

Teilbericht 2 | April 2023

Wege zu einer Netto-Null- Chemieindustrie – eine Meta-Analyse aktueller Roadmaps und Szenariostudien

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt
„Green Feedstock for a Sustainable Chemistry –
Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext
der dritten Feedstock-Transformation der chemi-
schen Industrie“

Ylva Kloo

Alexander Scholz

Svenja Theisen

Herausgeberin

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

Autorinnen und Autoren:

Ylva Kloo, Alexander Scholz, Svenja Theisen
ylva.kloo@wupperinst.org

Bitte die Publikation folgendermaßen zitieren:

Kloo, Y., Scholz, A., Theisen, S. (2023). Wege zu einer Netto-Null-Chemieindustrie – eine Meta-Analyse aktueller Roadmaps und Szenariostudien. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed. Wuppertal Institut.

Einordnung und Danksagung

Diese Publikation ist entstanden innerhalb des Forschungsprojekts „Green Feedstock for a Sustainable Chemistry – Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der chemischen Industrie (GreenFeed)“. Das vom Wuppertal Institut geleitete Forschungsprojekt exploriert gemeinsam mit seinen Partnern, dem Karlsruher Institut für Technologie und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum, mögliche Pfade für eine Transformation der heutigen Petrochemie hin zu einem zirkulären und auf erneuerbaren Rohstoffen basierendem System. Die vorliegende Publikation wird laufend ergänzt durch weitere Ergebnisberichte. Die Herausgeber danken allen beteiligten Forschungsinstituten, dem Fördermittelgeber und seinem Projektträger sowie den projektexternen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie für die konstruktive Zusammenarbeit im Gesamtprojekt.

Disclaimer

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03EI5003A durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Projektlaufzeit: März 2022 - Februar 2025

Verbundpartner:

Wuppertal Institut (Koordination): Clemens Schneider, Alexander Scholz
Karlsruher Institut für Technologie: Prof. Dr. Dieter Stapf
Deutsches Biomasseforschungszentrum: Dr. Kathleen Meisel

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Methodik	9
2.1 Kriterien für die Auswahl von Publikationen und Vorgehen bei der Recherche	9
2.2 Ausgewählte Publikationen und Szenarien	9
2.3 Auswertungskriterien	11
2.3.1 <i>Quantitative Bewertungen</i>	11
2.3.2 <i>Qualitative Bewertungen</i>	12
3 Strategien	13
3.1 Änderung des Feedstocks	13
3.1.1 <i>Recycelte Rohstoffe</i>	13
3.1.2 <i>Biomasse</i>	13
3.1.3 <i>CCU</i>	14
3.1.4 <i>Nachhaltiger Wasserstoff</i>	14
3.1.5 <i>Neue Produktionsverfahren</i>	15
3.2 Energiebezogene Emissionsminderung, Effizienzmaßnahmen und CCS	15
3.2.1 <i>Energiebedingte Emissionen</i>	15
3.2.2 <i>Effizienz</i>	16
3.2.3 <i>CCS</i>	16
4 Auswertungsergebnisse	17
4.1 Gesamtemissionen, Energie- und Nachfrageniveau	17
4.2 Vergleich der Strategien	21
4.2.1 <i>Beiträge zur Emissionsverringerng</i>	21
4.2.2 <i>Rohstoffe für chemischen Feedstock</i>	24
4.2.3 <i>Energieträger</i>	29
4.3 Herausforderungen, Chancen und politische Empfehlungen	32
4.3.1 <i>Herausforderungen</i>	32
4.3.2 <i>Chancen</i>	34
4.3.3 <i>Politische Empfehlungen</i>	36
5 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse	39
5.1 Wesentliche Gemeinsamkeiten der Studien	39
5.1.1 <i>Technologien und Zeitpläne</i>	39
5.1.2 <i>Herausforderungen</i>	41

5.2	Verstehen der wichtigsten Abweichungen und Unsicherheiten	42
5.2.1	<i>Variationen aufgrund grundlegender Unsicherheiten</i>	42
5.2.2	<i>Variationen durch absichtliche Exploration</i>	43
5.2.3	<i>Variationen aufgrund unterschiedlicher Präferenzen und Erzählungen</i>	44
5.2.4	<i>Variationen aufgrund unterschiedlicher Modellierungsansätze</i>	44
5.3	Aktuelle politische Entwicklungen	46
5.4	Schlussfolgerung und Ausblick	47
6	Literaturverzeichnis	50

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Berücksichtigte Roadmaps und Szenarien. -----	10
Tab. 4-1	Überblick über die wichtigsten Informationen in den Roadmaps und Szenarien. -	17
Tab. 4-2	Strategien zur Verringerung der THG-Emissionen nach Anteil. -----	22
Tab. 4-3	Im Zieljahr eingesetzte Rohstoffe als Anteil an der gesamten Rohstoffbasis. ----	25
Tab. 4-4	Eingesetzte Energiequellen als Anteile am Gesamtenergieverbrauch, exklusive der Energie für Feedstocks.-----	30
Tab. 4-5	Eingesetzte Energiequellen als Anteile am Gesamtenergieverbrauch, inklusive der Energie für Feedstocks. -----	31

