7.3 zu finden.

Der Modellierungsansatz analysiert kostenoptimale Pfade zur Erreichung der gesetzten Emissionsreduktionsziele unter den szenariospezifischen Rahmenannahmen. Ein lineares Optimierungsmodell kombiniert Technologien und deren Kapazitäten so, dass die gesamten kumulierten Kosten aller Prozesse über den betrachteten Zeitraum 2025 bis 2045 unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusemissionen minimiert werden.⁶ Dies geschieht unter Berücksichtigung verschiedener Nebenbedingungen wie einem vorgegebenen jährlichen Treibhausgasemissionsbudget, CO₂-Speicherkapazitäten oder der Verfügbarkeit klimaneutraler Importprodukte. Neben den notwendigen Investitionsausgaben (CAPEX) werden dabei auch die jährlichen Betriebskosten (OPEX) sowie die notwendigen Ausgaben in vorgelagerten Wertschöpfungsketten in den Rohstoff- und Energiepreisen berücksichtigt – beispielsweise der Ausbau von Stromnetzen, der indirekt über den Strompreis abgebildet wird.

In der Modellierung werden die Emissionen der Branche nach einem Lebenszyklusansatz betrachtet. Dieses umfasst nicht nur die Emissionen, die in der Produktionsphase der Chemikalien entstehen, sondern auch jene, die bei der Rohstoffgewinnung oder bei der Behandlung am Ende der Nutzungsphase anfallen (zum Beispiel Abfallbehandlung über Recycling oder Müllverbrennung). Die Gesamtemissionen entlang des Lebenszyklus wurden durch eine *Bottom-up*-Modellierung der chemischen Wertschöpfungsketten ermittelt. Der Fokus liegt dabei auf der Modellierung der Basischemie sowie den nachgelagerten Wertschöpfungsketten von ausgewählten Kunststoffen. Die weiterverarbeitende Chemie – wie Düngemittel, Kautschuk, Acrylchemie, Polyurethane – wird indirekt durch die Nachfrage an dafür benötigten Zwischenprodukten berücksichtigt.

In der Modellierung wird auch das Potenzial der chemischen Industrie zur Generierung von Negativemissionen einbezogen. Hierzu wurde in fünf der sechs betrachteten Szenarien angenommen, dass die chemische Industrie bis 2045 Negativemissionen in Höhe von 15 Megatonnen pro Jahr erzielt.⁷ Lediglich im Ressourcenpfad „Teilfossil“ werden keine negativen Emissionen erzielt. Der Einsatz von CCS ist auf insgesamt rund 28 Megatonnen im Jahr 2045 gedeckelt, wobei zwischen CCS bei der Müllverbrennung und in der chemischen Produktion unterschieden wird. Da rund zwei Drittel der Produkte der Chemie exportiert werden und somit bei der Verbrennung am Lebenszyklusende nicht der geologischen Speicherung zur Verfügung stehen, ist der maximale CCS-Einsatz bei der Abfallverbrennung auf rund 14 Megatonnen CO₂ jährlich begrenzt. Dies entspricht dem Kohlenstoffgehalt des in Deutschland verbleibenden Produktionsanteils. Weitere 14 Megatonnen CO₂ sind für die Abscheidung von Prozessemissionen sowie CCS an Biomassetechnologien vorgesehen.

Die Effekte auf Beschäftigung und Wertschöpfung wurden in einem nachgelagerten Schritt analysiert. Hierzu wurden direkte Beschäftigungseffekte durch eine techno-ökonomische Analyse der Beschäftigungsintensitäten (Anzahl der Vollzeitbeschäftigten pro Produktionseinheit) der verwendeten Produktionstechnologien sowie der modellierten Produktionsmengen abgeleitet. Die Wertschöpfungseffekte ergeben sich durch Multiplikation der projizierten Beschäftigungszahlen mit den Wertschöpfungsintensitäten. Neben den direkten Effekten der chemischen Produktion auf die heimische Wertschöpfung werden zudem die induzierten Wertschöpfungseffekte bestimmt, also die zusätzlich Wirtschaftsleistung, die sich durch den Konsum der ausgezahlten Lohnsummen in anderen Wirtschaftszweigen entfaltet. Nähere Details zur Berechnung der Arbeitsplatz- und Wertschöpfungseffekte sind in Anhang 7.2 zu finden.

⁶ Die in dieser Studie berücksichtigten Treibhausgase umfassen Kohlendioxid, Methan, Lachgas und in geringerem Maße weitere Gase, gemäß dem IPCC-Treibhausgasprotokoll von 2013 (IPCC 2013).

⁷ Die Bestimmung des Wertes erfolgte auf Basis einer grundlegenden Abschätzung des gesamten technischen Potenzials für Negativemissionen auf Basis der in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffmengen.

Szenario-Übersicht

→ Tabelle 1

Szenario	Beschreibung	Zentrale Modellannahmen und Rahmenparameter	
Ressourcenpfad „Teilfossil“	Die Chemieindustrie wird bilanziell bis 2045 klimaneutral, bleibt aber weiterhin abhängig vom Import fossiler Rohstoffe zur Deckung der Kohlenstoffbedarfe. Um die Klimaneutralität dennoch zu erreichen, werden höhere CCS-Kapazitäten benötigt, gleichzeitig können diese jedoch nicht dazu genutzt werden, Negativemissionen zu erzielen.	Nutzung fossiler Ressourcen	☑
		verfügbare Rohstoffimporte	fossile Rohstoffe
		verfügbare Biomasse	24,8 Mt Trockenmasse
		THG-Ziel 2045 (CO ₂ -Äq)	klimaneutral (0 Mt)
		CCS-Kapazität	29,3 Mt CO ₂
Ressourcenpfad „Heimischer Wasserstoff“	Der Fokus der Transformation der Rohstoffbedarfe liegt auf der Nutzung von Wasserstoff und der Kohlenstoffversorgung über DAC und CCU. Biomasse steht nur begrenzt zur Deckung der Kohlenstoffbedarfe zur Verfügung. Die chemische Wertschöpfungskette generiert Negativemissionen, welche unvermeidbare Restemissionen in anderen Sektoren kompensieren können.	Nutzung fossiler Ressourcen	☒
		verfügbare Rohstoffimporte	☒
		verfügbare Biomasse	4,7 Mt Trockenmasse
		THG-Ziel 2045 (CO ₂ -Äq)	klimapositiv (-15 Mt)
		CCS-Kapazität	27,7 Mt CO ₂
Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“	Der Fokus der Transformation der Rohstoffbedarfe liegt auf der Nutzung heimischer Biomassepotenziale und einer zirkulären Chemieindustrie. Die chemische Industrie generiert dabei Negativemissionen, die unvermeidbare Restemissionen in anderen Sektoren kompensieren können.	Nutzung fossiler Ressourcen	☒
		verfügbare Rohstoffimporte	☒
		verfügbare Biomasse	24,8 Mt Trockenmasse
		THG-Ziel 2045 (CO ₂ -Äq)	klimapositiv (-15 Mt)
		CCS-Kapazität	27,7 Mt CO ₂
Importszenario „Wasserstoff“	Dieses Szenario ist angelehnt an den Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“. In begrenztem Maße kann zusätzlich Wasserstoff per Pipeline importiert werden.	Nutzung fossiler Ressourcen	☒
		verfügbare Rohstoffimporte 2045	33 TWh Wasserstoff
		verfügbare Biomasse	24,8 Mt Trockenmasse
		THG-Ziel 2045 (CO ₂ -Äq)	klimapositiv (-15 Mt)
		CCS-Kapazität	27,7 Mt CO ₂
Importszenario „Zwischenprodukte“	Dieses Szenario ist angelehnt an den Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“. In begrenztem Maße können zusätzlich Wasserstoff per Pipeline und Wasserstoff-Derivate per Schiff importiert werden.	Nutzung fossiler Ressourcen	☒
		verfügbare Rohstoffimporte 2045	33 TWh Wasserstoff, 1 Mt Ammoniak, 9 Mt Bio-/CCU-Methanol, 8 Mt Bio-Ethanol
		verfügbare Biomasse	24,8 Mt Trockenmasse
		THG-Ziel 2045 (CO ₂ -Äq)	klimapositiv (-15 Mt)
		CCS-Kapazität	27,7 Mt CO ₂
Importszenario „HVC“	Dieses Szenario ist angelehnt an den Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“. In begrenztem Maße können zusätzlich Wasserstoff per Pipeline und Wasserstoff-Derivate sowie <i>High-Value Chemicals</i> (HVC) per Schiff importiert werden.	Nutzung fossiler Ressourcen	☒
		verfügbare Rohstoffimporte 2045	33 TWh Wasserstoff, 1 Mt Ammoniak, 9 Mt Bio-/CCU-Methanol, 8 Mt Bio-Ethanol, 4,4 Mt biogene HVC
		verfügbare Biomasse	24,8 Mt Trockenmasse
		THG-Ziel 2045 (CO ₂ -Äq)	-15 Mt
		CCS-Kapazität	27,7 Mt CO ₂

Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025)

5 Modellierungsergebnisse: Ressourcenpfade für die chemische Industrie

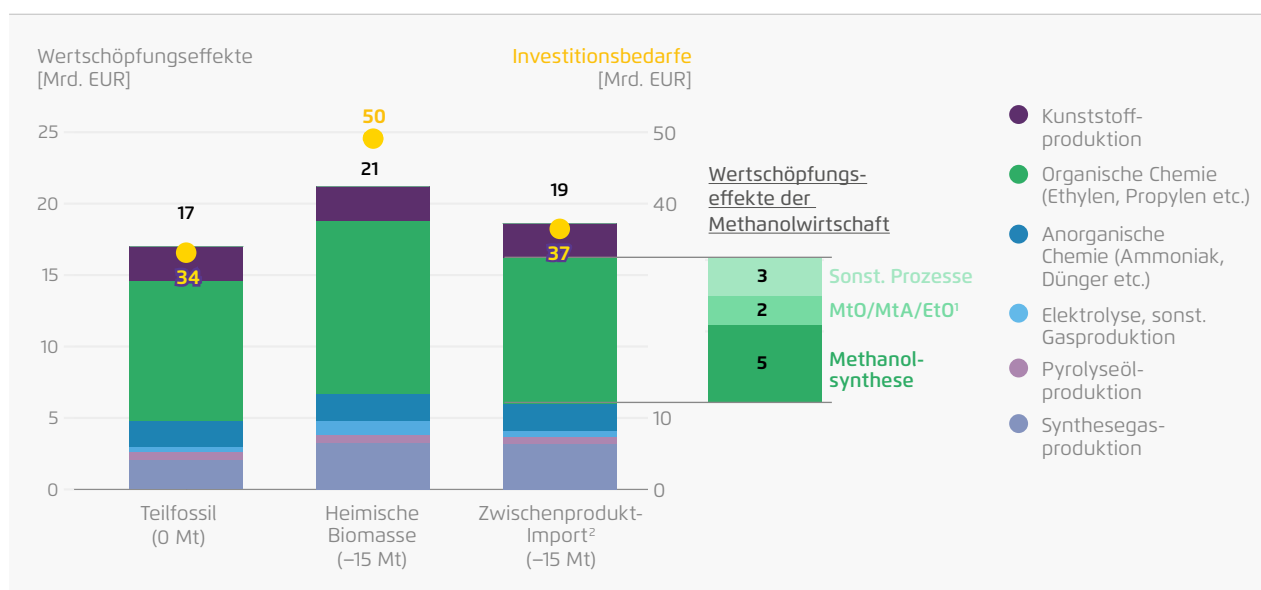
Die Nutzung heimischer statt importierter Rohstoffe fördert Resilienz und Innovationen und eröffnet Potenziale für zusätzliche Wertschöpfung und Arbeitsplätze. Durch die Nutzung heimischer Rohstoffe sowie den Aufbau neuer Wertschöpfungsketten in Bioökonomie und Abfallwirtschaft können neue, innovative Produkte und Geschäftsfelder entstehen. Mit dem *Insourcing* der Rohstoffbasis werden Teile der vorgelagerten Wertschöpfungsketten in die heimische Wirtschaft integriert, die bislang durch den Import fossiler Rohstoffe bislang vor allem im Ausland Wertschöpfung generieren. Gleichzeitig sind Mehrkosten bei der Umstellung der Ressourcenbasis kaum vermeidbar. Diese Mehrkosten müssen jedoch im Kontext der zusätzlichen Wertschöpfung und Arbeitsplätze, der gesteigerten Resilienz sowie der bislang nicht adäquat eingepreisten und stattdessen gesellschaftlich getragenen Kosten fossiler Rohstoffe bewertet

werden. Gleichzeitig bietet die Umstellung auf erneuerbare Kohlenstoffquellen die Möglichkeit, zu einer nachhaltigeren Landnutzung beizutragen und Negativemissionen zu generieren.

Der vollständige Umstieg von fossilen Importen auf heimische Ressourcen ist grundsätzlich möglich. Die integrierte Betrachtung von Investitions- und Betriebskosten sowie der Effekte auf Wertschöpfung und Beschäftigung zeigt jedoch einen *Sweet-Spot*: Werden begrenzte heimische Biomasse- und Recyclingressourcen mit Importen von Zwischenprodukten wie Ammoniak, Methanol und Ethanol kombiniert, können die Kosten entscheidend gesenkt werden – ohne auf zusätzliche Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Bioökonomie und Abfallwirtschaft verzichten zu müssen. Mit anderen Worten: Jede zusätzlich genutzte Tonne heimischer Kunststoffabfälle und nachhaltiger

Wertschöpfungseffekte und Investitionsbedarfe ausgewählter Ressourcenpfade

→ Abb. 12



Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025). Die Werte in den Klammern sind extern vorgegebene Nettoemissionen in CO₂-Äquivalenten. ¹ MtO/MtA/EtO = Methanol-to-Olefins, Methanol-to-Aromatics, Ethanol-to-Olefins; ² Import von Methanol, Ethanol (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden)

Biomasse trägt kosteneffizient zur Emissionsminderung bei und schafft zugleich neue Jobs und Wertschöpfung.

5.1 Elektrifizierung der Energiebedarfe

Die Basischemie zeichnet sich bereits heute durch eine hohe Integration von Energie- und Ressourcennutzung aus. Eine Reihe chemischer Prozesse läuft bei hohen Temperaturen über 500 Grad Celsius ab und setzt Abwärme frei. Ein großer Anteil dieser freigesetzten Energie wird innerhalb der Chemiestandorte zur Bereitstellung von Wärmebedarfen bei geringeren Temperaturen weitergenutzt (Wärmeintegration). In der aktuellen Produktionsstruktur der Basischemie werden in den modellierten Prozessen rund drei Viertel der Prozesswärmebedarfe durch Energieintegration und Energierückgewinnung gedeckt. Nur rund ein Viertel der Wärmebedarfe werden durch den Einsatz von Energieträgern gedeckt, die ausschließlich zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Dies erfolgt bislang jedoch nahezu ausschließlich auf Basis fossiler Ressourcen (insbesondere Erdgas). Die energetische Nutzung von Biomasse macht weniger als ein Prozent der gesamten Prozessenergiebedarfe aus. Die Energietransformation der chemischen Industrie steht somit vor zwei zentralen Herausforderungen: Zum einen muss die bisherige Nutzung fossiler Ressourcen zur Prozesswärmerzeugung auf erneuerbare Energieträger umgestellt werden. Zum anderen fallen durch die Umstellung der Ressourcenbasis *Steamcracker* und andere exotherme Reaktionen weg, deren Abwärme bisher große Anteile an den Energiebedarfen in der Chemie gedeckt hat. In der Folge muss diese zuvor aus Abwärme bezogene Prozessenergie erneuerbar bereitgestellt werden.

Die Strom- und Wärmebedarfe der betrachteten Prozesse werden bis 2045 vollständig über erneuerbaren Strom oder die Abwärme klimaneutraler Prozesse bereitgestellt. Vor dem Hintergrund der damit einhergehenden Kosten- und Emissionseinsparung zeigen die Modellergebnisse, dass zunächst die Energieintegration und Energierückgewinnung weiter ausgebaut werden, um Effizienzpotenziale in

der Ressourcennutzung weiter auszuschöpfen. Mit zunehmender Wettbewerbsfähigkeit der Elektrifizierungstechnologien (insbesondere durch leicht sinkende Strompreise und technologischen Fortschritt) setzt sich Strom als effiziente und kostengünstige Dekarbonisierungsoption durch. Bis 2045 werden bisherige fossile Energiebedarfe vollständig auf strombasierte Verfahren umgestellt werden. Oberhalb von 200 Grad Celsius spielen vor allem elektrische Heizkessel eine zentrale Rolle für die Dampferzeugung, unterhalb von 200 Grad Celsius werden zunehmend Industrie-Wärmepumpen eingesetzt. Auch bei der Nutzung von Biomasse und Abfällen bestehen erhebliche Potenziale für die Energieintegration, beispielsweise bei Pyrolyse und Gasifizierung. Die rein energetische Nutzung von Biomasse und Wasserstoff spielt aus Kostengründen in allen modellierten Ressourcenpfaden nur eine geringe Rolle in der Energieversorgung. Lediglich im Ressourcenpfad „Teilfossil“ wird ein Teil der verfügbaren Biomasse zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt. Eine fossile Prozesswärmeerzeugung findet hingegen auch in diesem Ressourcenpfad nur in sehr geringem Umfang statt; die verfügbaren fossilen Rohstoffe werden vorrangig zur Deckung der fossilen Kohlenstoffbedarfe genutzt.

Die Prozessenergiebedarfe steigen auf den ersten Blick bei einer defossilisierten Rohstoffversorgung nominell an. Dies liegt jedoch daran, dass bei fossiler Rohstoffnutzung Teile der Wärmebedarfe durch die integrierte Rohstoff- und Energienutzung gedeckt werden. Ein großer Anteil der Hochtemperaturbedarfe in der derzeitigen Chemieindustrie entfällt auf *Steamcracker*, die üblicherweise Temperaturen von 800 bis 850 Grad Celsius benötigen. Als Energielieferanten werden Brenngase eingesetzt, die als Nebenprodukt im *Cracking*-Prozess entstehen. Dabei wird Abwärme auf hohen Temperaturen frei, die in anderen Prozessen im Anlagenverbund genutzt werden kann. Bei einer vollständigen Umstellung der Kohlenstoffbasis der organischen Chemie gewinnen Prozesse auf Basis erneuerbarer Rohstoffe – wie die Methanol- und die Ethanol-Route – an Bedeutung und ersetzen einen großen Teil bestehender *Steamcracker*-Kapazitäten. Diese Prozesse laufen üblicherweise bei bis zu 300 bis 450 Grad Celsius ab und

haben geringere Abwärmepotenziale (Schorn 2024). Die dadurch wegfallende Abwärme wird in den fossilfreien Ressourcenpfaden durch eine stärkere direkte Elektrifizierung der Prozesswärmebedarfe kompensiert.

Durch die Substitution fossiler Brennstoffe steigt der Strombedarf der chemischen Industrie bis 2045 erwartungsgemäß an – erhöhte Strombedarfe entstehen insbesondere durch die Wasserstoffproduktion und die CO₂-Abscheidung (indirekt über Wärmebedarfe). Die direkte Elektrifizierung der Energiebedarfe zur Dampferzeugung geht mit einem Effizienzgewinn einher. Im Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“ sinkt der Primärenergiebedarf zur Prozesswärmeerzeugung (ausgenommen der Strombedarfe für die Wasserstofferzeugung, da Wasserstoff stofflich genutzt wird) um 13 Prozent im Vergleich zum Status quo. In einzelnen Produktionsprozessen können die Effizienzgewinne noch deutlich größer ausfallen. Bei der Dampferzeugung mit Temperaturen unter 200 Grad Celsius kann durch den Einsatz von Wärmepumpen bis zu 50 Prozent der Primärenergie im Vergleich zu konventionellen Gaskesseln eingespart werden (Agora Industrie, Future Camp 2022).