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Illustratives Beispielszenario. -----	12
Abb. 4-1	Zeitlicher Verlauf der CO ₂ - bzw. THG-Emissionen in den betrachteten Szenarien. -----	20
Abb. 4-2	Verfügbarkeit biobasierter Routen in den betrachteten Szenarien. -----	27
Abb. 4-3	Verfügbarkeit von CCUS-Technologien in den betrachteten Szenarien. -----	28
Abb. 4-4	Verfügbarkeit von chemischem Recycling in den betrachteten Szenarien. -----	28
Abb. 4-5	Verfügbarkeit neuer Produktionsprozesse in den betrachteten Szenarien. -----	28
Abb. 4-6	In den betrachteten Publikationen genannte Begriffe, die im Zusammenhang mit Herausforderungen assoziiert werden. -----	33
Abb. 4-7	In den betrachteten Publikationen genannte Begriffe, die im Zusammenhang mit Chancen assoziiert werden. -----	35
Abb. 4-8	In den betrachteten Publikationen genannte Begriffe, die im Zusammenhang mit Empfehlungen assoziiert werden. -----	37

1 Einleitung

Es verbleiben noch 22 Jahre, bis das deutsche Ziel der Klimaneutralität erreicht sein soll. Für die Industrie ist dafür ein grundlegender Wandel und eine Beschleunigung der Emissionsminderung notwendig, denn zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2021 hat der Sektor seine Treibhausgasemissionen um lediglich 13 % verringern können (ERK, 2022). Bei den großen und komplexen Strukturen, Anlagen und Vermögenswerten, die für die energieintensiven Industriesektoren charakteristisch sind, lässt die überschaubare Zeitspanne keinen Spielraum für Verzögerungen. Eine Branche, die vor besonderen Herausforderungen steht, ist die chemische Industrie. Hier werden fossile Ressourcen nicht nur für energetische Zwecke, sondern auch rohstofflich als Feedstock genutzt, was insbesondere für die petrochemische Industrie gilt. Die hier unternommenen Anstrengungen zur Reduktion der Treibhausgase wirken sich somit nicht nur auf die Emissionen des Sektors selbst aus, sondern auf die gesamte chemische Wertschöpfungskette, einschließlich der Verwertung von Endprodukten nach ihrer Nutzungsphase. Die Abhängigkeit von energetischen Ressourcen für die stoffliche Verwendung bedeutet auch, dass eine besondere Verbindung zum Energiesystem besteht.

Die chemische Industrie ist auch für die Antwerpen-Rotterdam-Rhein-Ruhr-Region (engl. Antwerp-Rotterdam-Rhine-Ruhr-Area, kurz *ARRRA*) von besonderer Bedeutung, die mehrere große petrochemische Cluster in Deutschland, den Niederlanden und Belgien mit komplex vernetzten Produktionsketten beherbergt. Bei der Umsetzung der Klimaziele stehen diese Regionen vor bedeutenden Veränderungen und haben zugleich die Chance, sich als Vorreiter der Industrietransformation zu positionieren. Dafür müssen erfolgreiche Strategien für den Wandel identifiziert und angewendet werden.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Szenarioanalysen und Roadmaps veröffentlicht, in denen Entwicklungspfade für die chemische Industrie im Einklang mit nationalen und internationalen Klimazielen aufgezeigt werden. Diese können eine Darstellung von technologischen Optionen, wichtigen Voraussetzungen, besonderen Herausforderungen sowie bedeutsamen Chancen und zeitlichen Entwicklungen beinhalten. Die vorliegende Metaanalyse fasst die Ergebnisse einiger der aktuellsten Arbeiten auf nationaler, europäischer und globaler Ebene zusammen und vergleicht diese kritisch miteinander. Da das Kernziel der vorliegenden Analyse darin besteht, die verschiedenen strategischen Optionen und Entwicklungspfade für Deutschland und die *ARRRA* zu untersuchen, liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf Publikationen mit Fokus Deutschland, den Niederlanden und Belgien. Dabei wird sowohl ein quantitativer als auch ein qualitativer Ansatz verfolgt, der die Ressourcen- und Produktionsmengen, die relative Bedeutung verschiedener Emissionsminderungsstrategien sowie auch politische Empfehlungen und andere wichtige Rahmenbedingungen berücksichtigt. Der Fokus liegt dabei auf Strategien für den Einsatz alternativer nicht-fossiler Feedstocks und die Minderung damit verbundener Emissionen.

Das folgende Kapitel 2 beschreibt zunächst das Vorgehen bei der Recherche und der Auswahl von Veröffentlichungen für die Bewertung, die ausgewählten Szenarien sowie die Auswertungsmethodik. Kapitel 3 umfasst eine kurze Beschreibung der möglichen Strategien zur Minderung von Treibhausgasen in der chemischen Industrie,

insbesondere in Bezug auf die Feedstocks. Darauf folgt in Kapitel 4 eine Analyse und ein Vergleich der ausgewählten Szenarien. Hier werden zunächst Emissionsminderungen, Energiebedarfe und Nachfrageveränderungen dargestellt. Anschließend erfolgt eine detaillierte Betrachtung der zugrundeliegenden Strategien und eingesetzten Technologien im Hinblick auf Feedstocks und Energieträger sowie eine qualitative Zusammenfassung der in den Roadmaps angesprochenen Herausforderungen, Chancen und politischen Empfehlungen. Die Ergebnisse werden anschließend in Kapitel 5 kritisch diskutiert, wobei ein Schwerpunkt auf Gemeinsamkeiten und Unterschieden der betrachteten Szenarien liegt. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick und zentralen Schlussfolgerungen.

Eingebettet in das Forschungsprojekt *Green Feedstock for a Sustainable Chemistry – Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der chemischen Industrie (GreenFeed)* zielt diese Arbeit darauf ab, die heterogene Diskussion über mögliche Strategien und Entwicklungslinien für die petrochemische Industrie im Kontext der Energiewende zu beleuchten. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für nachfolgende Arbeitspakete, die sich auf Technologiebewertungen, Szenarioentwicklung und Roadmapping konzentrieren.

2 Methodik

Die in diesem Projekt durchgeführte Literaturanalyse erfolgte in drei Schritten: Aufstellung von Auswahlkriterien, Suche und Auswahl von Dokumenten und schließlich eine Zuordnung und Auswertung anhand einer Reihe von Bewertungskriterien. Diese Schritte werden im Folgenden ausführlicher beschrieben. Der Begriff "Roadmap" bezieht sich auf ein Dokument, in dem Wege zur Emissionsreduzierung für die chemische Industrie aufgezeigt werden. Eine Roadmap kann mehrere verschiedene Wege zu diesem Ziel enthalten, die hier als verschiedene "Szenarien" bezeichnet werden. Der Einfachheit halber werden diese beiden Begriffe hier durchgängig verwendet, obwohl in den Dokumenten selbst auch andere Begriffe verwendet werden können, wie z. B. "Pfade" statt "Szenarien" oder "Szenario-/Pfadanalyse" statt "Roadmap".

2.1 Kriterien für die Auswahl von Publikationen und Vorgehen bei der Recherche

Für den ersten Schritt wurden die folgenden Kriterien festgelegt, die bestimmen, welche Dokumente in die Analyse einbezogen werden:

- **Geografie:** Da der Schwerpunkt auf Roadmaps zu Deutschland, den Niederlanden und Belgien lag, wurden Arbeiten mit Blick auf diese Länder priorisiert. Ergänzt wurden diese durch Roadmaps mit europäischem und globalem Fokus.
- **Aktualität:** Die Veröffentlichung erfolgte frühestens 2017.
- **Detaillierungsgrad:** Es werden quantitative Angaben zu Treibhausgasemissionen, Energiebedarf und Nachfrage-/Produktionsvolumen für die chemische/petrochemische/Kunststoffindustrie im jeweiligen Zieljahr der verschiedenen Studien gemacht (2045 bzw. 2050).
- **Grad der Ambition:** Es wird mindestens ein Szenario dargestellt, das bis zum Zieljahr eine Emissionsreduktion für die chemische/petrochemische/Kunststoffindustrie von mindestens 90 % im Vergleich zum jeweiligen Referenzjahr und für den im Dokument verwendeten Emissionsbereich erzielt (s. Tabelle 2-1).

In den Niederlanden und Belgien erfüllen jedoch nur sehr wenige Roadmaps diese Kriterien vollständig. Um eine vollständige Repräsentation der ARRRRA zu erreichen, betrachten, wurden auch Roadmaps aus den Niederlanden und Belgien aufgenommen, auch wenn diese die Kriterien nur größtenteils erfüllen.

Die Dokumentensuche erfolgte dann durch eine Zusammenstellung von Dokumenten, die den Autor*innen bereits bekannt waren sowie ergänzende Recherchen in Online-Datenbanken.

2.2 Ausgewählte Publikationen und Szenarien

Die ausgewählten Dokumente sind in Tabelle 2-1 aufgeführt. Fünf Publikationen wurden für Deutschland, drei für die Niederlande (einschließlich für die Teilregion des Hafens von Rotterdam) und zwei für Belgien oder Teile Belgiens gefunden. Darüber hinaus wurden vier Dokumente mit europäischem und drei mit globalem Geltungsbereich ausgewählt. In den ausgewählten Dokumenten wurden insgesamt 35 Szenarien identifiziert, die in ihrem jeweiligen Geltungsbereich eine Reduzierung der

Treibhausgasemissionen für die chemische Industrie von mindestens 90 % erreichen. Die Szenarien *MIX* in *TransitVlaams* und *CORE-95* in *ScenBel* erreichen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 88 %, wurden aber trotzdem aufgenommen, um Belgien in der Auswahl der Szenarien besser zu repräsentieren. Die Roadmaps wurden von und für eine Vielzahl von Akteuren erstellt, darunter Regierungsbehörden, Industrieorganisationen und Forschungseinrichtungen.

Tab. 2-1 Berücksichtigte Roadmaps und Szenarien.

Codename	Titel	Jahr	Herausgeber/ Autor*innen	Geografie	Ausgewählte Szenarien
Wege	Wege zu einer ressourcenschonenden Treibhausgasneutralität	2019	Umweltbundesamt	Deutschland	GreenEe1 GreenEe2 GreenLate GreenMe GreenLife GreenSupreme
RoadChem	Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland	2019	Dechema, FutureCamp	Deutschland	Pfad Treibhausgasneutralität 2050
KlimaPfade	KLIMAPFADE 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft	2021	BCG	Deutschland	Empfohlener Pfad
KlimaDe	Klimaneutrales Deutschland 2045	2021	Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende	Deutschland	KN2045
DenaLeit	dena-Leitstudie – Aufbruch Klimaneutralität	2021	Deutsche Energie-Agentur GmbH	Deutschland	KN100
DeepDecarb	Deep decarbonisation pathways for the industrial cluster of the Port of Rotterdam	2016	Wuppertal Institut	Hafen von Rotterdam	Biomass and CCS (BIO) Closed carbon cycle (CYC)
ChemforCli	Chemistry for Climate: Acting on the need for speed Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050	2018	Ecofys, Berenschot	Niederlande	Circular & biobased Electrification 2030 compliance at least cost Direct action & high-value applications
Manuel et. al.	High technical and temporal resolution integrated energy system modelling of industrial decarbonisation	2022	M. Sanchez Dieguez, F. Taminau, K. West, J. Sijm, A. Faaij, (in: Advances in Applied Energy (7) 2020)	Niederlande	OPN BIO CCS ELE HYD
Transit-Vlaams	Transitiepotentieel van de Vlaamse industrie: Roadmapstudie en ontwerp van transitiekader	2020	Deloitte, VUB-IES, Climact	Flandern in Belgien	MIX VAR1 VAR2
ScenBel	Scenarios for a Climate Neutral Belgium by 2050	2021	FPS Public Health: DG Environment: Climate Change Section	Belgien	CORE-95
LowCarb	Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry	2017	Dechema	Europa	Maximum
IndInno	Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonization of Industry	2019	ICF Consulting Services Limited, Fraunhofer ISI	Europa	Mix95