Der Strombedarf zur direkten Wärmebereitstellung steigt von aktuell nahe null auf im Mittel 18 Terawattstunden im Jahr 2045.⁸ Auch über den Wärmebedarf hinaus steigt die Einbindung von erneuerbarem Strom deutlich an und verdrängt die derzeit übliche Produktion über industrielle KWK-Anlagen. Je nach Szenario werden im Jahr 2045 weitere 22 bis 24 Terawattstunden erneuerbarer Strom für sonstige Strombedarfe bezogen.⁹

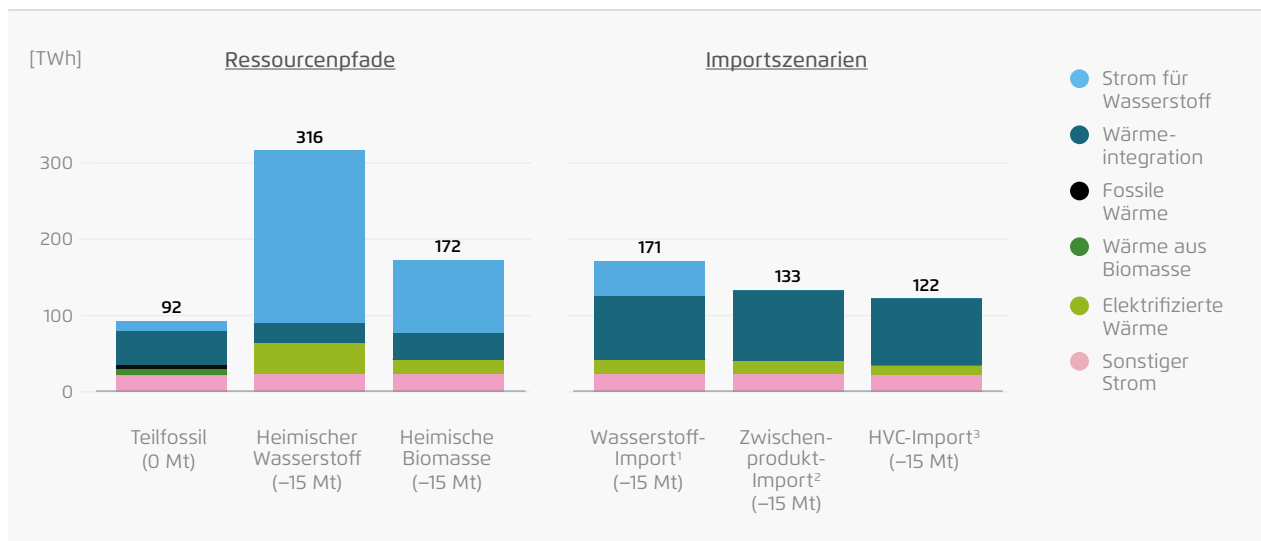
Der Grad der Nutzung von heimisch erzeugtem Wasserstoff hat große Auswirkungen auf den Gesamtstrombedarf der Basischemie. Trotz der umfassenden Nutzung heimischer Biomassepotenziale bedarf die Produktion von Wasserstoff im Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“ einen Strombedarf für die Elektrolyse von 95 Terawattstunden. Dieser wird insbesondere in der Methanolproduktion zur Steigerung der Produktausbeute verwendet (vgl. Abbildung 10). Im Ressourcenpfad „Heimischer

8 Der Strombedarf zur Wasserstoffproduktion ist hier nicht enthalten, sondern wird gesondert betrachtet.

9 Zum Vergleich, im Status quo beträgt der sonstige Strombedarf der modellierten Prozesse rund 11 Terawattstunden.

Prozessenergiebedarfe in den verschiedenen Ressourcenpfaden und Importszenarien

→ Abb. 13



Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025). Die Werte in den Klammern sind extern vorgegebene Nettoemissionen in CO₂-Äquivalenten; ¹pipelinegebundene Wasserstoff-Importe; ²Import von Methanol, Ethanol (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); ³Import von Methanol, Ethanol, HVC (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); HVC = High-Value Chemicals

Wasserstoff“ ist der Bedarf von Strom für Wasserstoff sogar 2,3-mal so hoch (226 Terawattstunden).¹⁰ Der geringste Wasserstoffbedarf besteht im Ressourcenpfad „Teilfossil“ sowie in den Szenarien „Zwischenproduktimport“ und „HVC-Import“, da dort die benötigte Chemikalienmenge auch ohne Steigerung der Biomethanol-Ausbeute durch Wasserstoffzugabe erreicht werden kann.

5.2 Umstieg auf recycelten und erneuerbaren Kohlenstoff

Neben der Transformation der Energiebedarfe steht die chemische Industrie vor der besonderen Herausforderung, ihren bislang fossil gedeckten Kohlenstoffbedarf auf recycelte und erneuerbare Quellen umzustellen. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, sind die indirekten vor- und nachgelagerten Emissionen bis zu dreimal so hoch wie die direkten Emissionen aus der Produktion. Allein die nachgelagerten Emissionen machen schätzungsweise bis zu 60 Prozent der Gesamtemissionen aus (Agora Industrie 2023). Da diese Emissionen aufgrund der hohen Exportorientierung der deutschen chemischen Industrie häufig im Ausland anfallen, können diese Emissionen bei einer Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus nur teilweise durch besseres Recycling oder Abfallverbrennung mit CCS im Inland vermieden werden. Eine vollständige Vermeidung fossiler Emissionen ist folglich nur durch eine umfassende Umstellung von fossilen auf erneuerbare Kohlenstoffe möglich (vgl. Kapitel 3.3).

Eine vollständige Umstellung von fossilen auf erneuerbare Kohlenstoffe ist möglich – es stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, die effizient miteinander kombiniert werden müssen. Im Status quo verarbeitet die chemische Grundstoffproduktion

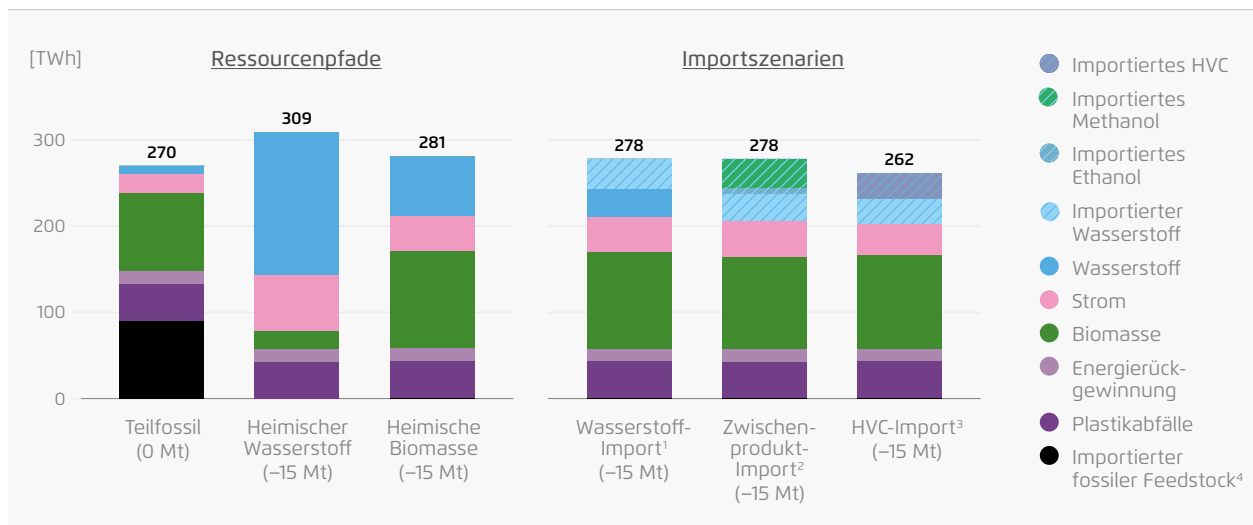
rund 11 Megatonnen Kohlenstoff und verbraucht dafür rund 210 Terawattstunden fossile Ressourcen. Es wird angenommen, dass dieser Gesamtbedarf bis 2045 leicht sinken wird, aufgrund von leicht sinkenden Produktionsmengen in der Basischemie sowie einer Substitution von Kunststoffen in den Verbrauchssektoren Verpackungen und Gebäude. Zur Umstellung der Rohstoffbasis auf erneuerbaren Kohlenstoff kann auf Biomasse, atmosphärisches CO₂ über *Direct Air Capture* (DAC), Recycling von Kunststoffabfällen sowie CO₂-Abscheidung und -Nutzung (CCU) zurückgegriffen werden. Außerdem können grüne Wasserstoffderivate wie Ammoniak, Methanol oder Ethanol sowie grüne Zwischenprodukte wie Ethylen und Propylen als Rohstoffe für die Basischemie importiert werden. In allen betrachteten Szenarien werden die künftigen Kohlenstoffbedarfe aus einer Kombination dieser verfügbaren Rohstoffoptionen gedeckt; keine der Optionen bietet allein ausreichend Kapazitäten, um die Kohlenstoffbedarfe vollständig zu decken. Selbst bei einer umfassenden Ausnutzung von stark steigenden Recyclingpotenzialen sowie einer umfassenden Nutzung von Biomasse verbleibt ein Restkohlenstoffbedarf von in etwa 20 Prozent des Gesamtbedarfs, der entweder durch die Produktion von beispielsweise synthetischem Methanol auf Basis von Wasserstoff und abgeschiedenen CO₂ oder durch den Import erneuerbarer Zwischenprodukte gedeckt werden muss.

Die Nutzung der heimischen Kohlenstoffquellen Biomasse und Recycling steht im Kern aller betrachteten Ressourcenpfade und Importszenarien. Auch wenn kostengünstige grüne Zwischenprodukte importiert werden können, werden die bestehenden heimischen Potenziale nahezu vollständig genutzt. In den betrachteten Szenarien stellt sich die Nutzung von Biomasse und Recycling als kosteneffiziente Möglichkeit einer fossilfreien Kohlenstoffversorgung heraus. Die verfügbaren Biomasse-Potenziale werden in nahezu allen Szenarien vollständig ausgeschöpft. Lediglich wenn fossile Ressourcen weiterhin in begrenztem Maße genutzt werden können, sinkt der Nutzungsanteil der verfügbaren Biomasse auf 88 Prozent. Insgesamt kann durch die angenommenen Biomassepotenziale nahezu die Hälfte der fossilen Kohlenstoffbedarfe im Jahr 2045 substituiert werden.

¹⁰ In den betrachteten Importszenarien zeigt sich, dass eine heimische Wasserstoffnutzung durch den Import von Wasserstoff-Derivaten und/oder *High-Value Chemicals* ersetzt wird, sofern Zwischenprodukt- oder HVC-Importe zum angenommenen Preisvorteil (angenommen wurden 70 Prozent der heimischen Produktionskosten, zzgl. Transportkosten) verfügbar sind. In diesen Szenarien gibt es keinen Bedarf für heimisch produzierten Wasserstoff für die chemische Industrie – verbleibende Wasserstoffbedarfe werden pipeline-gebunden importiert.

Ressourcenbedarfe in den verschiedenen Ressourcenpfaden und Importszenarien

→ Abb. 14



Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025). Die Werte in den Klammern sind extern vorgegebene Nettoemissionen in CO₂-Äquivalenten; ¹pipelinegebundene Wasserstoff-Importe; ²Import von Methanol, Ethanol (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); ³Import von Methanol, Ethanol, HVC (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); ⁴beinhaltet auch fossile Energiebedarfe; HVC = High-Value Chemicals

Der Ausbau der Recyclingwirtschaft und der Aufbau einer Bioökonomie zeigt sich als No-Regret-Strategie.

In Bezug auf die Kreislaufwirtschaft werden die bestehenden Potenziale über alle Szenarien hinweg recht konstant genutzt – über 60 Prozent des gesamten Abfallaufkommens werden chemisch oder mechanisch recycelt. Dabei werden die angenommenen Potenziale für das chemische Recycling nur zu rund der Hälfte ausgenutzt. Das chemische Recycling erweist sich somit als lediglich teilweise wirtschaftlich im Vergleich zu anderen Optionen.¹¹ Die angenommenen Potenziale des mechanischen Recyclings werden hingegen in allen Szenarien vollständig ausgenutzt. Somit stellt das Recycling auch im Vergleich zu grünen Importen eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Versorgungstechnologie dar. Insgesamt werden durch das Recycling 2,1 bis 2,3 Megatonnen Kohlenstoff wieder in den Kohlenstoffkreislauf eingebracht. Die Möglichkeit der Kreislaufführung von Kohlenstoff aus der Abfallverbrennung oder der Nutzung von atmosphärischem CO₂ (DAC) mittels CCU wird in den modellierten Ressourcenpfaden

hingegen nur nachrangig gewählt, wenn andere Potenziale bereits ausgeschöpft sind. Aufgrund der hohen Kosten des dafür benötigten Wasserstoffs zeigt sich die CCU-basierte Produktion von Basischemikalien als weniger wirtschaftlich im Vergleich zu den alternativen heimischen Kohlenstoffquellen (Biomasse und Recycling) sowie dem Import von grünen Zwischenprodukten.

Die Energie- und Ressourcenbasis der chemischen Industrie verändert sich in allen Technologiepfaden umfassend – insbesondere die Nutzung von Plastikabfällen, Biomasse und Strom gewinnt an Bedeutung.

Durch die stoffliche Nutzung steigt der Anteil von Biomasse an den gesamten Ressourcenbedarfen im Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“ sowie den Importszenarien bis 2045 auf bis zu 112 Terawattstunden. Selbst im Ressourcenpfad „Teilfossil“ werden im Jahr 2045 91 Terawattstunden Biomasse eingesetzt.¹² Damit dies sowohl ökonomisch, ökologisch als auch sozial tragfähig und sinnvoll ist, muss die bestehende Nutzung heimischer Biomassepotenziale optimiert und teilweise von einer

¹¹ Eine weitere Steigerung der Recyclingrate wäre durch ein stärker auf Recycling zugeschnittenes Produktdesign (*Design for Recycling*) sowie verbesserte Sammlung und Sortierung von Kunststoffabfällen möglich.

¹² Der geringe Biomasse-Einsatz im Szenario „Heimischer Wasserstoff“ ergibt sich durch eine geringere, extern vorgegebene Biomasse-Verfügbarkeit.

energetischen zu einer stofflichen Nutzung umgeleitet werden (vgl. Infobox *Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse in Deutschland*, S. 23). Außerdem muss die Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse ambitioniert vorangetrieben werden (vgl. Infobox *Synergien einer biobasierten Chemieindustrie mit einer nachhaltigen Landnutzung*, S. 26). Bislang werden die Rohstoffe der deutschen Chemieindustrie nahezu vollständig importiert. Die Energiekrise im Zuge der Invasion Russlands in die Ukraine hat gezeigt, dass es hohe Risiken birgt, wenn Rohstoffpreise stark schwanken oder Verfügbarkeiten insgesamt limitiert werden. Zwei der betrachteten Szenarien zeigen auf, dass eine vollständige Deckung der chemischen Ressourcenbedarfe auf Basis heimischer Ressourcen grundsätzlich denkbar ist. Zugleich ist der Handel mit Rohstoffen und Zwischenprodukten jedoch auch ein wichtiger Erfolgsfaktor für Deutschland als Exportnation.

Die Einbindung günstiger erneuerbarer Importe aus dem Ausland bietet die Möglichkeit, Kosten insgesamt zu senken und so die Wirtschaftlichkeit nachgelagerter Wertschöpfungsstufen zu stärken. In den betrachteten Importszenarien ist der Anteil importierter Zwischenprodukte auf ein Drittel beschränkt. Durch die Importe werden vor allem die teuersten Technologien zur Chemikalienproduktion substituiert. In der Folge sinkt die heimische

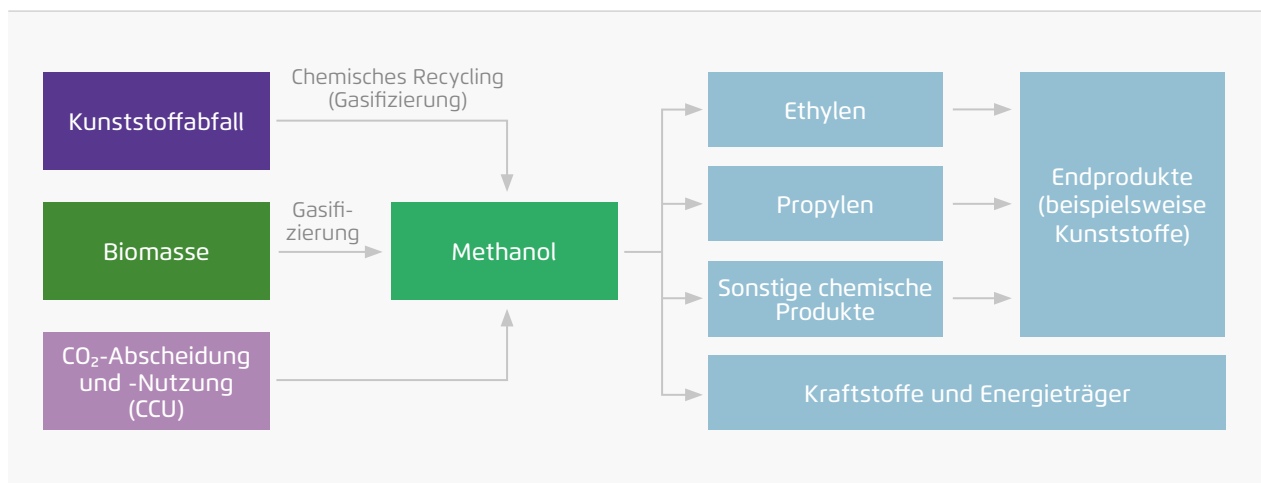
Produktion synthetischer Moleküle auf Basis von Wasserstoff, während die Biomasse- und Recyclingpotenziale nahezu unverändert ausgeschöpft werden. Der Import von Zwischenprodukten stellt somit keine Alternative, sondern eine Ergänzung zur Nutzung heimischer Rohstoffe dar.

5.3 Methanol im Kern der Transformation

Bei allen in dieser Studie untersuchten Rohstoffen – ob Biomasse, Kunststoffabfälle oder erneuerbarer Wasserstoff – spielt Methanol als Plattformchemikalie eine entscheidende Rolle. Ethylen ist eine wichtige, großvolumige Basischemikalie und Ausgangsstoff wichtiger Kunststoff-Wertschöpfungsketten. Der Vergleich der Modellierungsergebnisse hinsichtlich der Technologie zur Ethylenproduktion zeigt, dass die Methanol-Route die effizienteste Möglichkeit ist, die begrenzt verfügbaren heimischen Ressourcen zu nutzen. In allen fossilfreien Szenarien wird der größte Anteil Ethylen über die Methanol-Route hergestellt (vgl. Abbildung 16). Sofern auch HVC-Importe möglich sind, wird zunächst die teuerste inländische Produktion – die Ethylenproduktion aus Methanol auf Basis von erneuerbarem Wasserstoff – durch Ethylen-Importe verdrängt.

Methanol als zentrale Plattformchemikalie in der klimaneutralen Chemieproduktion

→ Abb. 15



Heutzutage wird Ethylen vor allem in *Steamcrackern* aus Naphtha hergestellt. Ein kleiner Teil der *Steamcracker*-Kapazitäten bleibt in allen modellierten Szenarien erhalten und wird zur Verarbeitung von Pyrolyse-Öl aus dem chemischen Recycling umgerüstet. Grundsätzlich ist denkbar, dass zusätzliche Mengen grünen Naphthas synthetisch auf Basis von Biomasse oder CCU hergestellt und in *Crackern* genutzt werden. Diese Route ist jedoch mit einer ineffizienteren Nutzung der Rohstoffe und höheren Energiebedarfen und daher wirtschaftlichen Nachteilen gegenüber der Methanol-Route verbunden.

Ohne ein politisches Ziel für den Ausstieg aus stofflich genutzten fossilen Rohstoffen drohen Lock-ins bei fossilen Technologien – zulasten des Standorts.

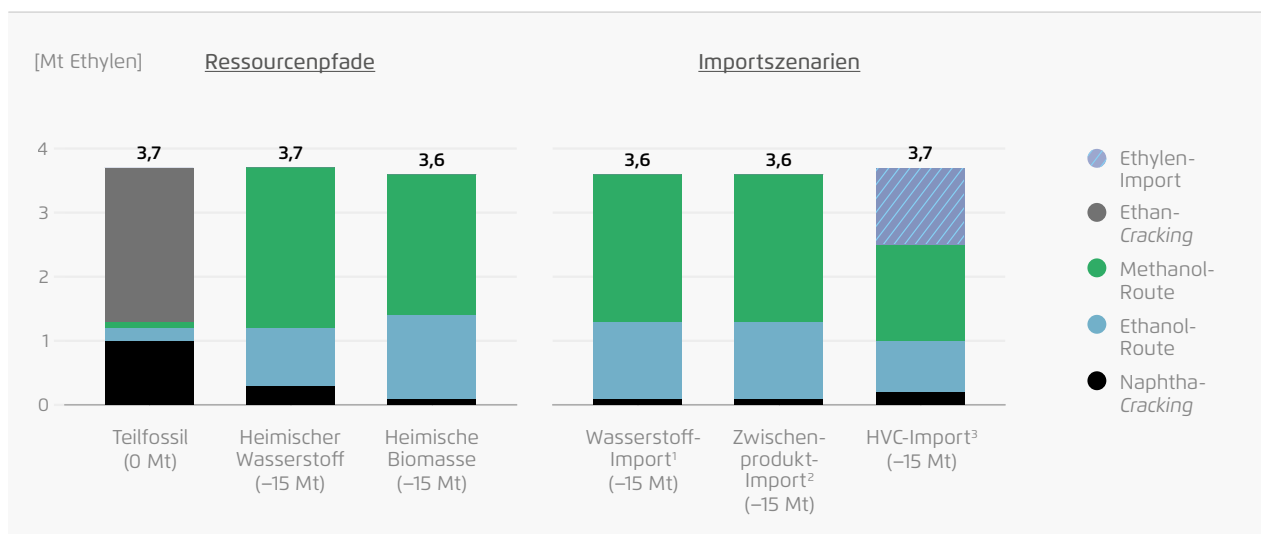
Im teilfossilen Szenario werden fossile Kohlenstoffquellen weiterhin zugelassen. Auch hier verlagert sich die bestehende Produktion auf Basis von Naphtha-*Steamcracking* und wird zu großen Teilen durch Ethan-*Cracking* in Kombination mit CCS ersetzt. Diese Dynamik zugunsten von Ethan als Rohstoff zeichnet sich bereits heute in der unternehmerischen Realität ab. Während in Antwerpen in einen Ethan-*Cracker* investiert wird, zeigt die

Ankündigungen von Stilllegungen von Naphtha-*Crackern* die sinkende Wettbewerbsfähigkeit der Naphtha-basierten Produktion. Durch den starken Anstieg der Schiefergasproduktion in den USA kann Ethan als günstiges Beiprodukt aktuell zu niedrigen Preisen von dort importiert werden. Bei der Umorientierung zu schiffsgebundenen Rohstoffen wie Ethan haben Binnenstandorte mit geringer überregionaler Vernetzung wie die Cluster in Mitteldeutschland und Bayern einen strukturellen Standortnachteil.¹³ Biomasse, wie auch Kunststoffabfälle hingegen sind dezentrale Rohstoffe im Inland. Anstelle einer drohenden Abwanderung besteht hier vielmehr das Potenzial, in strukturschwächeren, ländlicheren Räumen einen Standortvorteil durch eine gute Biomasseverfügbarkeit zu erzielen.

¹³ Dabei müssen jedoch auch die unterschiedlichen Ausbeuten verschiedener Steamcracker-Technologien berücksichtigt werden. So lassen sich Butadien, Benzol, Xylol und Toluol nur in der Naphtha-basierten Route produzieren. Bereits heute ist daher die Produktion dieser Stoffe einer der wesentlichen unterstützenden Faktoren für die Wettbewerbsfähigkeit der bestehenden Cracker-Kapazitäten.

Ethylen-Produktion in den verschiedenen Ressourcenpfaden und Importszenarien

→ Abb. 16



Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025). Die Werte in den Klammern sind extern vorgegebene Nettoemissionen in CO₂-Äquivalenten; ¹pipelinegebundene Wasserstoff-Importe; ²Import von Methanol, Ethanol (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); ³Import von Methanol, Ethanol, HVC (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); HVC = High-Value Chemicals; Ethanol-Route = Ethanol-Dehydratisierung; Methanol-Route = Methanol-to-Olefins; Naphtha-Cracking zur Verarbeitung von fossilem Naphtha und rezykliertem Pyrolyse-Öl

Der Bedarf an Methanol in anderen Bereichen, wie beispielsweise der Schifffahrt, kann beim Aufbau einer Methanolwirtschaft Synergien generieren. Methanol spielt auch für die Transformation des Schiffs- und Flugverkehrs sowie als dezentral anwendbarer Energieträger eine vielversprechende Rolle. Diese verschiedenen, sich ergänzenden Nachfragesektoren können für den Hochlauf einer Methanolwirtschaft Synergien erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist das Unternehmen Vioneo, einem Scale-up der A.P. Moeller - Maersk. Maersk ist eine der weltweit größten Containerschiff-Reedereien und möchte mit Vioneo die erste großskalige Produktion fossilsfreier Kunststoffe auf Basis von grünem Methanol aufbauen.

5.4 CCS, Kohlenstoffmanagement und Negativemissionen

In den betrachteten Technologiefaden wird die CO₂-Abscheidung gezielt in drei Bereichen eingesetzt:

- für Bio-CCS zur Abscheidung überschüssiger biogener CO₂-Mengen bei der Produktion von biobasiertem Methanol,
- zur Abscheidung von prozesstechnisch entstehenden Emissionen in der Produktion, beispielsweise während der Verarbeitung von Ethylen zu Ethylenoxid, und
- bei der Verbrennung von nicht Recycling-fähigen Fraktionen von Abfällen. CO₂-Abscheidung bei fossilen Punktquellen wie in industriellen Kraftwerken wurden in dem Modell nicht betrachtet.

Die Einspeisekapazitäten für geologische CO₂-Speicher werden langfristig ein Flaschenhals für die Nutzung von CCS-Technologien sein.

Um der absehbar begrenzten Verfügbarkeit von Injektionskapazitäten (vgl. *CCS: CO₂-Abspaltung und -Speicherung in der Chemieindustrie*, S. 19) Rechnung zu tragen, wurde in den untersuchten Szenarien die maximal mögliche jährliche Einspeisekapazität für die chemische Industrie beschränkt. Die geologische Speicherung prozessgebundener Emissionen, vorwiegend aus der Biomasseverarbeitung, wurde auf 13,7 Megatonnen

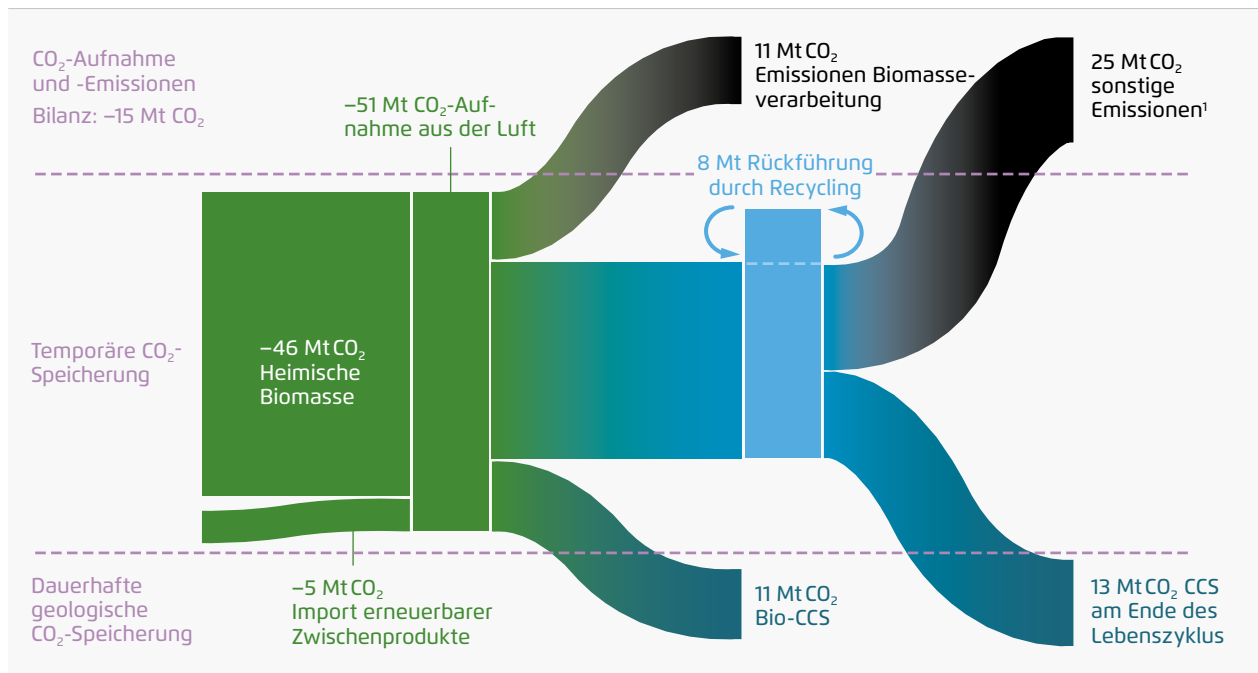
CO₂ jährlich begrenzt.¹⁴ Für die Abfallverbrennung wurde separat ein Limit in Höhe von 14 Megatonnen CO₂ vorgegeben. Die verfügbaren Kapazitäten für die Abspaltung von CO₂ an den Abfallverbrennungsanlagen werden über alle Szenarien hinweg nahezu vollständig ausgenutzt.

Durch die geologische Speicherung biogener Emissionen kann die Chemieindustrie zur Generierung von 15 Megatonnen CO₂-Negativemissionen beitragen. Von dem abgespaltenen CO₂ entfallen in den betrachteten Szenarien rund 45 bis 55 Prozent auf die Abspaltung an Biomasetechnologien. Abbildung 17 zeigt beispielhaft das Kohlenstoffmanagement des Importszenarios „Zwischenprodukte“. Von den rund 46 Megatonnen CO₂, welche zuvor durch heimische Biomasse aus der Atmosphäre entnommen wurden, wird in dem Szenario rund die Hälfte in Chemikalien, wie beispielsweise Methanol, gebunden. 11 Megatonnen CO₂ werden unmittelbar geologischen Speichern zugeführt, während weitere 13 Megatonnen CO₂ nach der Nutzungsphase im Rahmen der Abfallverbrennung geologisch gespeichert werden. Rund 11 Megatonnen biogenes CO₂ werden bei der Biomasseverarbeitung emittiert. Es könnten in der Praxis größere CO₂-Mengen auch eingespeichert werden und so zu zusätzlichen Negativemissionen beitragen, jedoch wurde in der technischen Modellierung der Zielwert von minus 15 Megatonnen CO₂ extern als Rahmenparameter vorgegeben. Unter Berücksichtigung sonstiger Emissionen des gesamten Lebenszyklus werden in diesem und den anderen fossilsfreien Szenarien netto minus 15 Megatonnen Negativemissionen erzeugt. Die Chemieindustrie wird damit klimapositiv. In dem teilfossilen Szenario wird nur ein Teil der Kohlenstoffbasis von fossil auf erneuerbar umgestellt, wodurch teilweise fossile Wertschöpfungsketten mit entsprechenden (insbesondere vor- und nachgelagerten) CO₂-Emissionen bestehen bleiben. Die Negativemissionen der neuen, erneuerbaren

¹⁴ Die maximal mögliche Einspeisekapazität für prozessgebundene Emissionen der Chemieindustrie leitet sich aus der branchenübergreifenden Betrachtung der Studie *Klimaneutrales Deutschland* ab (Agora Think Tanks, 2024).

Kohlenstoffmanagement im Importszenario Zwischenprodukte für das Jahr 2045

→ Abb. 17



Agora Industrie (2025). ¹umfasst die Emissionen des gesamten Lebenszyklus und insbesondere auch nicht-CO₂-Emissionen (z.B. Stickstoffemissionen);

Wertschöpfungsketten kompensieren diese verbleibenden fossilen Emissionen und ermöglichen eine bilanziell klimaneutrale Chemie.

Das abgeschiedene CO₂ kann grundsätzlich als Rohstoff für die Deckung der Kohlenstoffbedarfe der organischen Chemie genutzt werden – das ist aber teurer als andere Technologieoptionen. Insgesamt werden in den betrachteten Szenarien zwischen 24 und 32 Megatonnen CO₂ abgeschieden. Ein Großteil davon (82 bis 95 Prozent) wird dabei geologisch gespeichert. Nur ein kleiner Anteil wird unter Wasserstoffeinsatz stofflich für die Produktion genutzt. Eine Ausnahme stellt der Ressourcenpfad „Heimischer Wasserstoff“ dar, der in großem Maße auf Wasserstoff und CO₂ als Rohstoffbasis setzt. Hier wird in größeren Mengen abgeschiedenes CO₂ genutzt, um unter Beigabe von Wasserstoff synthetisches Methanol zu erzeugen. Voraussetzung dafür ist, dass große Mengen von kostengünstigem grünem Strom (insbesondere für die Elektrolyse) zur Verfügung stehen. Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass alternative Technologien auf Basis von Biomasse und Recycling sowie Importe jedoch kostengünstiger sind. CCU wird daher nur in geringem Umfang zur

Deckung verbleibender Kohlenstoffbedarfe gewählt, wenn nicht ausreichend Kohlenstoff aus günstigeren Quellen bezogen werden kann. Die Nutzung von abgespaltenem CO₂ zur Methanol-Produktion kann vor allem dann sinnvoll sein, wenn ohnehin eine Wasserstoffinfrastruktur geplant ist oder kostengünstig dezentral Wasserstoff produziert werden kann.

5.5 Investitionsbedarfe

Der Umbau der Energie- und der Kohlenstoffversorgung der chemischen Industrie ist mit substantiellen Investitionsbedarfen in neue Produktionsprozesse und -anlagen verbunden. Insbesondere die heimische Wasserstoffproduktion ist dabei ein zentraler Kostentreiber. Um die Produktionsprozesse vollständig auf Klimaneutralität umzustellen, sind in dem Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“ Gesamtinvestitionen von rund 50 Milliarden Euro notwendig. Dies entspricht – unter der Annahme eines linearen Investitionspfades – jährlichen Investitionen von rund 2,5 Milliarden Euro. Im Falle einer umfassenden Nutzung von heimisch produziertem

Wasserstoff steigen die Investitionsbedarfe massiv auf 114 Milliarden Euro an. Ursache dafür sind insbesondere die Investitionsbedarfe für Elektrolyseurkapazitäten. Die Investitionsbedarfe für den Erneuerbaren-Ausbau zur Deckung des zusätzlichen Strombedarfs sind darin nicht enthalten.

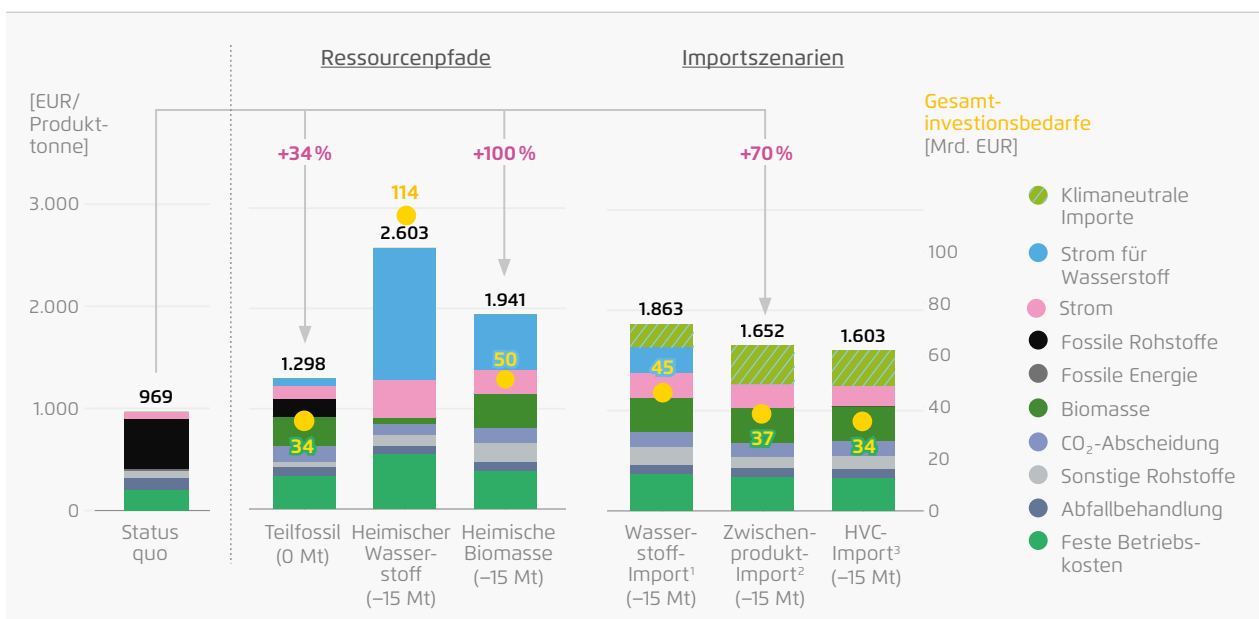
Die Kombination von heimischen Ressourcen und importierten Zwischenprodukten senkt Investitionsbedarfe und schafft gleichzeitig zusätzliche Wertschöpfung im Inland. Eine vollständige Deckung der Kohlenstoffbedarfe durch heimische Ressourcen ist vergleichsweise investitions- und betriebskostenintensiv (vgl. Abbildung 18, Ressourcenpfade „Heimische Biomasse“ und „Heimischer Wasserstoff“). Durch die Einbindung von Zwischenproduktimporten (Methanol, Ethanol, Ammoniak) lassen sich die Kapitalinvestitionen in eine defossilisierte Chemieindustrie um rund ein Viertel von 50 auf 37 Milliarden Euro reduzieren (Vergleich Ressourcenpfade „Heimische Biomasse“ und Importszenario „Zwischenprodukte“). Dies entspricht jährlichen Investitionen von rund 1,85 Milliarden Euro. Der Ressourcenpfad „Teilfossil“, in dem weiterhin zum Teil fossile

Ressourcen als Kohlenstoffquelle genutzt werden, bringt hingegen nur ein geringes Einsparpotenzial hinsichtlich der Investitionen. Der Investitionsbedarf dieses Pfades beläuft sich auf rund 34 Milliarden Euro und liegt damit nur zehn Prozent unter den Investitionsbedarfen des Pfades, der heimische Biomasse und den Import von grünen Derivaten effizient kombiniert. Eine nur teilweise Defossilisierung spart investitionsseitig somit nur rund 170 Millionen Euro jährlich, verzichtet aber auf wesentliche Vorteile der vollständigen Umstellung in Bezug auf Negativemissionen, Resilienzgewinn sowie zusätzlicher inländischer Wertschöpfung und Arbeitsplätze. Das mit Abstand investitionsintensivste Szenario ist mit 114 Milliarden Euro der Ressourcenpfad „Heimischer Wasserstoff“ aufgrund hoher Investitionsbedarfe in den Aufbau von Elektrolyse-Kapazitäten.

Die für die eine zukunftssichere Chemieindustrie benötigten jährlichen Investitionsbedarfe entsprechen rund 11 bis 39 Prozent der jährlichen Sachanlageinvestitionen der chemischen Industrie. Ersatzinvestitionen in klimaneutrale Verfahren machen den Standort zukunftsfähig. Die deutsche

Durchschnittliche Produktionskosten und Investitionsbedarfe in den Ressourcenpfaden und Importszenarien

→ Abb. 18



Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025). Die Werte in den Klammern sind extern vorgegebene Nettoemissionen in CO₂-Äquivalenten; ¹pipelinegebundene Wasserstoff-Importe; ²Import von Methanol, Ethanol (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); ³Import von Methanol, Ethanol, HVC (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); HVC = High-Value Chemicals

Chemieindustrie investiert jährlich rund 14,8 Milliarden Euro im In- und Ausland in Sachanlagen, der Anteil der Basischemie liegt bei in etwa 9,5 Milliarden Euro (VCI 2024). Rund ein Drittel dieser Investitionen dienen dabei der regulären Kapitalstockerneuerung am Ende der Anlagenlebensdauer.¹⁵ Die jährlich notwendigen Investitionen in die Umstellung der modellierten Prozesse hin zu erneuerbaren Kohlenstoff- und Energiequellen entsprechen somit schätzungsweise im Mittel rund einem Viertel der jährlichen Sachanlageinvestitionen der Chemieindustrie, beziehungsweise rund der Hälfte der regulär getätigten Ersatzinvestitionen. Dies verdeutlicht, dass künftige Ersatzinvestitionen so getätigt werden müssen, dass sie zu einem zukunftsfähigen, resilienten und klimaneutralen Umbau des Kapitalstocks beitragen. Insbesondere bei anstehenden Ersatzinvestitionen in *Steamcracker* steht die Chemie vor einer Richtungsentscheidung: 11 von 13 deutschen Anlagen wurden zwischen 1965 und 1985 in Betrieb genommen und sind somit zwischen 40 und 60 Jahre alt (Scholz et al. 2025). Unter Annahme einer durchschnittlichen technischen Lebensdauer von 50 bis 70 Jahren muss ein Großteil der bestehenden Anlagen in den kommenden Jahren ersetzt oder substanziell erneuert werden (vgl. Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019). Dies stellt eine Herausforderung, aber auch ein wichtiges Gelegenheitsfenster dar, ohnehin notwendige Investitionen in den Aufbau klimaneutraler Prozesse zu lenken. Es ist somit von zentraler Bedeutung, zügig die notwendigen Rahmenbedingungen für eine Umstellung der Prozesse auf erneuerbare Kohlenstoffe zu schaffen und fossile *Lock-ins* zu vermeiden.