IndTrans	Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry	2019	Material Economics, VUB-IES, Wuppertal Institut	Europa	New Processes (NP) Circular Economy (CE) Carbon Capture (CC) (jeweils für Kunststoffe und Ammoniak)
iC2050	iC2050 PROJECT REPORT - Shining a light on the EU27 chemical sector's journey toward climate neutrality	2021	Deloitte	Europa	High electrification Fostering circularity Sustainable biomass CO ₂ capture
Meys et. al.	Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy	2021	R. Meys, A. Kätelhön, M. Bachmann, B. Winter, C. Zibunas, S. Suh, A. Bardow (in: Science 2021, 374, 6563)	Global	Circular carbon pathway (combo)
Saygin & Gielen	Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector	2021	D. Saygin, D. Gielen (in: Energien 2021, 14, 3772)	Global	1.5 °C case
PlanPos	Planet Positive Chemicals - Pathways for the chemical industry to enable a sustainable global economy	2022	Center for Global Commons, SYSTEMIQ	Global	LC-NFAX

2.3 Auswertungskriterien

Die Dokumente wurden sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht bewertet. Die quantitative Bewertung erfolgte im Hinblick auf die Entwicklung von THG-Emissionen, den Einsatz von Energie und Feedstock sowie Produktionsmengen. Die qualitative Bewertung fokussierte auf zentrale Herausforderungen, Chancen und politische Empfehlungen und untersuchte, welche spezifischen Technologien zum Einsatz kommen und wann sie eingeführt werden.

2.3.1 Quantitative Bewertungen

Für die quantitative Bewertung wurden die in den Roadmaps enthaltenen Daten zusammengetragen und teilweise durch eigene Berechnungen ergänzt, um prozentuale Gesamtveränderungen bei Emissionen, Energieverbrauch und Produktionsvolumen bis zum Zieljahr zu ermitteln. Darüber hinaus wurden die Anteile der verschiedenen Arten von Rohstoffen und Energiequellen berechnet, die im Zieljahr der Szenarien zum Einsatz kommen, sofern sie nicht bereits explizit in den Roadmaps aufgeführt waren. Diese Berechnungen wurden durch das Online-Tool WebPlotDigitizer unterstützt, wenn Werte aus grafischen Darstellungen extrahiert werden mussten. Da die Rohstoffe und Energieträger in den verschiedenen Roadmaps unterschiedlich kategorisiert sind, wurden einige Annahmen und Neukategorisierungen vorgenommen, um einen Vergleich der Nutzung verschiedener Strategien zu ermöglichen. Die in den einzelnen Roadmaps verwendeten ursprünglichen Kategorien wurden jedoch ebenfalls vermerkt.

Einige Roadmaps zeigen, wie die Emissionsreduzierungen quantitativ erreicht werden, indem der Anteil jeder Strategie an der Gesamtreduzierung dargestellt wird. Diese Daten wurden gesammelt und zusammengefasst, wobei die Strategien aus Gründen der Vergleichbarkeit in die neun Kategorien Recycling, Biomasse, CCU/H₂, Elektrifizierung, Emissionsfaktor für Strom, erneuerbare Energien (ohne Strom), CCS, Effizienzverbesserungen und Sonstige kategorisiert wurden. Ein anschauliches

Beispiel hierfür findet sich in Abb. 2-1, die zeigt, dass die Strategie "CCS" in einem fiktiven Beispielszenario zur gesamten Emissionsreduzierung beiträgt.¹ Darüber hinaus wird in den Roadmaps häufig ein Anstieg der Produktion bis zum Zieljahr erwartet, was unter ceteris-paribus-Bedingungen zu einem Anstieg der Emissionen führen würde. Die Emissionsminderungsstrategien müssen also verstärkt zum Einsatz kommen, um diesen Anstieg kompensieren. Zur Erfassung dessen wurde die Kategorie "Wachstumseffekt" eingeführt. Hieraus geht hervor, um wie viel die Emissionen unter ceteris-paribus-Bedingungen zunehmen (oder abnehmen) würden und welcher zusätzliche (oder verringerte) Bedarf an Emissionsminderungsstrategien resultiert. Dieser "Wachstumseffekt" ist ebenfalls in Abb. 2-1 visualisiert. Er wurde aus den Roadmaps anhand der Differenz zwischen den Emissionen in einem Referenz- oder Business-as-usual-Szenario im Zieljahr und den Emissionen im Referenzjahr berechnet.