5.6 Produktionskosten

Der Umstieg von fossilen Importen auf erneuerbare heimische Rohstoffe steigert die Resilienz des Wirtschaftsstandortes und schafft zusätzliche Arbeitsplätze und Wertschöpfung, ist aber mit Mehrkosten verbunden. Vergleicht man die Betriebskosten

klimaneutraler Produktionspfade mit den heutigen Produktionsverfahren zeigen sich deutliche Mehrkosten hinsichtlich der Betriebskosten. Je nach Szenario rangieren die durchschnittlichen Produktionskosten zwischen 1.298 und 2.603 Euro pro Produkttonne. Gegenüber den Betriebskosten im Status quo in Höhe von 968 Euro pro Produkttonne (exklusive CO₂-Kosten) entspricht dies Mehrkosten von 34 bis 169 Prozent. Dabei ist die Chemieproduktion auf Basis von heimischem Wasserstoff aufgrund hoher Kosten der Wasserstofferzeugung mit Abstand die teuerste Produktionsroute (vgl. Abbildung 18).¹⁶ Der Ressourcenpfad „Teilfossil“ ist aufgrund fortgesetzter fossiler Importe mit den geringsten Mehrkosten verbunden, doch auch hier steigen die durchschnittlichen Produktionskosten je Tonne Produkt um rund ein Drittel gegenüber dem Status quo an.

Analog zu den Investitionsbedarfen zeigt sich auch bei den betrieblichen Kosten ein Sweet-Spot in der effizienten Kombination von heimischen Rohstoffen und dem Import von Zwischenprodukten. Gegenüber einer ausschließlich auf heimischen Ressourcen basierenden fossilfreien Produktion können die Mehrkosten um knapp ein Drittel reduziert werden. Wenn ein Teil des heimischen Kohlenstoffbedarfs durch grüne Zwischenprodukte wie Methanol, Ethanol und Wasserstoff gedeckt wird, betragen die durchschnittlichen Produktionskosten 1.652 Euro pro Produkttonne. Zugleich werden die heimischen Biomasse- und Recyclingpotenziale bei einem begrenzten Import von grünen Zwischenprodukten weiterhin nahezu vollständig genutzt, wodurch wesentliche Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale im Inland gehoben werden. Die grünen Importe verdrängen inländischen Wasserstoff und CCU als teuerste Technologieoption.

Durch den Beitrag zur Generierung von Negativemissionen wären zusätzliche Einnahmequellen denkbar. In den vollständig defossilisierten Transformationspfaden trägt die Chemieproduktion zur Generierung von Negativemissionen in Höhe von

¹⁵ In etwa 46 Prozent der Investitionen dienen der Kapazitätserweiterung, 9 Prozent der Kostenersparnis und 13 Prozent der Erfüllung gesetzlicher Vorgaben. Die Angaben beziehen sich auf die deutsche Chemie- und Pharmaindustrie zusammengefasst (VCI 2024).

¹⁶ Für den Vergleich wurden modellierte Betriebskosten für das heutige Produktionssystem der Chemieindustrie genutzt.

15 Megatonnen CO₂ jährlich bei. Sobald, wie seitens der EU geplant, ein Markt für Negativemissionen geschaffen wird, könnten bei einem hypothetischen CO₂-Preis von 132 Euro pro Tonne Einnahmepotenziale in Höhe von insgesamt rund 2 Milliarden Euro oder 127 Euro pro Produkttonne entstehen. Die durchschnittlichen Produktionskosten für fossilfreie Chemikalien sinken durch diese zusätzlichen Einnahmepotenziale auf 1.525 Euro pro Produkttonne. Da die generierten Negativemissionen ein Produkt der gesamten Wertschöpfungskette (Biomasseproduktion, Verarbeitung in der Chemie und geologische Speicherung von biogenem CO₂) sind, stehen diese Einnahmepotenziale nicht zwangsläufig der Chemieindustrie zur Verfügung, können aber über die Wertschöpfungskette hinweg einen Teil der Mehrkosten einer fossilfreien Produktion kompensieren.

Die Preise für Chemieprodukte werden durch den Weltmarkt bestimmt – die Kosten fossiler Emissionen sind aktuell nicht eingepreist, sondern werden durch die Allgemeinheit getragen. CO₂-Kosten sind in den dargestellten Kostenschätzungen nicht abgebildet und werden auch in der Praxis bislang kaum effektiv bepreist beziehungsweise nicht auf Produktebene weitergereicht. Um Wettbewerbsnachteile an den globalen Märkten und Abwanderung durch eine einseitige CO₂-Bepreisung über den EU ETS I (*Carbon Leakage*) zu vermeiden, erhält die Chemieproduktion kostenfreie Zuteilungen von Emissionszertifikaten. Mit der Einführung des CBAM als alternativem *Carbon-Leakage*-Schutzmechanismus sollen die kostenfreien Zuteilungen bis 2034 auslaufen. Damit würde die Produktion von Chemikalien basierend auf fossilen Produktionsverfahren teurer werden. Unter Annahme eines perspektivisch denkbaren CO₂-Preises von 132 Euro pro Tonne würde die Bepreisung der direkten Emissionen der Chemieproduktion – überschlägig gerechnet – zusätzliche Kosten in Höhe von 1,8 Milliarden Euro beziehungsweise 100 Euro pro Produkttonne bedeuten. Die Kosten für konventionell hergestellte, fossile Chemikalien würde somit auf rund 1.069 Euro pro Produkttonne steigen. Der EU ETS I deckt derzeit lediglich direkte Emissionen aus der Industrie und der Stromerzeugung ab, während ein großer Teil der Emissionen der fossilen Wertschöpfungskette in vor- und nachgelagerten

Schritten freigesetzt werden und bislang unberücksichtigt bleiben (vgl. Kapitel 2.2).

Die verbleibende Kostenlücke kann durch die Bepreisung fossiler *Feedstocks* beziehungsweise vor- und nachgelagerter Emissionen geschlossen werden.

Unter Einbezug der Kostenminderungen durch die Einbindung grüner Zwischenproduktimporte, den Erlös von Negativemissionen und einer effektiven Bepreisung direkter CO₂-Emissionen besteht zwischen der konventionellen und der fossilfreien Produktion eine Kostenlücke in Höhe von 456 Euro pro Produkttonne. Würden fossile *Feedstocks* entsprechend der mit ihnen zusammenhängenden Emissionen in der vor- und nachgelagerten Wertschöpfungskette bepreist, ließe sich die Kostenlücke schließen. Bei einem Preis von 132 Euro pro Tonne CO₂ würden sich Mehrkosten in Höhe von 499 Euro pro Produkttonne ergeben (vgl. Abbildung 19).

Auf die Kosten für Endprodukte haben Mehrkosten für chemische Grundstoffe nur einen geringen Effekt.

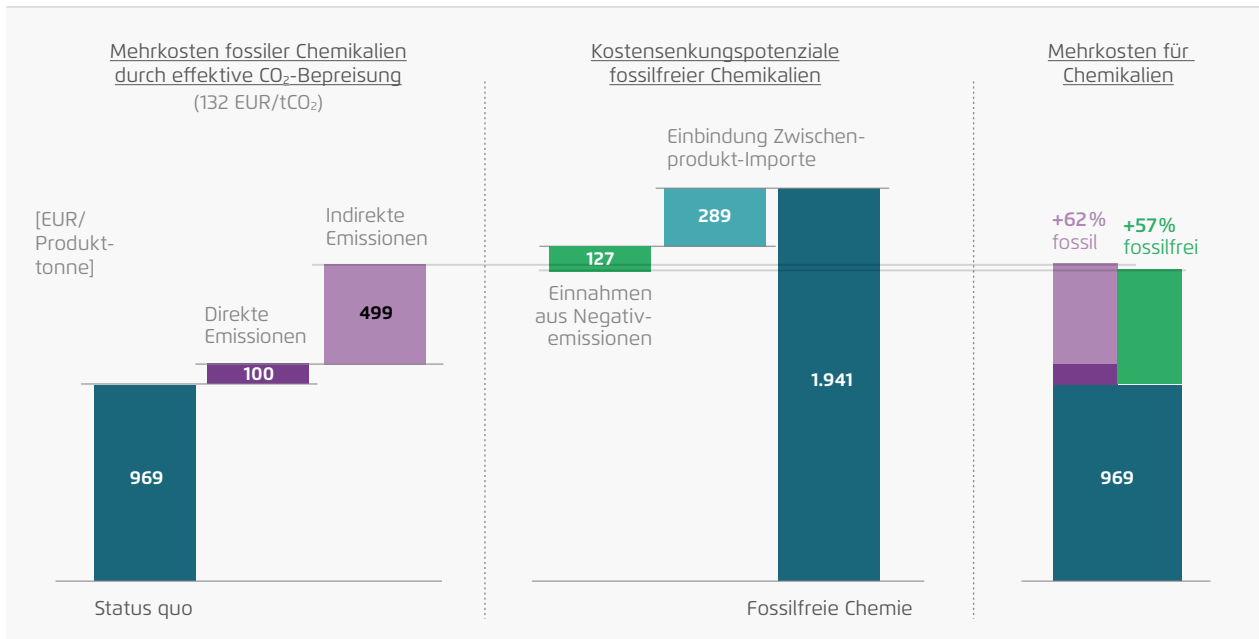
Die Produktionskosten von 1.525 Euro pro Produkttonne (unter Einbezug von Zwischenproduktimporten und Erlösen für Negativemissionen) entsprechen einer Kostensteigerung in Höhe von 57 Prozent gegenüber dem Status quo. Laut einer Analyse von Systemiq belaufen sich die Mehrkosten für Endprodukte wie Autos, Softdrinks oder Lebensmittel bei einer Preiserhöhung von Basischemikalien um 100 Prozent auf rund ein bis drei Prozent (vgl. Infobox *Mehrkosten auf Produktebene*, Systemiq 2022).

Damit sich der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Rohstoffe in der Breite der Chemieindustrie rechnet, muss die Politik einen geeigneten Rahmen schaffen.

Zentral dafür ist die Implementierung eines wirk-samen *Carbon-Leakage*-Schutzmechanismus, der die enthaltenen Emissionen von importierten ebenso wie von inländisch produzierten Produkten bepreist und damit die Weitergabe von CO₂-Kosten auf Endproduktebene ermöglicht. Gleichmaßen muss der Mechanismus ein *Level-Playing-Field* auch für Exporte in Regionen ohne oder mit einer geringeren CO₂-Bepreisung sicherstellen.

Politische Handlungsfelder, um die Kostenlücke zu schließen

→ Abb. 19



Agora Industrie (2025). Status quo auf Basis einer Modellierung für das Jahr 2025, exklusive CO₂-Kosten; CO₂-Emissionen und Negativemissionen unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus

→ Mehrkosten auf Produktebene

Es ist zu erwarten, dass sich die Mehrkosten auf Ebene der in dieser Studie modellierten Grundstoffchemikalien und Kunststoffe nur in deutlich moderatere Kostenanstiege auf der Ebene der Endprodukte übersetzen. So schätzt Systemiq, dass sich ein 100-prozentiger Kostenanstieg bei der Produktion von Basischemikalien sich auf der Ebene der Endprodukte lediglich mit Mehrkosten von ein bis drei Prozent niederschlägt (Systemiq 2022). Dabei ist zu beachten, dass auch der Kostenanstieg anderer klimaneutraler Materialien, wie beispielsweise grüner Stahl oder Zement, eine zusätzliche Preissteigerung nach sich ziehen kann. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Hochlauf klimaneutraler Materialien schrittweise erfolgt, wodurch plötzliche Preissprünge bei Endprodukten ausgeschlossen sind.

Kostensteigerung auf Endproduktebene bei Verdopplung der Kosten für Basischemikalien



Softdrinks:
Kostensteigerung
Endprodukt bis zu
3,2 %



Autos:
Kostensteigerung
Endprodukt bis zu
1,1 %



Lebensmittel:
Kostensteigerung
Endprodukt bis zu
0,9 %

Basierend auf Systemiq (2022)

Darüber hinaus muss ein Mechanismus entwickelt werden, der die Nutzung fossiler Kohlenstoffquellen und die damit verbundenen Emissionen bepreist und so einen Anreiz zur Vermeidung indirekter Emissionen schafft. Während perspektivisch eine effektive Bepreisung fossiler *Feedstocks* und Emissionen die Kostenlücke schließen kann, ist eine Reihe flankierender industriepolitischer Maßnahmen nötig, damit die Industrie schon jetzt notwendige Schritte in Richtung einer fossilfreien und klimaneutralen Chemieproduktion gehen kann (vgl. Kapitel 7).

5.7 Beschäftigungs- und Wertschöpfungspotenziale

Das *Insourcing* der Rohstoffbasis schafft Arbeitsplätze und zusätzliche Wertschöpfung im Inland.

Aktuell diskutierte Standortschließungen und der damit einhergehende drohende Stellenabbau machen deutlich: Der Chemiestandort Deutschland steht in Bezug auf seine Wettbewerbsfähigkeit an globalen Märkten vor großen Herausforderungen – unabhängig von klimapolitischen Maßnahmen und selbst bei einer Fortführung fossiler Produktionsweisen. Angesichts des wachsenden Importdrucks, etwa aus China, sowie anstehenden Investitionen in Regionen wie Indien erscheint es fraglich, ob das aktuelle Beschäftigungs- und Wertschöpfungsniveau in den konventionellen Produktionsrouten der Basischemie vollständig erhalten werden kann. Vielmehr steht die Grundstoffchemie in Deutschland und Europa vor der Aufgabe, Märkte für grüne Basischemikalien zu erschließen, in denen sie durch Kernkompetenzen wie Innovationskraft sowie die Entwicklung von Qualitäts- und Spezialprodukten Wertschöpfung in Deutschland und Europa sichern kann. Wie die Modellierungsergebnisse zeigen, eröffnet die Umstellung der Ressourcenbasis auf Biomasse und recycelten Kohlenstoff die Chance, Teile bislang im Ausland angesiedelter Wertschöpfungsketten zurück nach Deutschland zu holen und durch die Produktion grüner Plattformchemikalien für grüne Leitmärkte zusätzliche Wertschöpfung und Arbeitsplätze im Inland zu schaffen.

Besonders in der organischen Chemie entstehen neue Arbeitsplätze durch die Weiterverarbeitung bio- oder recyclingbasierter Zwischenprodukte.

Aktuell sind in den in dieser Studie modellierten Produktionsprozessen rund 109.000 Arbeitnehmende beschäftigt, dies entspricht rund einem Drittel der Gesamtbeschäftigtenzahl der deutschen Chemieindustrie.¹⁷ Der größte Anteil entfällt mit rund 50 Prozent auf die organische Chemie. Durch die Umstellung der Rohstoffbasis können bis zu rund 53.000 zusätzliche Arbeitsplätze in der chemischen Industrie entstehen, weitere 35.000 entstehen in der Abfallwirtschaft, zum Beispiel durch verbesserte Sammlung und Sortierung. Allein in der Produktion von Synthesegas aus der Biomassevergasung sowie der Produktion von Pyrolyse-Öl entstehen bis zu 31.000 neue Jobs (vgl. Abbildung 20). In der organischen Chemie entstehen je nach gewähltem Ressourcenpfad zwischen 8.000 und 27.000 zusätzliche Arbeitsplätze. Demgegenüber sind aufgrund des in allen Szenarien angenommenen leichten Produktionsrückgangs moderate Beschäftigungsrückgänge in der anorganischen Chemie, der Ammoniak- und Düngemittelproduktion sowie der Kunststoffproduktion zu verzeichnen.¹⁸ Diese Beschäftigungsrückgänge werden jedoch durch den Beschäftigungszuwachs in den neu entstehenden Geschäftsfeldern deutlich überkompensiert.

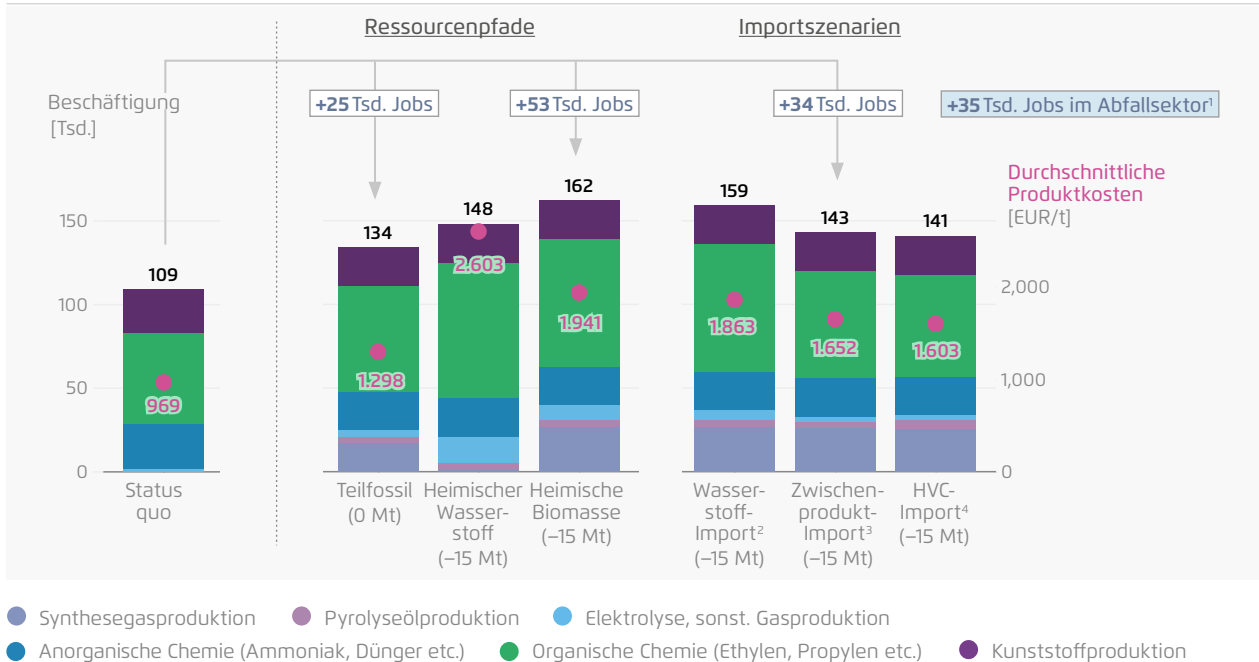
Die Kombination heimischer Rohstoffe mit dem Import von Zwischenprodukten verbindet zusätzliche Beschäftigung mit Einsparpotenzialen bei den Produktionskosten. Die Mehrkosten einer fossilfreien Produktion können durch eine effiziente

17 Die Studie legt einen Fokus auf die Modellierung der Basischemie, die Wertschöpfungskette der Kunststoffproduktion wird ebenfalls berücksichtigt. Nicht mit berücksichtigt werden jedoch die Arbeitsplätze in andere nachgelagerte Wertschöpfungsstufen der weiterverarbeitenden Chemie wie Düngemittel, Kautschuk, Acrylchemie, Polyurethane sowie sonstige Spezial- und Feinchemikalienproduktion.

18 Um Materialeffizienzen und Substitutionseffekte zu berücksichtigen, wurde in der Modellierung ein allgemeiner Produktionsrückgang von 0,5 Prozent jährlich sowie ein zusätzlicher spezifischer Produktionsrückgang von 0,16 Prozent für die Polymerproduktion angenommen. Mögliche Verschiebungen von Produktionskapazitäten ins Ausland aufgrund von sinkender Wettbewerbsfähigkeit deutscher Standorte wurden nicht angenommen.

Beschäftigungseffekte und durchschnittliche Produktionskosten in den Ressourcenpfaden und Importszenarien

→ Abb. 20



Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025). Die Werte in den Klammern sind extern vorgegebene Nettoemissionen in CO₂-Äquivalenten; ¹In allen Ressourcenpfaden und Importszenarien; ²Pipelinegebundene Wasserstoff-Importe; ³Import von Methanol, Ethanol (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); ⁴Import von Methanol, Ethanol, HVC (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); HVC = High-Value Chemicals

Kombination von heimischer Biomasse und Kunststoffrecycling und dem Import von Wasserstoffderivaten um rund 30 Prozent gesenkt werden (Vergleich der Szenarien „Heimische Biomasse“ und „Zwischenproduktimporte“). Der positive Beschäftigungseffekt durch das *Insourcing* der Rohstoffversorgung wird dadurch nur marginal gemindert. In dem Importszenario „Zwischenprodukte“ wird die inländische Produktion synthetischer Moleküle auf Basis von Wasserstoff durch Importe ersetzt. Aufgrund der geringeren Beschäftigungsintensität der Elektrolyse sind die zusätzlichen Arbeitsplatzeffekte in der wasserstoffbasierten Route jedoch geringer als die der biogenen Methanolproduktion, sodass die Gesamtbeschäftigung gegenüber dem Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“ nur leicht sinkt. Die positiven Beschäftigungseffekte in der biogenen Synthesegasproduktion sind hingegen vergleichsweise robust über verschiedene Szenarien hinweg, da heimische Biomasse auch dann umfänglich genutzt wird, wenn ein Teil der Kohlenstoffbedarfe durch Importe gedeckt wird. Im Ressourcenpfad

„Heimischer Wasserstoff“ fallen die Beschäftigungseffekte aufgrund der verminderten Biomassenutzung zwar deutlich geringer aus, dafür entstehen bis zu 14.000 zusätzliche Arbeitsplätze in der Wasserstoff-Elektrolyse. Wird der Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie hingegen weiterhin teilweise durch fossile, importierte Rohstoffe gedeckt, ergibt sich nur ein geringer positiver Beschäftigungseffekt. Weitere rund 35.000 zusätzliche Jobs entstehen in allen betrachteten Szenarien außerdem in der Abfallwirtschaft. Auch in der Landwirtschaft besteht Potenzial für zusätzliche Beschäftigung durch einen Umbau der Biomassenachfrage sowie dem Aufbau einer Bioökonomie – diese Effekte wurden jedoch im Rahmen der Studie nicht näher untersucht.

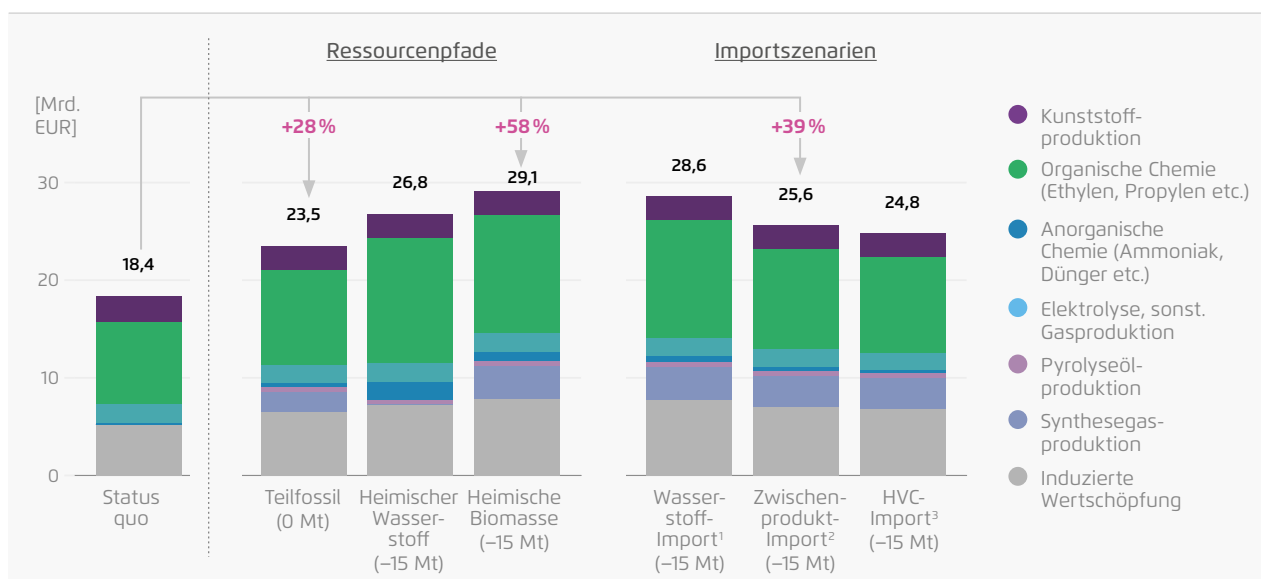
Das *Insourcing* der Rohstoffbasis eröffnet zudem Beschäftigungspotenziale in Produktionsbereichen mit überdurchschnittlichen Löhnen. Die chemische Industrie ist traditionell durch gut bezahlte Arbeitsplätze gekennzeichnet: 2024 lag das durchschnittliche Entgelt je Beschäftigten bei rund 69.000 Euro

und damit deutlich über dem Durchschnitt des Verarbeitenden Gewerbes mit rund 56.100 Euro (VCI 2024). Mit dem Risiko der Abwanderung bestimmter Produktionszweige ins Ausland ist somit auch die Sorge verbunden, dass insbesondere die Produktionsbereiche mit hohen Wertschöpfungsbeiträgen und entsprechend hohen Löhnen verloren gehen. Die analysierten Szenarien zeigen jedoch, dass durch eine Stärkung der vorgelagerten Wertschöpfungsketten Arbeitsplätze in den Teilbereichen der chemischen Industrie geschaffen werden, die bislang durch hohe Löhne gekennzeichnet sind. So können zusätzliche Arbeitsplätze in der organischen Chemie geschaffen werden, einem vergleichsweise gut bezahlten Bereich der chemischen Industrie. Die tatsächlichen Lohnpotenziale neuer Wertschöpfungsketten hängen jedoch von vielen Faktoren ab, die in dieser Studie nicht alle vertieft analysiert wurden. Trotz eines leichten Rückgangs der Gesamtproduktion sowie einem teilweisen Import von Zwischenprodukten steigt die Beschäftigung in diesem Bereich, insbesondere in der Methanolproduktion und -weiterverarbeitung (*Methanol-to-Olefin*).

Auch die Wertschöpfung der Chemieindustrie in Deutschland kann durch die Umstellung der Ressourcenbasis gesteigert werden. Bis 2045 können durch das *Insourcing* der Rohstoffbasis zusätzliche direkte Wertschöpfungspotenziale von 3,8 bis 8 Milliarden Euro jährlich für die chemischen Industrie realisiert werden. Zusätzliche Wertschöpfungspotenziale entstehen zudem im Abfallsektor sowie der Biomasseproduktion, wurden in dieser Studie jedoch nicht explizit modelliert. Die höchsten zusätzlichen Wertschöpfungspotenziale erzielt dabei der Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“. Etwas geringer sind die direkten Wertschöpfungseffekte im Ressourcenpfad „Heimischer Wasserstoff“, der Ressourcenpfad „Teilfossil“ erreicht aufgrund eines nur teilweisen *Insourcings* der Rohstoffbasis die niedrigste zusätzliche Wertschöpfung. Die zusätzlichen Wertschöpfungspotenziale durch das Ressourcen-*Insourcing* können auch dann erhalten bleiben, wenn ein Teil der Kohlenstoffbedarfe durch den Import von grünen Derivaten oder Zwischenprodukten aus dem Ausland gedeckt wird. Zwar reduziert sich die direkte Wertschöpfung in diesem Szenario von rund 21,2 auf 18,6 Milliarden Euro, liegt aber dennoch weiterhin deutlich über dem Status quo. Darüber hinaus kann

Wertschöpfungseffekte in den Ressourcenpfaden und Importszenarien

→ Abb. 21



Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025). Die Werte in den Klammern sind extern vorgegebene Nettoemissionen in CO₂-Äquivalenten; ¹ pipelinegebundene Wasserstoff-Importe; ² Import von Methanol, Ethanol (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); ³ Import von Methanol, Ethanol, HVC (schiffsgebunden) und Wasserstoff (pipelinegebunden); HVC = High-Value Chemicals

neben den direkten Wertschöpfungseffekten aus der Produktion außerdem eine zusätzliche induzierte Wertschöpfung aus Löhnen und Gehältern von bis zu rund 2,6 Milliarden Euro generiert werden.

Der Großteil der zusätzlichen Wertschöpfung entfällt auf die organische Chemie. Hier verschieben sich die Wertschöpfungsaktivitäten vom

Steamcracking zur Methanolsynthese und der Olefin- und Aromaten-Synthese auf Basis von Ethanol und Methanol. Zusätzliche Wertschöpfung wird auch in der Rohstoffversorgung, insbesondere in der Synthesegasproduktion, erzielt, wenngleich der relative Wertschöpfungsbeitrag aufgrund einer geringeren Produktivität kleiner als der Beschäftigungsbeitrag dieser Prozesse ist.

6 Die Transformation in der Praxis: Einblicke in die Transformation von Verbundstandorten

Die Chemieindustrie ist in Verbundstandorten organisiert, an denen in der Regel verschiedene Unternehmen zusammenarbeiten und ihre Energie- und Ressourcenströme über gemeinsame Infrastrukturen oft eng miteinander verknüpft haben. Diese Organisationsstruktur bietet sowohl Vorteile als auch Herausforderungen für die Transformation. Einerseits lassen sich durch den gemeinsamen Bezug und die integrierte Nutzung von Energie und grünen Rohstoffen Synergien heben – beispielsweise durch eine effizientere Nutzung der benötigten Infrastrukturen. Andererseits kann ein hoher Vernetzungsgrad jedoch zu Herausforderungen führen, wenn die Transformation eines Prozessschrittes gleichzeitig Anpassungen in verbundenen oder nachgelagerten Prozessen erforderlich macht. Neben der Vernetzung innerhalb der Chemieparks bestehen zudem teils enge stoffliche Vernetzungsstrukturen zwischen verschiedenen Standorten – teils sogar mit Chemieparks in Nachbarländern. Beispielsweise ist die Chemieindustrie im Westen Deutschlands stark mit den Standorten in

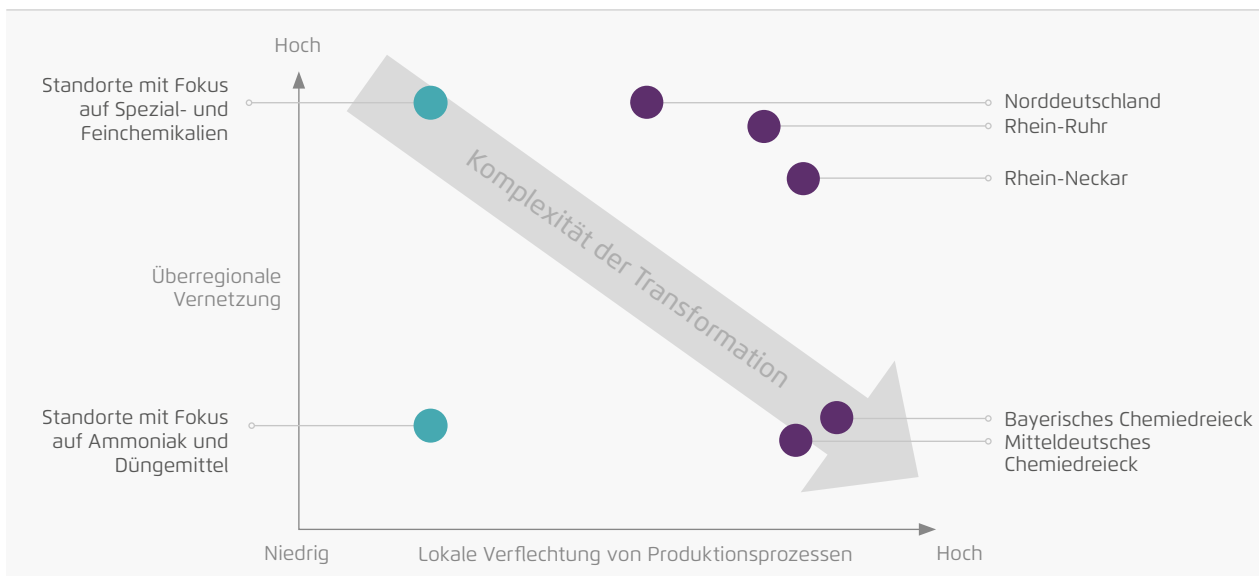
Belgien und den Niederlanden vernetzt. Diese überregionale Vernetzung zeigt sich in Pipelinesystemen für verschiedene Basischemikalien wie Ethylen. In anderen Regionen, insbesondere in Süd- und Ostdeutschland, agieren die Chemiecluster hingegen stärker autark und sind weniger überregional vernetzt. Auch die lokale energetische Verflechtung unterscheidet sich: Standorte mit *Steamcrackern* weisen in der Regel einen hohen energetischen Vernetzungsgrad auf, während Standorte mit Fokus auf Weiterverarbeitung energetisch (und stofflich) meist weniger stark verflochten sind.

Der Grad der Vernetzung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Komplexität der Transformation.

Abbildung 22 zeigt die Transformationskomplexität von Chemieparks als Funktion der lokalen Verflechtung von Produktionsprozessen und des überregionalen Vernetzungsgrades. Bei hoher lokaler Wertschöpfungstiefe beziehungsweise stofflicher Vernetzung haben Transformationsentscheidungen

Transformationskomplexität von Chemieregionen und ausgewählten Sparten der Chemieindustrie

→ Abb. 22



Agora Industrie, Fraunhofer IKTS und Carbon Minds (2025). Schematische Darstellung ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

in einer Anlage unmittelbare Effekte auf verknüpfte Prozesse. Insbesondere technologische Veränderungen, wie beispielsweise der Umstieg vom *Steamcracker* auf die Methanol-Route, können zu einem veränderten Produktionsportfolio führen. Anlagen, die bisher Nebenprodukte des *Steamcrackers* verarbeitet haben, müssen Alternativen finden. Je höher der überregionale Vernetzungsgrad eines Chemieparks ist, desto leichter lassen sich alternative Versorgungsoptionen erschließen. Dementsprechend resilienter ist eine stark (über-) regional vernetzte Produktion gegenüber Transformationsschritten. An Standorten mit geringer Anbindung an überregionale Versorgungsstrukturen können Veränderungen in den Stoff- und Energieflüssen, beispielsweise im Zuge des Umbaus eines *Steamcrackers*, schwerer ausgeglichen werden, da weniger Infrastrukturen für eine alternative Versorgung bestehen oder die Versorgungskosten höher sind. Dies betrifft beispielsweise die Cluster im Süden und Osten Deutschlands. Im Gegensatz dazu sind die Cluster im Norden, Westen und Südwesten stofflich gut vernetzt, sodass eine grüne Transformation der Standorte und Unternehmen stärker iterativ und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgen kann. Durch überregionale Versorgungsalternativen sowohl auf Rohstoff- als auch Energieebene ist eine Entkopplung und Neuvernetzung einfacher möglich.

Verbundstandorte benötigen maßgeschneiderte Konzepte. Die lokalen Gegebenheiten sowie das jeweilige Produktportfolio bestimmen maßgeblich die Transformationsstrategie. Während bei einer geringen lokalen Verflechtung und guten überregionalen Vernetzung der Umbau des Energie- und Rohstoffversorgungssystem iterativ erfolgen kann, ist bei einer hohen Verbundkomplexität und wenigen überregionalen Versorgungsalternativen eine Koordination beim Umbau der Energie- und Produktionssysteme im Verbund erforderlich.

Um den Status quo der Transformation an den Verbundstandorten zu erfassen und die Relevanz der Studienergebnisse für die Praxis zu überprüfen, wurden im Rahmen dieser Studie Interviews mit Betreibern verschiedener Verbundstandorte geführt.

Dabei zeigt sich: Je nach Produktportfolio sind die Einschätzungen zu den Herausforderungen der Transformation sehr heterogen. Standorte mit einem diversen Prozessportfolio und einem Schwerpunkt auf Spezial- und Feinchemie blicken optimistischer in die Zukunft, während Standorte mit einem hohen Anteil an Basischemie eher zurückhaltend sind. Bei ersteren stellt die Herausforderung insbesondere die Transformation der Energieversorgung dar.

Der klimafreundliche Umbau der Energieversorgung wird an vielen Chemiestandorten bereits vorangetrieben. Die Einbindung von günstigem erneuerbarem Strom wird bereits in der Breite vorangetrieben, beispielsweise durch einen stärker flexiblen Betrieb eigener Kraftwerke und PPA-Bezug, den Einsatz flexibler E-Boiler und Energiespeicher. Wärmepumpen werden derzeit als nicht wirtschaftlich wahrgenommen, insbesondere aufgrund hoher Investitionskosten und langer Amortisationszeiten. Darüber hinaus wird vor allem die Umrüstung bestehender KWK-Anlagen auf Biomasse, Abfälle oder Wasserstoff erprobt. Als Herausforderungen für das weitere Vorantreiben des Umbaus werden fehlende Klarheit in der Allokation von Emissionen an versorgte Unternehmen aus dem gemeinsamen Versorgungsnetz sowie in Bezug auf die Deklaration von Abwärme aus industriellen Prozessen genannt, vor allem aber auch die Verfügbarkeit und Kosten von grünem Strom und Wasserstoff.

Maßnahmen zur stofflichen Defossilisierung werden bislang nur vereinzelt umgesetzt. CCU spielt dabei bislang kaum eine Rolle. Erste Pilotprojekte betrachten vor allem die Nutzung von Biomasse und Abfällen (Pyrolyse). Großskalige inländische Anlagen zur Methanol- oder Ethanol synthese, zum Beispiel aus Biomasse, sind gegenwärtig kaum geplant, da hohe Unsicherheiten in Bezug auf künftige Marktpotenziale und die Wettbewerbsfähigkeit bestehen. Auch Unsicherheiten bezüglich der Verfügbarkeit von erneuerbaren Rohstoffen hemmen Investitionen, insbesondere an Standorten mit Binnenlage. Um auf den zunehmenden Wettbewerbsdruck zu reagieren, zeigen sich in den Chemieparks jedoch erste Tendenzen zur Diversifikation: So siedeln sich erste Green-Tech-Start-ups an und treiben die Transformation mit innovativen Ansätzen voran.

7 Politische Handlungsempfehlungen

7.1 Preisanreize für klimafreundliche Produktion schaffen

7.1.1 CO₂-Bepreisung stärken und *Carbon-Leakage*-Schutz sicherstellen

Die CO₂-Bepreisung durch den Europäischen Emissionshandel ist für die Industrie in Europa ein zentrales Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Durch den Erwerb von Emissionszertifikaten werden die gesellschaftlichen und ökologischen Kosten der THG-Emissionen bepreist und die Kostenlücke zwischen emissionsintensiven und emissionsarmen Produkten wird verringert. Bei handelsintensiven Produkten wie Chemikalien wird der Preis jedoch häufig durch den Weltmarkt bestimmt. Unternehmen können die CO₂-Kosten daher nur bedingt weiterreichen, ohne an Wettbewerbsfähigkeit zu verlieren. Um die exportorientierte europäische Industrie vor einseitigen Nachteilen auf globalen Märkten zu schützen und die Abwanderung emissionsintensiver Industrien (*Carbon Leakage*) zu vermeiden, erhalten diese Branchen daher bisher den Großteil ihrer Emissionszertifikate kostenlos zugeteilt. Um eine wirksame CO₂-Bepreisung zu ermöglichen, muss sie von wirksamen Maßnahmen zum Schutz vor *Carbon Leakage* begleitet werden. Für die Transformation ist entscheidend, beim Europäischen Emissionshandel konsequent auf Kurs zu bleiben, um politische und ökonomische Verlässlichkeit zu garantieren. Zur weiteren Stärkung der Wirksamkeit der CO₂-Bepreisung empfehlen sich insbesondere folgende Maßnahmen:

→ Wirksamkeit der CO₂-Bepreisung stärken

Die Lenkungswirkung des EU ETS I sowie der Grundgedanke, dass gesellschaftliche und ökologische Kosten der THG-Emissionen eingepreist werden müssen, wird durch die Vergabe freier Zuteilungen stark eingeschränkt. Die Kosten für verursachte CO₂-Emissionen werden somit bisher überwiegend durch die Allgemeinheit getragen, anstatt sie dem Verursacher – also der

Chemieindustrie beziehungsweise dem Zwischen- oder Endverbraucher – anzulasten. Gleichzeitig ist diese Lösung nicht von Dauer: Da die Emissionsobergrenze im EU-Emissionshandel sinkt, stehen immer weniger Zertifikate für die kostenlose Zuteilung zur Verfügung. Wie in anderen Sektoren sollte daher der CBAM den *Carbon-Leakage*-Schutz auch für Chemikalien sicherstellen, die kostenlose Zuteilung sollte hingegen auslaufen.

→ *Carbon-Leakage*-Schutz einführen und Weitergabe von CO₂-Kosten ermöglichen

Als zentrales *Carbon-Leakage*-Instrument sollte die Aufnahme zentraler Basischemikalien in den europäischen *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) geprüft werden. Ein wirksamer CO₂-Grenzausgleichsmechanismus schafft ein *Level-Playing-Field*, in dem die Kosten des CO₂-Ausstoßes sowohl inner- als auch außerhalb der EU Berücksichtigung finden. Der Einbezug der Chemieindustrie in den CBAM steht vor der Herausforderung einer großen Produktvielfalt und komplexer Wertschöpfungsketten. Ein Großteil der produktionsbedingten Emissionen entsteht bei der Herstellung weniger zentraler Plattformchemikalien, während nachgelagerte Verarbeitungsschritte vergleichsweise emissionsarm sind. Ziel muss es daher sein, den administrativen Aufwand durch die Einbeziehung einer begrenzten Zahl besonders emissionsintensiver Chemikalien und Prozessschritte möglichst gering zu halten und gleichzeitig Umgehungsrisiken zu minimieren. Zudem gilt der CBAM in seiner aktuellen Form nur für importierte Güter. Politisch wird aktuell geprüft, inwieweit der Mechanismus auch auf Exporte ausgeweitet werden kann. Dabei muss gewährleistet sein, dass eine solche Exportlösung auch für die Chemieindustrie anwendbar ist und einen wirksamen Schutz bietet.