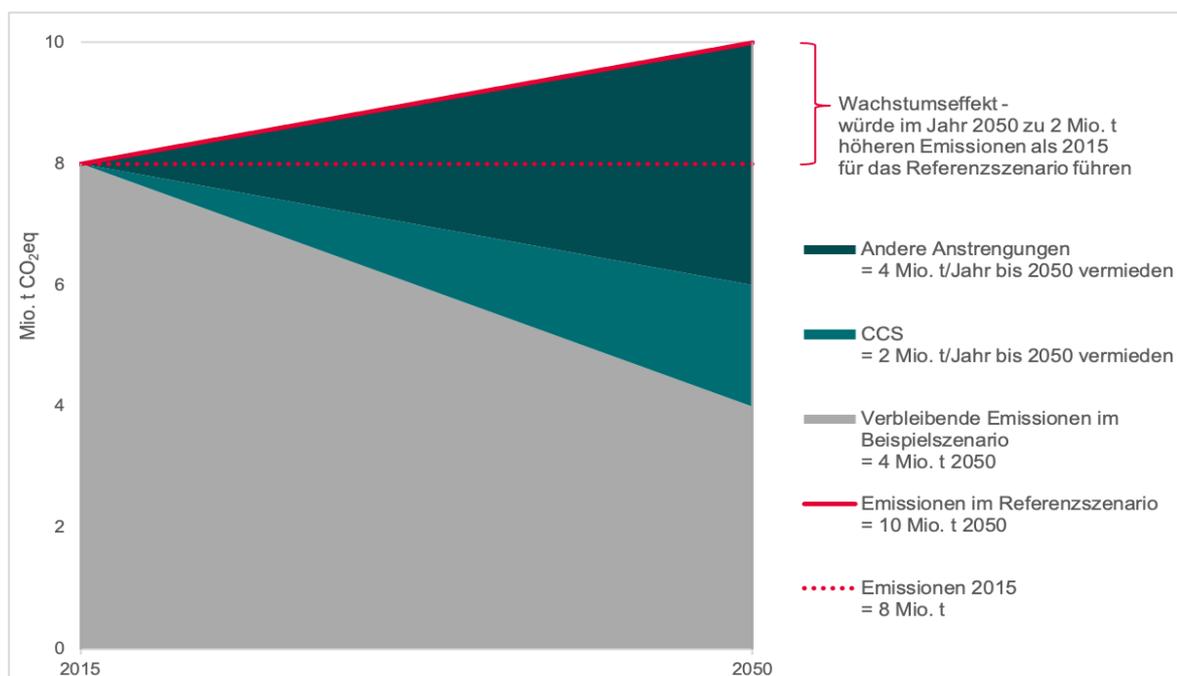


Abb. 2-1 Illustratives Beispielszenario.

Hinweis: Dieses fiktive Szenario dient der Veranschaulichung, wie die Emissionsreduktion am Beispiel der CCS-Strategie berechnet wurde und erläutert, was unter "Wachstumseffekt" zu verstehen ist.

2.3.2 Qualitative Bewertungen

Die qualitative Bewertung konzentriert sich auf die wichtigsten in den jeweiligen Studien genannten Herausforderungen, Chancen und politischen Empfehlungen sowie auf die in den Roadmaps eingesetzten Technologien und den zeitlichen Verlauf der Emissionsminderungen. Diese Daten wurden aus den jeweiligen Zusammenfassungen, Schlussfolgerungen, Abbildungen und Tabellen der Papiere gesammelt und

¹In diesem Beispiel liegt der Anteil der Emissionsverringerung durch CCS bei 25 %, berechnet als die durch CCS vermiedenen Emissionen im Jahr 2050, geteilt durch die Gesamtemissionen im Bezugsjahr 2015.

durch Wortsuchen nach relevanten Begriffen ergänzt. Für jede Roadmap wurden Erwähnungen zu jedem dieser Themen festgehalten.

3 Strategien

Das Ziel der Defossilisierung der chemischen Industrie impliziert, dass die in der Produktion verwendeten Feedstocks nicht mehr aus Mineralöl, fossilem Naphtha, Erdgas und anderen fossilen Rohstoffen stammen dürfen. Die diskutierten Optionen für eine alternative Kohlenstoffversorgung sind recycelte Rohstoffe, Biomasse und abgeschiedenes CO₂. Diese alternativen Ausgangsstoffe sind jedoch nicht immer so energiedicht wie deren fossile Pendanten. Je nach Energiegehalt der Endprodukte kann der fehlende Energiegehalt in Form von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff zugeführt werden. In diesem Abschnitt werden die Defossilisierungs-Strategien im Hinblick auf ihre Merkmale und die verfügbaren Technologien kurz beschrieben. Auch wenn der Schwerpunkt dieser Studie auf den Feedstocks und den damit verbundenen Emissionen liegt, müssen auch die energetischen Emissionen vermieden oder sehr stark gemindert werden, um das Netto-Null Ziel zu erreichen. Verbesserungen der Energie- und Materialeffizienz können ebenfalls zur Emissionsreduzierung beitragen und den Bedarf an emissionserzeugenden Prozessen insgesamt verringern. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, verbleibende Emissionen, ob fossil oder nicht, abzuscheiden und zu speichern. Diese Strategien werden im Folgenden ebenfalls kurz vorgestellt.