→ EU ETS I auf Müllverbrennung ausweiten

Die Müllverbrennung trägt maßgeblich zu den Emissionen im Lebenszyklus von Kunststoffen

bei. Im Kontext der anstehenden Revision des EU ETS I im Jahr 2026 sollte die Müllverbrennung, wie aktuell vorgesehen, in den Emissionshandel einbezogen werden. Dies stärkt den finanziellen Anreiz, Kunststoffe zu recyceln oder nicht recyclingfähige Kunststoffe unter Einsatz von CO₂-Abscheidung und -Speicherung zu verbrennen.

7.1.2 Finanzielle Anreize für den Umstieg auf erneuerbare Kohlenstoffquellen einführen

Emissionen aus der Gewinnung fossiler Rohstoffe, der Nutzungsphase und der Verbrennung am Lebenszyklusende machen bis zu drei Viertel der gesamten Lebenszyklusemissionen aus (Agora Industrie 2023). Um diese weitestgehend zu vermeiden, ist der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Kohlenstoffquellen unumgänglich. Derzeit werden mit dem EU ETS I jedoch nur die Emissionen erfasst, die in der Produktion und im Energiesektor entstehen. Ein Einbezug der Müllverbrennung in den EU ETS I wäre ein erster wichtiger Schritt, sollte aber durch weitere finanzielle Anreize und industriepolitische Maßnahmen flankiert werden. In Ergänzung zum EU ETS I sollte ein Mechanismus geschaffen werden, der die derzeit gesellschaftlich getragenen Kosten, die durch die stoffliche Nutzung fossiler Rohstoffe entstehen, in die Produktion einpreist.

→ Markthochlauf von Biomasse- und Recyclingverfahren fördern

Damit biobasierte Rohstoffe großskalig in der Chemieindustrie eingesetzt werden, sind zusätzliche finanzielle Anreize erforderlich. Besonders in der Anfangsphase – und so lange noch keine Bepreisung für stofflich genutzten fossilen Kohlenstoff besteht – sollte der Markthochlauf von Biomasse- und Recyclingverfahren beispielsweise im Rahmen der Klimaschutzverträge gefördert werden.

→ Fossilen Kohlenstoff bepreisen

Mittelfristig sollte eine Bepreisung für stofflich genutzten fossilen Kohlenstoff eingeführt werden, die die Emissionsbepreisung durch den EU ETS I ergänzt. Um Unternehmen Planungssicherheit zu

geben, müssen die regulatorische Ausgestaltung und der Zeitplan zur Implementierung bereits heute festgelegt werden. Teil dieses Zeitplans sollte auch ein Zieldatum für den Ausstieg der EU aus fossilen, stofflich genutzten Rohstoffen sein. Der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Kohlenstoffquellen ist eine Mammutaufgabe, die nicht nur die chemische Industrie, sondern auch die Landwirtschaft und Abfallwirtschaft betrifft. Sie erfordert Vorlaufzeiten, um Kompetenzen aufzubauen und innovative fossilfreie Prozesse zu skalieren. Dafür sind ein klares politisches Bekenntnis sowie eine industriepolitische Begleitung notwendig.

7.1.3 Rahmen für die Vergütung von Negativemissionen schaffen

Durch den Umstieg auf erneuerbare Kohlenstoffquellen wie Biomasse in Kombination mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung kann die Chemieindustrie zur Generierung von Negativemissionen und damit zur gesamtgesellschaftlichen Klimaneutralität beitragen. Die Vermarktung von Negativemissionen kann als zusätzliche Einnahmequelle genutzt werden und so einen Teil der Kosten des Umstiegs von fossilem Öl auf nachhaltige Biomasse finanzieren.

→ Zertifizierungsrahmen nachschärfen

Wichtige Grundvoraussetzung für die Etablierung eines Marktes für CO₂-Entnahmen aus der Atmosphäre, von dem auch die Chemieindustrie profitieren kann, ist ein belastbarer Zertifizierungsrahmen. Der Zertifizierungsrahmen der EU (*Carbon Removal Carbon Farming Regulation, CRCF*) muss nachgeschärft werden, um diese Robustheit zu gewährleisten. Insbesondere sollten die Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Biomasse sowie an die Permanenz und Zusätzlichkeit der CO₂-Entnahme deutlich gestärkt werden (vgl. Öko Institut 2025).

→ Negativemissionen vergüten

Gezielte Maßnahmen sind wichtig, um den Hochlauf permanenter Negativemissionen zu beschleunigen – zunächst durch klare Anreize, etwa ein europäisches Beschaffungsprogramm

für *Removals* (CO₂-Entnahmen). Mittelfristig sind politische Verlässlichkeit und eindeutige Zielvorgaben notwendig, damit neue Geschäftsmodelle entstehen können. Dies erfordert regulatorische Instrumente, die permanente Negativemissionen in die europäische Klimapolitik einbetten – etwa durch eine Anbindung an den EU-Emissionshandel oder ein eigenständiges *Removal Trading Scheme*.

7.2 Investitionen anreizen

Der Übergang der Chemieindustrie zu Biomasse und Recycling erfordert Investitionen von bis zu 50 Milliarden Euro. Damit diese Mittel im laufenden Geschäft der Grundstoffchemie, das nur geringe Margen aufweist, aufgebracht werden können, ist staatliche Unterstützung notwendig. Auch die betrieblichen Kosten steigen durch den Umstieg; diese Mehrkosten sollten zumindest übergangsweise staatlich abgedeckt werden, bis grüne Absatzmärkte ausreichend etabliert sind.

→ CO₂-Differenzverträge weiterentwickeln und ausweiten

Ob und wie schnell sich eine Investition rechnet, hängt von der Entwicklung der CO₂-, Energie- und Rohstoffpreise sowie von den Erlösmöglichkeiten an grünen Märkten ab. Diese Faktoren werden stark von politischen Entscheidungen beeinflusst und sind daher mit hoher Planungsunsicherheit und Risikoaufschlägen für Unternehmen verbunden. CO₂-Differenzverträge (Klimaschutzverträge) sind ein sinnvolles Instrument, um Mehrkosten über einen begrenzten Zeitraum dynamisch auszugleichen und so Planungssicherheit zu schaffen. Der bestehende Mechanismus sollte bürokratiearm weiterentwickelt und um einen Ansatz zur Elektrifizierung von Prozesswärme ergänzt werden. Eine Reduzierung der Anforderungen an die Projektgröße ermöglicht zudem die Absicherung auch kleinerer Investitionsvorhaben.

→ Programme zur Förderung von Investitionskosten stärken

Bestehende Förderprogramme auf Bundesebene, wie die Bundesförderung Industrie & Klimaschutz (BIK) und die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW), sollten weiter gestärkt werden. Auch europäische Initiativen, etwa im Rahmen des *EU Innovation Fund* oder über eine *Industrial Decarbonisation Bank*, können bei der Finanzierung notwendiger Investitionen eine wichtige Rolle spielen.

7.3 Recycling- und Biomassepotenziale heben

7.3.1 Recyclingpotenziale heben

Damit Kunststoffabfälle künftig verstärkt als Rohstoffe genutzt werden können, müssen die Sammlung und Sortierung von Kunststoffabfällen verbessert, die Recyclingfähigkeit von Kunststoffprodukten erhöht und Märkte für Sekundärrohstoffe gestärkt werden. Die Bundesregierung sollte die finanzielle Unterstützung für zirkuläre Geschäftsmodelle ausbauen und den Hochlauf von Recyclingverfahren industriepolitisch begleiten.

→ Markthochlauf des mechanischen und chemischen Recyclings fördern

Die Bundesregierung sollte die Skalierung des mechanischen Recyclings finanziell unterstützen und Risiken absichern. Durch die Förderung erster großskaliger Leuchtturmprojekte im chemischen Recycling können wichtige Erfahrungen gesammelt werden. Auf Basis dieser ersten Erfahrungen sollte die Komplementarität zum mechanischen Recycling sichergestellt werden.

→ Design-for-Recycling in EU-Ökodesign-Richtlinie stärken

In der EU-Ökodesign-Richtlinie sollte eine langfristige und ressourceneffiziente Nutzung von Kunststoffen gezielt gefördert werden. Zudem sollten *Design-for-Recycling*-Vorgaben gestärkt werden, die zur höheren Reinheit von

Abfallströmen beitragen und den Trenn- und Sortieraufwand verringern. Ein positives Beispiel für ein recyclinggerechtes Geschäftsmodell ist das deutsche PET-Pfandsystem: Durch strenge Vorgaben zu Farben und Zusatzstoffen sowie eine konsequent getrennte Sammlung werden hier Recyclingraten von bis zu 98 Prozent erreicht (GVM 2024).

→ Märkte für Sekundärrohstoffe ausbauen

Im August 2025 haben die öffentlichen Konsultationen zum *Circular Economy Act* begonnen, der künftig das Herzstück der europäischen Kreislaufwirtschaftspolitik bilden soll. Bis 2030 soll die *Circularity Rate*, also der Anteil von Sekundärrohstoffen in der EU-Wirtschaft, von derzeit 11,8 Prozent auf 24 Prozent verdoppelt werden. Dafür sollen für bestimmte Produktgruppen verpflichtende und gegebenenfalls steigende Mindestanteile für rezykliertes Material vorgeschrieben werden.

7.3.2 Biomassepotenziale mobilisieren und weiter ausbauen

Bislang wird Biomasse zu großen Teilen energetisch genutzt, beispielsweise wird aus Energiepflanzen Biogas gewonnen, welches zur Stromerzeugung genutzt wird. Während Strom in Zukunft kostengünstiger über Photovoltaik, Windenergie und Speicher bereitgestellt werden kann, ist die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie eine sinnvolle und effiziente Anwendung für die begrenzten Mengen nachhaltiger Biomasse. Die Nutzung von Biomasse in der Chemieindustrie bietet die Möglichkeit, anstelle einjähriger Energiepflanzen lignozellulosehaltige beziehungsweise holzige Biomasse aus dem Anbau von Gehölzen, mehrjährigen Gräsern oder Paludikulturen (im Rahmen der Moorwiedervernässung) zu erzeugen. Auf diese Weise kann die stoffliche Nutzung von Biomasse in der Chemie einen wichtigen Beitrag zum nachhaltigen Umbau der Landnutzung leisten.

→ Strategie zur nachhaltigen Kultivierung und Nutzung von Biomasse entwickeln und umsetzen

Der Aufbau einer Bioökonomie erfordert eine ambitionierte und europäisch abgestimmte

Strategie, die die Nachhaltigkeit der Biomassenutzung sicherstellt und gemäß der Kaskadennutzung die verfügbaren Potenziale in hochwertigen Anwendungen erschließt. Um die Biomasse stärker in stoffliche Nutzungspfade zu lenken, müssen Fehlanreize zugunsten der energetischen Nutzung abgebaut werden. Zudem sollte die Kultivierung zusätzlicher lignozellulosehaltiger Rohstoffe aus Agroforstsystemen und Kurzumtriebsplantagen (KUPs) gezielt gefördert werden, um CO₂-Aufnahme, Biodiversität und Klimaresilienz zu steigern.

→ Forschung und Entwicklung stärken und Leuchtturmprojekte fördern

Biomassetechnologien sind zwar grundsätzlich verfügbar, müssen aber weiter skaliert und in die breite Anwendung gebracht werden, beispielsweise durch den Aufbau von Leuchtturmprojekten. Insbesondere bei der Nutzung lignozellulosehaltiger Biomasse bestehen noch Innovationspotenziale, die durch gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung erschlossen werden können und damit den Technologiestandort Deutschland stärken.

→ Bioökonomie-Innovations-Netzwerke aufbauen

Um biobasierte Wertschöpfungsketten aufzubauen, müssen Kompetenzen und innovative Ansätze aus verschiedenen Branchen neu zusammengebracht werden. Dazu sollten Austauschplattformen und Netzwerke ins Leben gerufen werden, in denen Expertisen zum nachhaltigen Biomasseanbau, zur Logistik und zur biotechnologischen Verarbeitung in der Chemieindustrie gebündelt werden. Ziel dieser Plattformen ist die Entwicklung neuer Verfahren und Geschäftsmodelle auf Basis nachhaltiger heimischer Biomasse.

7.3.3 Internationale Allianzen zum Handel grüner chemischer Zwischenprodukte aufbauen

Internationale Allianzen mit dem Zielbild einer fossilfreien Chemieindustrie und Partnerschaften für den Handel von Zwischenprodukten wie

grünem Methanol können Kosten senken und so die Wettbewerbsfähigkeit nachgelagerter Wertschöpfungsstufen erhöhen. Der vollständige Umstieg auf heimische Ressourcen wie Biomasse, Recycling, erneuerbaren Strom und Wasserstoff wäre theoretisch möglich, jedoch reduziert die Nutzung günstiger Zwischenprodukte die Kosten für klimaneutrale Chemikalien, während zusätzliche Arbeitsplätze in der Bioökonomie und Recyclingwirtschaft erhalten bleiben. Internationale Allianzen für eine fossilfreie Chemie – insbesondere mit Ländern, die auch stark von fossilen Ölimporten abhängig sind, beispielsweise China oder Südkorea – können internationale Märkte für grüne Chemikalien erschließen und zugleich zur weiteren Stärkung des leistungsfähigen deutschen Anlagenbaus beitragen. Zudem kann die Erschließung von Partnerschaften mit Ländern, die große Erneuerbare-Energien-Potenziale haben und damit günstige chemische Zwischenprodukte liefern können, die Wettbewerbsfähigkeit nachgelagerter Verarbeitungsschritte stärken und die Transformation der Chemiebranche insgesamt beschleunigen.

7.4 Stromkosten senken und Industrie-Stromverbrauch flexibilisieren

Windkraft und Photovoltaik sind die kostengünstigsten heimischen Energiequellen. Ein ambitionierter Ausbau Erneuerbarer Energien senkt die Stromkosten für Industrieunternehmen nachhaltig und steigert gleichzeitig die Unabhängigkeit von Energieimporten. Industrieunternehmen können durch eine zeitliche Flexibilisierung bei einigen Prozessen die Strombeschaffungskosten deutlich reduzieren. Phasen mit hohen und kurzzeitig sogar sehr hohen Strompreisen wechseln sich ab mit niedrigen oder sogar negativen Strompreisen. Treiber dieser Entwicklung sind Wind- und Solarstromeinspeisungen, deren Ausbau diesen Effekt verstärkt. Industrieunternehmen mit flexiblen Prozessen können ihre Strombeschaffungspreise an das Niveau der Niedrigpreisphasen annähern. Damit stützen sie automatisch auch die Prozesse und Betriebe, bei denen eine Flexibilisierung kostenineffizient wäre, denn sie reduzieren mit der verringerten Peak-Stromnachfrage auch die Belastung für

alle Verbraucher durch Spitzenpreise. Insbesondere Verbundstandorte mit zentraler Strom- und Wärmeversorgung haben ein großes Flexibilitätspotenzial. Beispielsweise lassen sich bestehende konventionelle Anlagen für Dampf- und Warmwassererzeugung mit neuen elektrischen Wärmeerzeugern kombinieren und besser auf die Nachfrageprofile der angesiedelten Produktion abstimmen.

→ Ausbau Erneuerbarer Energien weiterhin vorantreiben

Analysen von Aurora Energy Research im Auftrag von Agora Energiewende zeigen: Jeder Euro aus dem Bundeshaushalt, der den Ausbau Erneuerbarer Energien fördert, erzielt eine Strompreissenkung von durchschnittlich 1,60 Euro pro Megawattstunde (Agora Energiewende 2025). Diese bemerkenswerte Hebelwirkung mit dem Faktor 1,6 entfaltet sich jedoch nur so schnell, wie der Ausbau erfolgt. Kurzfristig können ab 2026 wirksame Entlastungen bei den Netzentgelten und der Stromsteuer dazu beitragen, wettbewerbsfähige Strompreise zu erzielen. Von einem sinkenden Strompreis kann die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie unmittelbar profitieren.

→ Marktintegration Erneuerbarer Energien vorantreiben

Mittelfristig sollten sowohl der Ausbau von Windkraft und Photovoltaik als auch günstige Industriestrompreise von Zahlungen aus dem Bundeshaushalt entkoppelt werden. Strom aus Erneuerbaren Energien sollte daher im Zuge der anstehenden EEG-Reform (Auslaufen des aktuellen EEGs Ende 2026) für die langfristige, industrielle Strombeschaffung am Strommarkt verfügbar werden, beispielsweise über PPAs.

→ Identifikation von Flexibilitätspotenzialen unterstützen

Unternehmen sollten durch Umsetzungskampagnen dabei unterstützt werden, Flexibilitätspotenziale zu identifizieren und zu erschließen. Dazu gehört die Unterstützung und Förderung bei Energieberatung und -dienstleistung mit Fokus auf Flexibilität sowie die Investitionskostenförderung für flexible Wärmeerzeuger und

Wärmespeichersysteme. Insgesamt sollten Effizienz und Flexibilität stärker verzahnt werden, und bestehende Förderprogramme sollten auch für Maßnahmen zur Steigerung der Flexibilität geöffnet werden (siehe auch EPICO 2025).

→ Systemdienliche Flexibilität belohnen

In der Netzentgeltsystematik sollten bestehende Flexibilitätshürden durch Anreize für einen systemdienlichen Verbrauch ersetzt werden. Insbesondere die sogenannte 7.000-Stunden-Regel (§ 19.2 StromNEV) sollte kurzfristig reformiert werden, um künftig auch flexiblere Verbrauchsprofile zu ermöglichen (siehe auch Agora Energiewende, Agora Industrie, FIM und RAP, 2024). Darüber hinaus sollte die Einführung zeitlich und räumlich aufgelöster Strompreissignale geprüft werden. Die Netzanschlusskapazitäten, insbesondere der elektrischen Wärmeerzeuger, müssen ausreichend dimensioniert sein und den flexiblen Betrieb unterstützen. Netzbetreiber müssen diese Kapazitäten zügig bereitstellen.

7.5 Infrastrukturen aufbauen

Strom, Biomasse wie auch Wasserstoff sind die zentralen Rohstoffe einer zukunftsfähigen chemischen Industrie – ihre Verfügbarkeit muss durch entsprechende Infrastrukturen sichergestellt werden. Und auch der Abtransport von unvermeidbarem und biogenem CO₂ ist ein wichtiges Element einer klimaneutralen Chemie. Standortspezifische Transformationsentscheidungen sowie die konkrete Ausgestaltung der Bioökonomie und Methanolwirtschaft können den Bedarf an Strom, Wasserstoff und CO₂-Abtransport stark verändern.

→ Stromnetzausbau vorantreiben und Netzintegration beschleunigen

Ergänzend zum Ausbau der Erneuerbaren Energien muss auch der Ausbau der Übertragungs- und Verteilnetze sowie der Netzanschlusskapazitäten ambitioniert und kosteneffizient vorangetrieben werden. Netzbetreiber müssen die Netzanschlüsse sowohl zügig als auch ausreichend dimensioniert bereitstellen. Da sehr viele Verbraucher gleichzeitig

Netzanschlüsse nachfragen, ist ein effizientes Netzanschlussmanagement notwendig, etwa über eine zentrale Übersichtskarte und die Versteigerung von Netzanschlusskapazitäten. Damit die Netzkosten trotz des Netzausbaus stabilisiert werden – Netzentgelte sind insbesondere für die mittelständische Industrie ein wichtiger Kostenfaktor –, ist ein Maßnahmenpaket erforderlich. Dazu gehören kostengünstigere Bauweisen, staatliche Beteiligung zur Senkung der Kapitalkosten und dynamische Netzentgelte.

→ Wasserstoffhochlauf mit der Chemietransformation verzahnen

Der Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff in der chemischen Industrie ist vor allem bei der Ammoniakproduktion, der Biomasseverarbeitung zu Methanol und dem Recycling von Kunststoffabfällen (chemisches Recycling) sinnvoll. Um die Wasserstoffbedarfe möglichst kostengünstig zu decken, ist ein rascher Ausbau der inländischen Wasserstoffinfrastruktur zusammen mit zentralen Importkorridoren, etwa aus Dänemark, erforderlich. Potenzielle Erzeuger und Infrastrukturbetreiber im Wasserstoffbereich benötigen nun gesicherte Abnahmezusagen aus der Chemieindustrie, beispielsweise durch flexible Beimischung in der Ammoniakproduktion. Auf diese Weise können die Transformation der Chemieindustrie und der Wasserstoffhochlauf Hand in Hand gehen.

→ Planung des CO₂-Transportnetzes vorantreiben

Zukünftig entstehende CO₂-Abtransportbedarfe, insbesondere aus der Biomasseverarbeitung und der Generierung von Negativemissionen, müssen in die Planung des CO₂-Transportnetzes einbezogen werden. Für den Abtransport abgeschiedener CO₂-Mengen ist eine Infrastruktur erforderlich, die sowohl den Abtransport teils dezentraler (biogener) CO₂-Quellen ermöglicht als auch kosteneffizient betrieben werden kann. Ergänzend zu zentralen CO₂-Pipelinekorridoren kann auch der CO₂-Transport per Schiene eine wichtige Rolle spielen.

7.6 Märkte schaffen

Absatzmärkte für grüne Chemikalien sind eine zentrale Voraussetzung für Investitionsentscheidungen in emissionsarme Prozesse. Auch wenn die Kosten der Transformation durch die Monetarisierung von *Co-Benefits* (Negativemissionen, zusätzliche Arbeitsplätze und Wertschöpfung, Resilienz) abgemildert werden können, ist bei grünen Chemikalien auf absehbare Zeit mit höheren Kosten zu rechnen. Kostensteigerungen in der Chemieindustrie übersetzen sich bei zentralen Endprodukten in nur geringe Kostensteigerungen von wenigen Prozentpunkten (vgl. Infobox *Mehrkosten auf Produktebene*, Seite 44). Es müssen Marktsegmente identifiziert werden, in denen diese Mehrkosten weitergegeben werden können. Zentrale politische Hebel für grüne Absatzmärkte sind die Schaffung eines Marktzugangs für klimafreundliche Chemikalien durch die Etablierung oder Anpassung entsprechender Standards, die Steigerung von Transparenz durch Anforderungen an CO₂-Bilanzierung und Berichterstattung sowie die Befähigung zu klimafreundlichen Entscheidungen über Labels. Die direkte Schaffung einer Nachfrage kann durch öffentliche Beschaffung sowie Quoten für die Privatwirtschaft angereizt werden. Der europäische Binnenmarkt kann beim Aufbau grüner Leitmärkte eine wichtige Rolle spielen, da rund zwei Drittel der Exporte – die insgesamt 63 Prozent der Produktion der Chemieindustrie ausmachen – ins europäische Ausland gehen (VCI 2025b, Destatis 2024).

→ Labels für Basischemikalien und Kunststoffe einführen

Mithilfe von Labels können Informationen zur Klimafreundlichkeit eines Materials oder Produkts transparent gemacht und Mehrkosten gegenüber Abnehmern nachvollziehbar begründet werden. Verschiedene Studien zeigen, dass auf Endkundenebene eine Zahlungsbereitschaft für grüne Produkte besteht (BCG 2023). Damit diese Zahlungsbereitschaft in tatsächliches Kaufverhalten umgesetzt werden kann, müssen Konsumentinnen und Konsumenten jedoch in die Lage versetzt werden, ihre Kaufentscheidung auf transparente und glaubwürdige Produktkennzeichnungen zu

stützen. Während im Bereich Stahl und Zement bereits erste praxisnahe Produktlabels entwickelt wurden, steht die Entwicklung vergleichbarer Produktkennzeichnungen für die chemische Industrie aufgrund der hohen Produktvielfalt noch am Anfang. Die Bundesregierung sollte sich daher auch auf europäischer Ebene für die Entwicklung gemeinsamer, belastbarer Labels einsetzen.

→ Öffentliche Beschaffung für die Nachfrage nach grünen Chemikalien nutzen

Bislang wird im Kontext der öffentlichen Beschaffung vor allem das Potenzial für grünen Stahl und klimaneutralen Zement diskutiert. In der Bauwirtschaft werden aber auch in signifikanten Mengen Produkte der Chemieindustrie verwendet – die Bauwirtschaft ist der drittgrößte Abnehmer von Chemieprodukten. Das kürzlich von der Bundesregierung verabschiedete Sondervermögen für Infrastruktur und Klimaneutralität bietet somit eine wichtige Chance, die Nachfrage nach grünen Chemikalien zu steigern. Um dieses Potenzial effektiv nutzen zu können, sollten zügig erste Bauprodukte (beispielsweise Kunststoffrohre) identifiziert werden, für die im Rahmen der öffentlichen Beschaffung zeitnah erste Nachhaltigkeitsanforderungen verankert werden können.

→ Einführung von Produkthanforderungen und Quoten prüfen

Quoteninstrumente für die Privatwirtschaft – mit anfänglich geringen und später steigenden Anforderungen an den Einsatz von emissionsarmen, fossilfreien und recycelten Grundstoffen – können Planbarkeit schaffen und Investitionen in klimaneutrale Prozesse erleichtern. Eine Gelegenheit zur Stärkung von Produkthanforderungen oder zur Einführung von CO₂-Grenzwerten bietet die anstehende Reform der EU-Ökodesignrichtlinie sowie der für Ende 2026 angekündigte *EU Circular Economy Act*.

8 Anhang

8.1 Techno-ökonomische Modellierung der Technologie- und Ressourcenpfade

Die Ergebnisse zur Analyse der Energie- und Ressourcenpfade einer klimaneutralen Chemieindustrie basieren auf einer techno-ökonomischen Modellierung auf Basis des CM-Modells von Carbon Minds. Die Grundlage bildet ein jahresbasiertes lineares Optimierungsmodell, das die Entwicklung der chemischen Industrie unter Kostenminimierung und Emissionsrestriktionen beschreibt. Für jedes Jahr wird eine detaillierte Darstellung der chemischen Wertschöpfungsketten vorgenommen – von Rohstoffen über chemische Produktion bis hin zur Abfallbehandlung. Die mathematische Basis umfasst technische, ökologische und ökonomische Daten. Die technischen Daten basieren auf stofflichen und energetischen Bilanzgleichungen, sogenannte Massen- und Energiebilanzen, für eine definierte Menge relevanter Chemikalien. Die in dieser Studie berücksichtigten Treibhausgase umfassen Kohlendioxid, Methan, Lachgas und in geringerem Maße weitere Gase, gemäß dem IPCC-Treibhausgasprotokoll von 2013 (IPCC 2013). Der in der Studie verwendete Ansatz zur Lebenszyklusanalyse berücksichtigt die Treibhausgasemissionen der Scopes 1, 2 und 3. Für indirekte Emissionen aus Scope 3 wurden die Kategorien 1 („eingekaufte Waren“) und 12 („Behandlung am Lebensende“) des GHG-Protokolls berücksichtigt (Barrow et al. 2013). Die Modellierung beginnt im Jahr 2020, die Ergebnisse werden ab dem Jahr 2025 dargestellt.

Jeder Technologieprozess wird durch Input- und Output-Koeffizienten beschrieben, einschließlich Rohstoffe, Energieeinsatz, Emissionen und Nebenprodukte. Diese fließen in technologiespezifische Bilanzmatrizen ein, die Bestandteil der linearen Optimierung sind. Dabei werden Investitionsausgaben (CAPEX), Betriebskosten (OPEX), Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Jährliche Nachfragevektoren definieren den Bedarf an Chemikalien sowie das Aufkommen von Abfällen.

Die Optimierung gewährleistet eine vollständige Deckung dieses Bedarfs unter Einhaltung der jährlich vorgegebenen Emissionsgrenzen. Zwischenjährige Kopplungen über sogenannte dynamische Kapazitätsbeschränkungen stellen sicher, dass Produktionskapazitäten nur dann verfügbar sind, wenn sie in Vorjahren errichtet wurden. Der Aufbau neuer Kapazitäten wird ebenfalls im Modell berücksichtigt und optimiert. Die Wirtschaftlichkeit ist dabei ein entscheidender Faktor beim Übergang zur Klimaneutralität. Sowohl CAPEX als auch OPEX wurden im Rahmen der Modellierung abgeschätzt. Dabei wurden die bestverfügbaren Referenzen herangezogen, einschließlich Marktpreisen für Einsatzstoffe im Fall der OPEX. Die Berücksichtigung der Investitionsbedarfe beschränkt sich auf die Chemieindustrie direkt, verbundene Investitionen wie beispielsweise in die Infrastruktur werden indirekt über OPEX abgedeckt.

Ergänzend werden zeitlich variable Randbedingungen wie die Verfügbarkeit alternativer Rohstoffe (zum Beispiel Biomasse, sortierter Kunststoffabfall) oder CO₂-Speicherpotenziale (CCS) modellseitig eingebunden. Diese Größen werden als exogene Parameter in die jährlichen Modellzeiträume integriert. Der Ansatz erlaubt es, unterschiedliche technische und wirtschaftliche Entwicklungen systematisch abzubilden. Durch die Kombination aus stofflicher, energetischer und technologischer Modellierung entsteht ein flexibles Instrument zur Analyse von Transformationsszenarien der chemischen Industrie unter Berücksichtigung von Emissionsvorgaben, Technologiewahl und Ressourceneinsatz.

Das Modell zur Ermittlung des primären Prozessenergiebedarfs in der chemischen Industrie unterscheidet zwei Hauptformen der Energiezufuhr: direkt genutzter Strom und Prozesswärme. Direkt genutzter Strom wird beispielsweise für Motoren oder die Chloralkali-Elektrolyse benötigt. Das Modell bilanziert auf Basis technischer Prozessdaten den optimierten Bedarf an Strom und Wärme und ordnet diesen spezifischen Technologien zur Bereitstellung zu. Dabei werden auch Rückgewinnungspotenziale

berücksichtigt, etwa durch Nutzung von Abwärme aus Prozessen, die Biomasse und Kunststoffabfällen verwenden.

Für jede Chemikalie und jeden Kunststoff im betrachteten Produktionsumfang wurden sämtliche produzierenden Prozesse individuell analysiert, insbesondere hinsichtlich der jeweiligen Anteile der eingesetzten Rohstoffe. In Fällen, in denen zirkuläre Stoffströme vorliegen – etwa, wenn ein Nebenprodukt eines Prozesses in einem zweiten verarbeitet wird, um erneut als Ausgangsstoff für den ersten Prozess zu dienen –, wurde der Rohstoffanteil auf Basis des zuletzt ohne Approximation berechenbaren Flusses bestimmt. So erfolgte die Berechnung dann über das letzte direkt berechenbare Zwischenprodukt (zum Beispiel Synthesegas oder Naphtha), auf dessen Basis die nächsten Intermediate entlang der Wertschöpfungskette berechnet wurden (wie zum Beispiel Methanol, Olefine oder Aromate). Wenn für einen Prozess mehrere Rohstoffe verwendet wurden, wurde zur Vereinfachung eine massenbasierte Gewichtung der Rohstoffanteile vorgenommen.

Der Übergang zur Klimaneutralität erfordert von der chemischen Industrie nicht nur die Nutzung konventioneller und bewährter Produktionsprozesse, sondern auch den Einsatz alternativer Technologien, die auf Emissionsminderung ausgerichtet sind. Während derzeit zahlreiche verschiedene Verfahren entwickelt werden, konzentriert sich diese Studie auf alternative Technologien mit einem hohen technologischen Reifegrad.

8.2 Modellierung von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten

Volkswirtschaften stellen Netzwerke verschiedener, über Transaktionen verbundene Akteure dar. Diese Akteure produzieren Güter und Dienstleistungen, die an andere Akteure abgesetzt werden und so Wertschöpfung erzeugen (direkte Effekte). Dazu erwerben sie Waren oder Dienstleistungen anderer Unternehmen (Vorleistungen) durch die wiederum weitere Wertschöpfung stimuliert wird (indirekte Effekte). Für Wertschöpfungsprozesse

werden Produktionsfaktoren wie Kapital (zum Beispiel Maschinen, Anlagen, Finanzmittel) und Arbeit (zum Beispiel Mitarbeitende) eingesetzt und entlohnt. Diese Entlohnung (Löhne, Gewinn, Steuern) stimuliert Konsum, der wiederum zu weiterer Wertschöpfung führt (induzierte Effekte).

Input-Output-Modelle stellen die Wertschöpfungsverflechtungen (also den Austausch von Gütern und Dienstleistungen sowie die Entlohnung der Primärfaktoren) zwischen Wirtschaftssektoren dar. Diese Tabellen bestehen aus den wertmäßigen Strömen zwischen den Wirtschaftszweigen (Zwischenverbrauchsmatrix), dem Konsum beziehungsweise Export von Gütern und Dienstleistungen (finale Verwendung gegliedert nach Wirtschaftszweigen) und den Aufwendungen zur Entlohnung der Primärfaktoren (zum Beispiel Löhne, Kapitalerträge). Das Input-Output-Modell des Fraunhofer CEM (CEM-IOM) bildet Wertschöpfungsverflechtungen zwischen allen Wirtschaftszweigen und Landkreisen Deutschlands ab. Mithilfe von IOM-Modellen können die Auswirkungen hypothetischer wirtschaftlicher Aktivitäten berechnet werden, indem entsprechende Verwendungsvektoren gebildet werden, grundsätzlich ist dies für direkte, indirekte und induzierte Effekte möglich. Grundlegende technologische Veränderungen, die zu Veränderungen in den Vorleistungsstrukturen führen, sind jedoch mit IOM-Modellen schwer abzubilden. Da die zugrundeliegenden Vorleistungsstrukturen sich im Fall der in dieser Studie modellierten technologischen Transformation fundamental ändern, können auf Basis des aktuellen CEM-IOM-Modells keine belastbaren Aussagen zu zukünftigen indirekten Effekten gemacht werden. Insbesondere wirtschaftliche Effekte durch Investitionen in neue Anlagen und deren Instandhaltung (Investitionen) bleiben daher unberücksichtigt. Direkte und induzierte Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte werden jedoch wie folgt ermittelt.

Beschäftigung und Wertschöpfung werden in unterschiedlichem Maße durch Wertschöpfungsaktivitäten in der chemischen Industrie ausgelöst. Daher werden direkte Beschäftigungseffekte durch die techno-ökonomische Analyse der Beschäftigungsintensitäten (Anzahl der Vollzeitbeschäftigten pro

Übersicht der Beschäftigungsintensitäten in den betrachteten Produktionsprozessen

→ Tabelle 2

Prozess	Bezugsgröße	Beschäftigungsintensität in VZÄ/kT	Quelle
Haber-Bosch-Prozess	Ammoniak	1,1	Daten der Beschäftigungs- und Produktionserhebung der Jahre 2014 bis 2020
Wacker-Hoechst-Prozess	Acetaldehyd	2,2	
Chlor-Alkali-Elektrolyse	Chlor	1,4	
Kryogene Luftzerlegung	Stickstoff	1,0	
Steamcracking	Naphtha	0,6	
Hydrodealkylierung	Benzol	2,0	
Polymerisierung von Olefinen	Olefin	3,4	
Oxidierung von Ethylene	Essigsäure/ Ethylenoxid	2,2	
Elektrolyse	Wasserstoff	3	Basierend auf Gupta et al. (2023), Jang et al. (2022) und Michalski et al. (2019)
Methanol-to-Olefins/ Aromats	Methanol	0,1–0,2	Basierend auf Ruokonen et al. (2021)
Biomassevergasung und Methanolsynthese	Methanol	0,33–0,51	Basierend auf AlNouss et al. (2020)
Abfallpyrolyse	Pyrolyseabfall	0,45–0,55	Basierend auf Hernandez et al. (2023)

Agora Industrie, Fraunhofer IKTS (2025)

Produktionseinheit¹⁹) der verwendeten Technologien abgeleitet. Für diejenigen Prozesse, die aktuell und auch in Zukunft eingesetzt werden, werden Beschäftigungs- und Wertschöpfungsintensitäten aus den Produktions- und Kostenstrukturserhebungen des statistischen Bundesamtes errechnet.²⁰ Prozesse, die aktuell noch nicht in industriellem Umfang eingesetzt werden (wie *Methanol-to-Olefins*), werden Beschäftigungsintensitäten durch techno-ökonomische Analysen von Anlagenmodellen aus der wissenschaftlichen Literatur zusammengetragen. Wertschöpfungsintensitäten (definiert als Wertschöpfung pro Beschäftigten) dieser Prozesse werden abgeleitet,

indem passfähige aktuelle Wertschöpfungsintensitäten aus den Produktions- und Kostenstrukturserhebungen zugeordnet werden.²¹ Die verwendeten Beschäftigungsintensitäten ausgewählter Prozesse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Beschäftigungsintensitäten werden für die Projektion der direkten Beschäftigungseffekte verwendet, indem sie mit den projizierten Anlagenkapazitäten beziehungsweise Produktionsmengen der optimierten Produktionssysteme in 2045 multipliziert werden. Die Wertschöpfungseffekte ergeben sich durch Multiplikation der projizierten Beschäftigungszahlen mit den Wertschöpfungsintensitäten. Zur Projektion der induzierten Effekte werden die Beschäftigungszahlen mit den aktuellen

¹⁹ Produktionseinheiten sind in der Regel Gewichtseinheiten (Tonnen) des primären Produkts oder Edukts.

²⁰ Dazu werden die entsprechenden Prozesse (wie das *Steam-cracking*) gemäß deren primärer Produkte den entsprechenden Produktgruppen des Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken (GP 2019) zugeordnet. Beschäftigungs- und Wertschöpfungsintensitäten werden auf Basis der Produktions- und Kostenstrukturserhebungen auf 6-Steller-Ebene berechnet. Zur Plausibilisierung und Schließung von Datenlücken wurden Daten des AfID-Panels verwendet (vgl. <https://www.forschungsdaten-zentrum.de/de/afid>).

²¹ Dazu werden diejenigen Wertschöpfungsintensitäten auf 6-Steller-Ebene herangezogen, die den Primärprodukten beziehungsweise Produktportfolios dieser Prozesse am ehesten entsprechen. Zum Beispiel sind die Primärprodukte des Methanol-to-Olefins-Verfahrens Ethylen und Propylen, die in Gruppe 2014.11 der GP 2019 eingeordnet werden (azyklische Kohlenwasserstoffe).

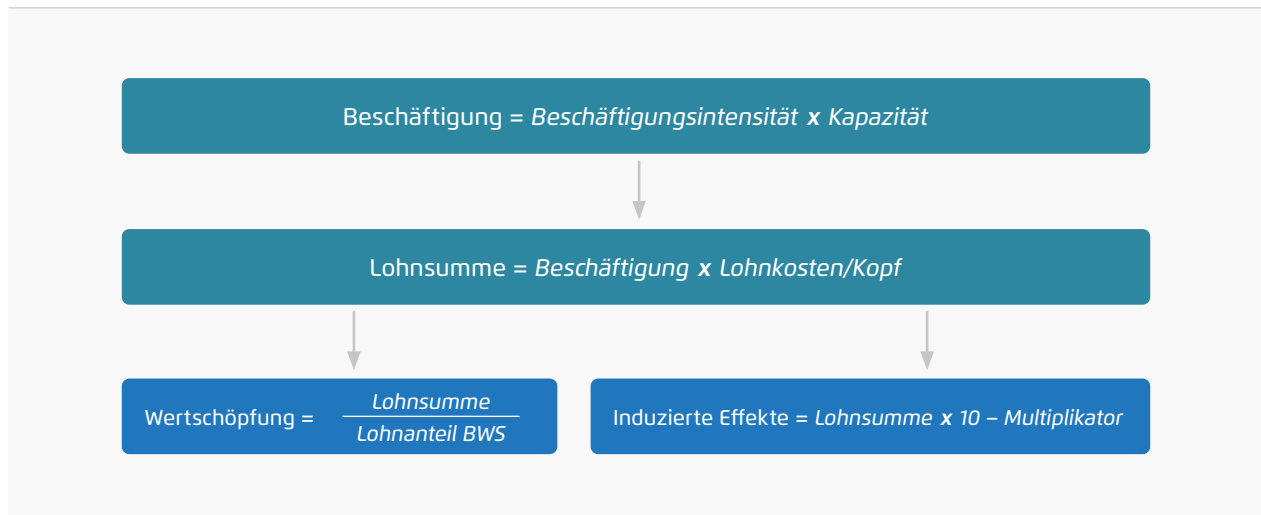
Durchschnittslöhnen gegliedert nach Subsektor²² multipliziert, um die Lohnsumme zu ermitteln. Durch Multiplikation der Lohnsumme mit dem Konsumfaktor (also dem Anteil der Haushaltseinkommen, die für den inländischen Konsum aufgewandt werden) und dem Wertschöpfungsmultiplikator für private Haushalte des CEM-IOM-Modells werden die induzierten Wertschöpfungseffekte abgeschätzt.

Der Wertschöpfungsmultiplikator des CEM-IOM-Modells für privaten Konsum basiert auf dem aktuellen Konsumgüterbündel der privaten Haushalte und den aktuellen Wertschöpfungsverflechtungen Deutschlands. Abbildung A.1 stellt die Berechnung der Wertschöpfungseffekte schematisch dar.

²² Auf Gliederungsebene der 4-Steller der Wirtschaftszweige nach GP 2019.