3.1 Änderung des Feedstocks

3.1.1 Recycelte Rohstoffe

Die Notwendigkeit der Beschaffung von neuen Rohstoffen kann durch die Verwendung von recycelten Materialien vermieden bzw. gemindert werden. Dies kann entweder durch das heute übliche mechanische Recycling von Kunststoffen oder durch chemisches Recycling erfolgen, für das derzeit Technologien entwickelt werden, z. B. Solvolyse, Pyrolyse oder Gasifizierung. Durch das Recycling werden auch Emissionen aus der End-of-Life-Behandlung des Abfallmaterials vermieden, die laut einer Analyse von Material Economics (2019) etwa 60 % der Lebenszyklusemissionen von Kunststoffprodukten ausmachen, wenn diese als Abfall verbrannt werden. Zu den Herausforderungen dieser Strategie gehört es, die derzeit niedrige Sammelquote sowie den Anteil des gesammelten Materials, das in den Kreislauf zurückgeführt werden kann, zu erhöhen. Heute liegen diese Quoten in der EU bei jeweils 35 % (Antonopoulos et al., 2021; Plastics Europe, 2022). Die verschiedenen Recyclingtechnologien sind in der Lage, unterschiedliche Arten von Abfällen und mehr oder weniger sortierte Abfälle anzunehmen. Die werkstoffliche Verwertung ist einerseits energieeffizient, erfordert aber einen hohen Sortiergrad, während die Gasifizierung im Wesentlichen jedes Gemisch annehmen kann, andererseits aber ein deutlich energieintensiveres Verfahren ist.

3.1.2 Biomasse

Neue Rohstoffe können aus Biomasse gewonnen werden. Je nachdem, welche Art von Biomasse verwendet wird, kann diese Strategie als nachhaltig gelten. Der Begriff

"nachhaltige Biomasse" wird verwendet, um sich von einer Rohstoffbeschaffung abzugrenzen, die zu Umweltschäden und erhöhten Emissionen beiträgt. Viele potenzielle Quellen für Biomasse sind denkbar, darunter Zucker- oder Ölpflanzen, allerdings werden Non-Food-Quellen wie land- oder forstwirtschaftliche Rückstände, andere holzartige Biomasse, Stärke oder Lebensmittelabfälle aufgrund von Nachhaltigkeitsaspekten oft bevorzugt. Die EU hat Nachhaltigkeitskriterien für die energetische Nutzung von Biomasse aufgestellt, welche größtenteils auch auf biobasierte Kunststoffe angewendet werden sollten (Europäische Kommission, o. J.-a, 2022b). Der Umfang des nachhaltigen Biomassepotenzials ist allerdings umstritten (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019). Die Verarbeitung von Biomasse zu chemischen Produkten kann je nach Ausgangsmaterial z. B. durch Vergärung zu Ethanol, Pyrolyse oder Vergasung erfolgen. Es gibt auch Möglichkeiten, die Biomasse so zu verarbeiten, dass mehr von der ursprünglichen Molekularstruktur erhalten bleibt, was potenziell weniger energieintensiv ist.

3.1.3 CCU

Die dritte Option für die Beschaffung von Kohlenstoff ist die Abscheidung in Form von CO₂, entweder aus Punktquellen wie Industrieprozessen, Energieerzeugung, Abfallverbrennung und Biogas-/Bioethanolanlagen oder aus der Umgebungsluft durch Direct Air Capture (DAC). Die Abscheidung und Nutzung von CO₂ aus Punktquellen kann insbesondere in solchen Fällen zu einer Verringerung von Emissionen führen, in denen keine Möglichkeiten zur Vermeidung des entstehenden CO₂ oder zu seiner dauerhaften geologischen Speicherung zur Verfügung stehen. So gilt beispielsweise die Entstehung von prozessbedingtem CO₂ bei der Zementherstellung als unvermeidbar. Das gesamte Emissionsminderungspotenzial der CCU-Strategie hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören die für die Abscheidung verwendete Energiequelle sowie die Dauer der Bindung des abgeschiedenen Kohlenstoffs im Produkt oder im Kohlenstoffkreislauf, da er bei der Verbrennung des Produkts wieder freigesetzt wird. Eine Vielzahl von Abscheidungstechnologien und -methoden wird entwickelt, die für unterschiedliche CO₂-Konzentrationen geeignet sein können. In der Regel ist die Abscheidung bei höheren Konzentrationen von CO₂ und größeren Punktquellen energieeffizienter. CO₂ hat einen sehr geringen Energiegehalt, und um den abgeschiedenen Kohlenstoff in Kohlenwasserstoffe umzuwandeln, muss Energie in Form von Wasserstoff zugeführt werden. Das CO₂ kann dann zusammen mit dem Wasserstoff in Zwischenprodukte wie Methanol, Ethanol oder Synthesegas umgewandelt werden, die dann eine Weiterverarbeitung zu einer Vielzahl von Produkten erlauben.

3.1.4 Nachhaltiger Wasserstoff

Für ein kohlenstoffneutrales System muss auch der in der chemischen Industrie verwendete Wasserstoff entsprechend hergestellt werden. Wasserstoff wird für die oben erwähnte CCU-Strategie benötigt, kommt aber auch in geringeren Mengen für die Produktion von Kunststoffen mittels anderer Technologien zum Einsatz, z. B. bei der Vergasung von Abfällen oder Biomasse. Außerdem ist Wasserstoff ein zentraler Bestandteil bestimmter chemischer Produkte wie Ammoniak. Die wichtigste Option für erneuerbaren ("grünen") Wasserstoff ist die Wasserelektrolyse unter Verwendung von erneuerbarem Strom, aber erneuerbarer Wasserstoff könnte auch aus Biogas

oder Biomasse hergestellt werden. Auch Wasserstoff, der mit Atomstrom erzeugt wird ("rosa" Wasserstoff), oder Wasserstoff aus fossiler Produktion mit Kohlenstoffabscheidung ("blauer" Wasserstoff) werden zumindest als kohlenstoffarme Produktionsoptionen betrachtet.

3.1.5 Neue Produktionsverfahren

Wie beschrieben, werden die verschiedenen Ausgangsstoffe häufig zu denselben Basisprodukten verarbeitet, d. h. zu Synthesegas, Methanol oder ölähnlichen Flüssigkeiten, die dann zu chemischen Endprodukten weiterverarbeitet werden können. Synthesegas kann in Methanol umgewandelt oder über das Fischer-Tropsch-Verfahren zu flüssigen Kohlenwasserstoffen umgewandelt werden, für Methanol sind die Routen Methanol-zu-Olefinen (MtO) oder Methanol-zu-Aromaten (MtA) denkbar und die ölähnlichen Flüssigkeiten können wie ihre fossilen Äquivalente behandelt werden. Die Grundprodukte könnten auch importiert und an einem anderen Ort verarbeitet werden. Dies kann beispielsweise relevant sein für Regionen, in denen der Zugang zu Rohstoffen oder großen Mengen erneuerbarem Strom begrenzt ist.

3.2 Energiebezogene Emissionsminderung, Effizienzmaßnahmen und CCS

3.2.1 Energiebedingte Emissionen

Die Bereitstellung von Wärme und Strom muss defossilisiert werden, wenn die chemische Industrie Netto-Null-Emissionen erreichen will. Gegenwärtig entfallen 94 % des Endenergieverbrauchs in der chemischen und pharmazeutischen Industrie der EU auf Gas, Strom, Wärme sowie Erdöl und Erdölprodukte, hiervon sind 36 % auf Gas und 28 % auf Strom zurückzuführen (Cefic, 2022). Ein wichtiger Energieträger in der chemischen Industrie ist Dampf, der z. B. beim Cracken, bei der Destillation, bei der Verdampfung, bei der Wasserstofferzeugung und als Wärmeträger verwendet wird (Directorate-General for Energy, 2016). Eine Möglichkeit, die Energienutzung zu defossilisieren, besteht daher darin, den Dampf aus erneuerbaren Energiequellen zu erzeugen, indem Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Heizkessel mit kohlenstoffarmen Brennstoffen wie Biogas oder nachhaltigem Wasserstoff anstatt mit Erdgas oder anderen fossilen Brennstoffen betrieben werden. Einige Prozesse auf verschiedenen Temperaturniveaus könnten auch elektrifiziert werden (Power-to-Heat), wodurch der Bedarf an Brennstoffen entfällt. Für andere Prozesse ist Wärme mit niedrigeren Temperaturen erforderlich, und in diesem Fall sind Erdwärme oder Solarwärme mögliche Optionen, ebenso wie die Nutzung von Abwärme aus Hochtemperaturprozesse.

Eine parallele Defossilisierung des Stromsektors trägt indirekt zur Verringerung der Emissionen der chemischen Industrie bei. Strom wird heute bei der Herstellung verschiedener Chemikalien verwendet, vor allem jedoch bei der Herstellung von Chlor. Außerdem wird er zum Beispiel für den Antrieb von Ventilatoren, Kompressoren und Pumpen genutzt. Es wäre möglich, auch andere Prozesse zu elektrifizieren, wie die bereits erwähnte Dampferzeugung mit Hilfe von Elektrokesseln oder andere Power-to-Heat-Optionen wie Wärmepumpen, mechanische Brüdenkompression und elektrifizierte Öfen. Darüber hinaus ist erneuerbarer Strom eine wichtige Voraussetzung für andere rohstoffbezogene Strategien, da er für die oben erwähnte Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff durch Elektrolyse benötigt wird.

3.2.2 Effizienz

Eine verbesserte Effizienz begrenzt den Bedarf an Energie und/oder Ressourcen zur Herstellung eines gewünschten Produkts. Während die Energieeffizienz seit langem eine Priorität für Industriestrategien und -politik ist, können Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz auch Potenziale für eine THG-Minderung bieten. Effizienzverbesserungen können in allen Größenordnungen und sowohl schrittweise als auch grundlegend vorgenommen werden. Einige Beispiele sind Prozessoptimierungen, die Einführung der besten verfügbaren Technologien, die Umstellung auf neue Katalysatoren, eine verbesserte Wärmeintegration, Nachrüstungen, aber auch Maßnahmen auf der Ebene des Energiesystems, z. B. durch industrielle Symbiosen oder Konzepte der Kreislaufwirtschaft wie die Gestaltung oder Verwendung von Produkten in einer Weise, die den Bedarf an neuen Materialien verringert.

3.2.3 CCS

Die verbleibenden CO₂-Emissionen der chemischen Industrie und ihrer Wertschöpfungsketten könnten (größtenteils) mit Hilfe der CCS-Technologie aufgefangen und gespeichert werden. Wie bereits für CCU beschrieben, ermöglichen größere und konzentriertere Quellen einen effizienteren und wirtschaftlicheren Prozess. Die Speicherung erfordert eine besondere Infrastruktur in Form von Lagerstätten (z. B. erschöpfte Öl- und Gasfelder oder Salzformationen) und den zugehörigen Transport. Das abgetrennte und gespeicherte CO₂ kann sowohl fossilen als auch biogenen (BECCS) oder atmosphärischen Ursprungs (DACCS) sein, wobei die letzteren Fälle die Möglichkeit zu Netto-Negativ-Emissionen bieten. Es ist anzumerken, dass keine der derzeit bekannten CCS-Technologien eine vollständige CO₂ Abscheidung erreichen kann und diese somit stets zu Restemissionen führen, die berücksichtigt werden sollten.