Modellierungsansatz zur Berechnung der Wertschöpfungseffekte

→ Abb. A.1



Fraunhofer IKTS (2025)

8.3 Szenarioannahmen und Rahmenparameter

Szenario Übersicht

→ Tabelle 3

	Teilfossil	Heimischer Wasserstoff	Heimische Biomasse	Wasserstoff-Import	Zwischenprodukt-Import	HVC-Import
Kurzbeschreibung	Die Chemieindustrie wird bilanziell bis 2045 klimaneutral, bleibt aber weiterhin abhängig vom Import fossiler Rohstoffe zur Deckung der Kohlenstoffbedarfe.	Der Fokus der Transformation der Rohstoffbedarfe liegt auf der Nutzung von Wasserstoff und der Kohlenstoffversorgung über DAC und CCU. Biomasse steht nur begrenzt zur Verfügung.	Der Fokus der Transformation der Rohstoffbedarfe liegt auf der Nutzung heimischer Biomassepotenziale und einer zirkulären Chemieindustrie.	Dieses Szenario ist angelehnt an den Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“. In begrenztem Maße kann zusätzlich Wasserstoff per Pipeline importiert werden.	Dieses Szenario ist angelehnt an den Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“. In begrenztem Maße können zusätzlich Wasserstoff per Pipeline und Wasserstoff-Derivate per Schiff importiert werden.	Dieses Szenario ist angelehnt an den Ressourcenpfad „Heimische Biomasse“. In begrenztem Maße können zusätzlich Wasserstoff per Pipeline und Wasserstoff-Derivate sowie <i>High-Value Chemicals</i> (HVC) per Schiff importiert werden.
Nutzung fossiler Ressourcen	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Verfügbare Rohstoffimporte	Fossile Rohstoffe	Nein	Nein	Wasserstoff: 1 Mt	Wasserstoff: 1 Mt Ammoniak: 1 Mt Bio-Methanol: 9 Mt CCU-Methanol: 9 Mt Bio-Ethanol 0,8 Mt	Wasserstoff: 1 Mt Ammoniak: 1 Mt Bio-Methanol: 9 Mt CCU-Methanol: 9 Mt Bio-Ethanol 0,8 Mt Ethylen: 1,69 Mt Propylen: 1,17 Mt C4-Fractionen: 0,735 Mt Benzol: 0,622 Mt Toluol: 0,114 Mt Xylol-Mix: 0,102 Mt
THG-Ziel 2045 (CO ₂ -Äq)	0 Mt	-15 Mt	-15 Mt	-15 Mt	-15 Mt	-15 Mt
CCS – Kapazität biogenes CO ₂ und DAC	15,3 Mt	13,7 Mt	13,7 Mt	13,7 Mt	13,7 Mt	13,7 Mt
CCS – Kapazität (Abfallverbrennung)	14,0 Mt	14,0 Mt	14,0 Mt	14,0 Mt	14,0 Mt	14,0 Mt
Verfügbare Biomasse (Trockenmasse)	24,8 Mt	4,65 Mt	24,8 Mt	24,8 Mt	24,8 Mt	24,8 Mt

Agora Industrie, Carbon Minds, Fraunhofer IKTS (2025)

Sonstige Rahmenparameter

→ Tabelle 4

Parameter	Wert	Quelle
Kosten CO ₂ -Transport- und Speicherung	90 EUR/t CO ₂	Basierend auf Zeroemissionplattform und Global CCS Institute
Strompreis	2030: 22 EUR/MJ 2045: 68 EUR/MJ	Agora Think Tanks et al. (2024)
Erdöl	2030: 725 EUR/t 2045: 657 EUR/t	Agora Think Tanks et al. (2024)
Naphtha	2030: 580 EUR/t 2045: 525 EUR/t	Eigene Berechnung, basierend auf Agora Think Tanks et al. (2024)
Erdgas	2030: 22 EUR/MWh 2045: 20 EUR/MWh	Agora Think Tanks et al. (2024)
Ethan	2030: 477 EUR/t 2045: 439 EUR/t	Eigene Berechnung, basierend auf Agora Think Tanks et al. (2024)
Verfügbare Biomasse	2030: 9,9 Mt 2045: 24,8 Mt	80 % der durchschnittlichen ungenutzten Biomasse (31 Mt TM) nach DBFZ (2019)
Biomassepreise	150 EUR/t TM	Eigene Berechnung, basierend auf Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2024) und DBFZ (2019)
Importpreise	70 % der heimischen Produktionskosten	Annahme
Transportkosten Importe	Biomethanol, Schiff: 0,0011 EUR/tkm Bioethanol, Schiff: 0,0011 EUR/tkm Grüner H ₂ , Schiff: 0,076 EUR/tkm Grüner H ₂ , Pipeline Offshore: 0,31 EUR/tkm Grüner H ₂ , Pipeline Onshore: 0,16 EUR/tkm Ammoniak, Schiff: 0,0012 EUR/tkm Methanol (CO ₂ -basiert), Schiff: 0,0011 EUR/tkm	Bähr et al (2023)
Nachfrageentwicklung	Grundstoffe: -0,6 % pro Jahr Intermediäre: -0,6 % pro Jahr Polymere: -0,2 % pro Jahr	Basierend auf VCI und VDI (2023)
Recyclingpotenzial	2030: 75 % 2045: 85 %	Basierend auf Agora Industrie (2022) und Dechema (2022)

Literaturverzeichnis

AlNouss, A., Shahbaz, M., McKay, G., Al-Ansari, T. (2022): *Bio-methanol production from palm wastes steam gasification with application of CaO for CO₂ capture: techno-economic-environmental analysis.* Journal of Cleaner Production, 341, 130849.

Agora Agrar (2024): *Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU. The land use sectors as part of a sustainable food system and bioeconomy.* Verfügbar unter: <https://www.agora-agriculture.org/publications/agriculture-forestry-and-food-in-a-climate-neutral-eu>

Agora Energiewende (2025): *Erneuerbare Energien senken Strompreise unabhängig von der Nachfrage.* Verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/erneuerbare-energien-senken-strompreise-unabhaengig-von-der-nachfrage>

Agora Energiewende, Agora Industrie, FIM und RAP (2024): *Industrielle Energieflexibilität ermöglichen. Konzept einer Reform der Sondernetzentgelte für Großverbraucher.* Verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/industrielle-energieflexibilitaet-ermoeglichen>

Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement.* Berlin, November 2019. Verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie#downloads>

Agora Industrie (2025, angekündigt): *Studie zu Potential und Kosten von CO₂-Speicherung und Transport.* Angkündigt für November 2025

Agora Industrie, FutureCamp (2022): *Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie.* Verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/power-2-heat>

Agora Industrie (2023): *Chemie im Wandel. Die drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten.* Verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/chemie-im-wandel>

Agora Industrie, Systemiq (2023): *Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft: Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien.* Verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/resilienter-klimaschutz-durch-eine-zirkulaere-wirtschaft>

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

Agora Think Tanks, Prognos AG, Öko-Institut e. V., Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Universität Kassel (2024): *Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung – Vertiefung der Szenariopfade.* Verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-szenariopfade>

Barrow, M. et al. (2013): *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emission (version 1.0). Supplement to the Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting & Reporting Standard.* Verfügbar unter: <https://ghgprotocol.org/scope-3-calculation-guidance-2>

BASF (2024): *BASF, SABIC und Linde feiern Inbetriebnahme der weltweit ersten großtechnischen elektrisch beheizten Steamcracker-Öfen.* Pressemitteilung vom 17.04.2024. Verfügbar unter: <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2024/04/p-24-177>

S. Bringezu, M. Banse, L. Ahmann, N. A. Bezama, E. Billig, R. Bischof, C. Blanke, A. Brosowski, S. Brünig, M. Borchers, M. Budzinski, K.-F. Cyffka, M. Distelkamp, V. Egenolf, M. Flaute, N. Geng, L. Giesecking, R. Graß, K. Hennenberg, T. Hering, S. Iost, D. Jochem, T. Krause, C. Lutz, A. Machmüller, B. Mahro, S. Majer, U. Mantau, K. Meisel, U. Moesenfechtel, A. Noke, T. Raussen, F. Richter, R. Schalldach, J. Schweinle, D. Thrän, M. Uglík, H. Weimar, F. Wimmer, S. Wydra, W. Zeug (2020): *Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie*. Hrsg. vom Center for Environmental Systems Research (CESR), Universität Kassel, Kassel, doi:10.17170/kobra-202005131255. Verfügbar unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062370.pdf

Boston Consulting Group (BCG) (2023): *Green Awakening: Are Consumers Open to Paying More for Decarbonized Products?* Verfügbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2023/consumers-are-willing-to-pay-for-net-zero-production>

BMWK (2024): *Verarbeitendes Gewerbe in Deutschland: Bruttowertschöpfung der Branchen*. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Industriestrategie%202030/Module/verarbeitendes-gewerbe-in-deutschland.html>

BNetzA (2025): *Versorgungssicherheit Strom Bericht: Stand und Entwicklung der Versorgungssicherheit im Bereich der Versorgung mit Elektrizität, September 2025*. Verfügbar unter: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/versorgungssicherheit-strom-bericht-2025.pdf?__blob=publicationFile&v=22

Bähr et al. (2023): *Die Zukunft energieintensiver Industrien in Deutschland. Eine Studie von IW Consult und Frontier Economics im Auftrag des Dezernats Zukunft*. Verfügbar unter: https://www.iwconsult.de/fileadmin/user_upload/pdfs/2023/dz-studie_zukunft_energieintensiver_industrien_final-version_v3.pdf

Büchel, J., Hickmann, H., Matthes, J., Neligan, A., Schaefer, T., Werner, D. (2022): *Branchenportrait der Chemischen Industrie in Deutschland*. IW-Report, Nr. 31, Köln / Berlin. Verfügbar unter: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2022/IW-Report_2022-Chemie_Branchenportrait-neu.pdf

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

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2023): *Treibhausgasemissionen 2022. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2022)*. Verfügbar unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2025a): *Emissionssituation 2024 im Europäischen Emissionshandel 1. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen, Luft- und Seeverkehr in Deutschland*. Verfügbar unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2025b): *Beihilfen für indirekte CO₂-Kosten des Emissionshandels (Strompreiskompensation) in Deutschland für das Jahr 2023*. Verfügbar unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/spk/Auswertungsbericht_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=3

EPICO KlimaInnovation und Guidehouse Germany (2025): *Prioritäten für eine Flexibilitätsagenda für das deutsche Stromsystem*, Policy Paper, Berlin. Verfügbar unter: <https://epico.org/de/prioritaeten-fuer-eine-flexibilitaetsagenda-fuer-das-deutsche-stromsystem>

Fraunhofer ISI (2024): *Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU.* Study on behalf of Agora Industry. Verfügbar unter: <https://www.agora-industry.org/publications/direct-electrification-of-industrial-process-heat>

FNB Gas (2025): *Wasserstoff-Kernnetz.* Website abgerufen am 02.10.2025. Verfügbar unter: <https://fnb-gas.de/wasserstofftransport/wasserstoff-kernnetz/>

Gupta, R., Guibentif, T. M., Friedl, M., Parra, D., & Patel, M. K. (2023): *Macroeconomic analysis of a new green hydrogen industry using Input-Output analysis: The case of Switzerland.* Energy Policy, 183, 113768. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523003531>

GVM (2024): *Aufkommen und Verwertung von PET-Getränkeflaschen in Deutschland 2023.* Verfügbar unter: https://www.forum-pet.de/wp-content/uploads/2024/09/2024_08_30_Kurzfassung_Verwertung-PET-Getraenkeflaschen-2023.pdf

Hennenberg et al. (2023): *Hintergrundinformationen zum Status Quo der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und zukünftigen Biomassepotenzial für die Erarbeitung der NABIS.* Verfügbar unter: <https://denkhausbremen.de/wp-content/uploads/2025/03/Hintergrundinformationen-NABIS.pdf>

Hernández, B., Kots, P., Selvam, E., Vlachos, D. G., & Ierapetritou, M. G. (2023): *Techno-economic and life cycle analyses of thermochemical upcycling technologies of low-density polyethylene waste.* ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11(18), 7170–7181.

Huckestein und Plesnivý (2000): *Möglichkeiten und Grenzen des Kunststoffrecyclings.* Chemie in unserer Zeit, Vol. 34, No., S. 276–286. Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1521-3781%28200010%2934%3A5%3C276%3A%3A%3AID-CIUZ276%3E3.O.CO%3B2-Q>

IEA (2024a): *World Energy Investment 2024*, IEA, Paris. Licence: CC BY 4.0. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024>

IEA (2024b): *Batteries and Secure Energy Transitions*, IEA, Paris. Licence: CC BY 4.0. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013): *The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report.* Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

IRENA (2025): *Renewable capacity statistics 2025*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Verfügbar unter: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Statistics_2025.pdf

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2024): *Strohpreis-Rechner.* Verfügbar unter: https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/42795_Strohpreis-Rechner

Mantau (2023): *Holzrohstoffbilanzierung – Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung.* Verfügbar unter: <http://infro.eu/img/pdf/rohstoffmonitoring/R-2024-01-Rohstoffmonitoring.pdf>

Michalski, J., Altmann, M., Bünger, U., & Weindorf, W. (2019): *Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie.* Verfügbar unter: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/documents/bericht_wasserstoffstudie_nrw-2019-04-09_komp.pdf

Minten, H., Hausweiler, J., Probst, B., Reinert, C., Meys, R., Bardow, A. (2025): *Closing emission gaps in border carbon adjustments for chemicals and plastics.* Nat Sustain. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01622-9>

Öko Institut (2025): *Revised methodologies under the EU Carbon Certification Removal Framework continue to lack integrity*, Blog Beitrag vom 28.05.2025. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/en/blog/revised-methodologies-under-the-eu-carbon-certification-removal-framework-continue-to-lack-integrity/>

Ruokonen, J., Nieminen, H., Dahiru, A., Laari, A., Koironen, T., Laaksonen, P., Vuokila, A., Huuhtanen, A. (2021): *Modelling and cost estimation for conversion of green methanol to renewable liquid transport fuels via olefin oligomerisation*. Processes 9,6, 1046. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/6/1046>

Scholz, A., Kloo, Y., Theisen, S., Saurat, M., Schneider, C., Meisel, K., Röder, L., Dögnitz, N., Cyffka, K.-F., Stapf, D., Reeves, A. (2025): *Unsicherheiten überwinden, grüne Märkte erschließen. Kompass zur Defossilisierung der Petrochemie in Deutschland. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed*. Wuppertal Institut. Verfügbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8856/file/8856_GreenFeed.pdf

Scholz, A., Schneider, C., Saurat, M., Theisen, S. (2023): *Das petrochemische System in Deutschland und Westeuropa. Regionale Analyse der Polymer-Produktion in Deutschland, den Niederlanden und Belgien. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed – Green Feedstock for a Sustainable Chemistry*. Wuppertal Institut. Verfügbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8146/file/8146_GreenFeed.pdf

Schorn, F. (2024): *Erneuerbares Methanol als Ausgangsstoff für die Bereitstellung von flüssigen Kraftstoffen für den Transportsektor*. Dissertation. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 636. Verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/990051/files/990051.pdf>

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): *Umsatz im Verarbeitenden Gewerbe (Volumenindex)*. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/42152/table/42152-0004/search/s/dW1zYXR6JTlwdmVyYX-JiZWl0ZW5kZXNlMjBHZXdlcmJl>

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025a): *Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (2021=100). Strom=Elektischer Strom, Börsenstrompreis*. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/61241/details/search/s/RXJ6ZXVnZXJwcmVpc2U=>

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025b): *VGR des Bundes – Bruttowertschöpfung*. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/81000/table/81000-0102/search/s/QnJldHRvd2VydHNjaCVDMyVCNnBmdW5n>

Systemiq (2022): *Planet Positive Chemicals*. Verfügbar unter: <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2022/09/Main-report-v1.20-2.pdf>

Umweltbundesamt (2021): *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland seit 1990 nach Kategorien der UNFCCC-Berichterstattung*. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/treibhausgas-emissionen-in-deutschland-seit-1990>

Valin, H., Peters, D., van den Berg, M., Frank, S., Havlik, P., Forsell, N., Hamelinck, C., Pirker, J., Mosnier, A., Balkovic, J., Schmidt, E., Dürauer, M., Di Fulvio, F. (2015): *The land use change impact of biofuels consumed in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts*. ECOFYS Netherlands B.V., Utrecht, Netherlands. BIENL13120. Verfügbar unter: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/12310/>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI) (2021a): *Chemiewirtschaft in Zahlen 2021*. Verfügbar unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chiz-historisch/chemiewirtschaft-in-zahlen-2021.pdf>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

(2021b): *Daten und Fakten im Überblick Branchenporträt, 2019.*

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI) und

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2023): *Chemistry4Climate. Wie die Transformation der Chemie gelingen kann.* Verfügbar unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

(2025a): *Chemiewirtschaft in Zahlen online.* Verfügbar unter: <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

(2025b): *Chemiepark in Deutschland.* Verfügbar unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/chemiepark-in-deutschland.pdf>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

(2025c): *Daten und Fakten zu Energie, Rohstoffe, Preise.* Verfügbar unter: <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/vci-statistik-grafiken-energie-klima-rohstoffe-chemie.jsp>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

(2025d): *Chemiemärkte weltweit.* Verfügbar unter: <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/chemiemaerkte-weltweit-deutsche-chemie-weltweit-vci-analyse.jsp>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

(2025e): *Weichen für Investitionen richtig Stellen. 16. VCI Mitgliederumfrage zur aktuellen Lage.* Verfügbar unter: <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/16-umfrage-zur-lage-ergebnisse-vci-online.pdf>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI) (2024):

Daten und Fakten. Investitionen im Fokus. Verfügbar unter: <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/vci-statistik-grafiken-bericht-investitionen-chemische-industrie-gesamtwirtschaft.jsp>

Zeroemissionplattform (2011): *The Costs*

of CO2 Transport. Verfügbar unter: <https://zeroemissionsplattform.eu/publication/the-costs-of-co2-transport/>

Publikationen von Agora Industrie

Auf Deutsch

Klimaneutraler Wirtschaftsstandort 2045

Handlungsbedarfe zwischen Konsens und Kontroverse

Industrielle Energieflexibilität ermöglichen

Konzept einer Reform der Sondernetzentgelte für Großverbraucher

Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe

Potenziale und Politikoptionen

Direkte Elektrifizierung von industrieller Prozesswärme

Eine Bewertung von Technologien, Potenzialen und Zukunftsaussichten für die EU

Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor

Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe

Wasserstoffimporte Deutschlands

Welchen Beitrag können Pipelineimporte in den 2030er Jahren leisten?

Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft

Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien

Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland

Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenstoffkreislauf

Chemie im Wandel

Die drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten

Power-2-Heat

Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl) – Update

Aktualisierte Analyse zur Stahlbranche

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Zement)

Analyse zur Zementbranche

Publikationen von Agora Industrie

Auf Englisch

Breaking new ground: decentralised renewable nitrogen fertilisers

Exploring opportunities and barriers

Green iron trade

Unlocking opportunities for Europe

Decarbonising steel in Southeast Asia

Pathways, opportunities and enablers

Industrial value chain transformation

Renewable hydrogen as an enabler of a just global energy transition

A vision for international trade in CO₂-intensive materials

The role of carbon product requirements

Creating markets for climate-friendly basic materials

Potentials and policy options

Direct electrification of industrial process heat

An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU

9 Insights on Hydrogen – Southeast Asia Edition

12 Insights on Hydrogen – Brazil Edition

Low-carbon technologies for the global steel transformation

A guide to the most effective ways to cut emissions in steelmaking

Circular Economy and Net-Zero Industry

Potentials for energy-intensive value chains in Germany

EU policies for climate neutrality in the decisive decade

20 Initiatives to advance solidarity, competitiveness and sovereignty

Labels for climate-friendly basic materials

A guide to the debate

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-industry.org

Publikationsdetails

Über Agora Industrie

Agora Industrie erarbeitet unter dem Dach der Agora Think Tanks wissenschaftlich fundierte und politisch umsetzbare Konzepte für einen erfolgreichen Weg zur klimaneutralen Industrie – in Deutschland, Europa und international. Die Denkfabrik agiert unabhängig von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen und ist ausschließlich dem Klimaschutz verpflichtet.

Agora Industrie

Agora Think Tanks gGmbH
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2
10178 Berlin | Deutschland
T +49 (0) 30 7001435-000

www.agora-industrie.de
info@agora-industrie.de

Korrektorat/Lektorat: Planet Neun

Satz: Theo Becker | Elser Druck GmbH

Titelfoto: akinbostanci | iStock

381/03-S-2025/DE

Version 1.0, Oktober 2025



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



Dieses Werk ist lizenziert
unter CC-BY-NC-SA 4.0.