4 Auswertungsergebnisse

4.1 Gesamtemissionen, Energie- und Nachfrageniveau

Die für diese Bewertung ausgewählten Szenarien zeigen alle Wege zu Netto-Null-Emissionen auf, wenn auch in unterschiedlichem Umfang (bezogen auf die Region, die Produkte, die Emissionen und die Energie, s. Spalte „Umfang“ in Tabelle 4-1). Die in den Szenarien beschriebenen Minderungen der Emissionen sowie die Veränderungen beim Primär- oder Endenergieverbrauch und des Nachfrage- bzw. Produktionsniveaus sind in Tabelle 4-1 dargestellt, jeweils bezogen auf das Zieljahr gegenüber dem Referenzjahr der Studien. Die Tabelle führt die spezifischsten Angaben auf, die in den jeweiligen Roadmaps gegeben waren. Da der Detaillierungsgrad zwischen den Roadmaps teilweise stark variiert, sind manche Angaben detaillierter als andere. Außerdem wurden in den verschiedenen Roadmaps unterschiedliche Begriffe zur Beschreibung der Emissionsbereiche und des Energieverbrauchs verwendet. Aus Konsistenzgründen wurden in der Spalte "Umfang" bei einzelnen Roadmaps Annahmen darüber getroffen, welche Emissionsbereiche in den Begriffen 1, 2 und 3 enthalten sind und ob es sich bei der beschriebenen Energienutzung um Primär- oder Endenergie handelt.

Tab. 4-1 Überblick über die wichtigsten Informationen in den Roadmaps und Szenarien.

Codename	Umfang	Codename des Szenarios	CO ₂ /THG Reduzierung (%)	Primär- oder Endenergieverbrauch (%)	Nachfrage/Produktion (%)	Referenz- & Zieljahr
Wege	Region: Deutschland Produkte: Chemische Industrie Emissionen: THG Energie: Endenergie inkl. Feedstock	GreenEe1 GreenEe2 GreenLate GreenMe GreenLife GreenSupreme	-98 % -98 % -99 % -98 % -98 % -98 %	-11 % -11 % +5 % -11 % -11 % -11 %	+/- 0 % +/- 0 % +/- 0 % +/- 0 % +/- 0 % +/- 0 %	2017 2050
RoadChem	Region: Deutschland Produkte: Ammoniak, Benzol, Butadien, Chlor, Ethylen, Methanol, Propylen, Toluol, Harnstoff, Xylol Emissionen: THG Scope 1, 2, 3 Energie: Primärenergie inkl. Feedstock	Pfad Treibhausgasneutralität 2050	-98 %	+87 %	Grundchemie +/- 0 % Spezialchemie +81 %	2020 2050
KlimaPfade	Region: Deutschland Produkte: Basischemikalien Emissionen: THG Energie: Endenergie exkl. Feedstock	Empfohlener Pfad	-100%	-20 %	HCV/Ethylen -38 % Ammoniak +3 %	2019 2045
KlimaDe	Region: Deutschland Produkte: Grundchemikalien (Nachfrage nach Ammoniak und HVC) Emissionen: THG Energie: Endenergie inkl. Feedstock	KN2045	-175 %	+1 %	HVC/Ethylen -42 % Ammoniak -45 % Polymere +3 %	2016 2045
DenaLeit	Region: Deutschland Produkte: Ammoniak, Aromaten, Chlor, Methanol, Olefine Emissionen: THG Energie: Endenergie exkl. Feedstock	KN100	-114 %	+6 %	Chlor +23 % Methanol +0 % Aromaten & Olefine -5 % Ammoniak -28 %	2018 2045

Deep-Decarb	Region: Hafen von Rotterdam Produkte: Chemische Industrie Emissionen: CO ₂ Energie: Endenergie exkl. Feedstock	BIO CYC	-100 %	-11 %	-	2015 2050
ChemforCli	Region: Niederlande Produkte: Petrochemikalien Emissionen: THG Scope 1, 2 teilweise Scope 3 (End-of-Life) Energie: -	Circular & biobased Electrification 2030 compliance Direct action & high-value applications	-96 % -95 % -97 % -96 %	-	+56 % +56 % +56 % +56 %	2005 2050
Manuel et al.	Region: Niederlande Produkte: HVC Emissionen: THG Scope 1, 2 Energie: Primärenergie inkl. Feedstock	OPN BIO CCS ELE HYD	-100 % -100 % -100 % -100 % -100 %	- - - - -	-54 % -54 % -54 % -54 % -54 %	2020 2050
Transit-Vlaams	Region: Flandern in Belgien Produkte: Ammoniak, Chlor, CO, Ethanol, HVC, H ₂ , Methanol Emissionen: THG Energie: Endenergie exkl. Feedstock	MIX VAR1 VAR2	-88 % -92 % -93 %	+2 % -10 % -5 %	+12 % +12 % +12 %	2015 2050
ScenBel	Region: Belgien Produkte: Ammoniak, Chlor, Olefine, Sonstige Emissionen: THG Energie: -	CORE-95	-88 %	-	-58 %	2010 2050
LowCarb	Region: Europa Produkte: Chlor, Ethylen, Propylen, BTX, Bioethanol, Ammoniak, Harnstoff, MeOH Emissionen: THG Scope 1, 2 Energie: Primärenergie inkl. Feedstock	Maximum	-247 %	+162 %	+225 %	2015 2050
IndInno	Region: EU Produkte: Ammoniak, Ethylen (und andere Olefine), Methanol Emissionen: THG Energie: Endenergie inkl. Feedstock	Mix95	-90 %	+0,26 %	+102 %	2015 2050
IndTrans	Region: Europa Produkte: Kunststoffe Emissionen: CO ₂ Energie: Primärenergie inkl. Feedstock	Kunststoffe NP Kunststoffe CE Kunststoffe CC Ammoniak NP Ammoniak CE Ammoniak CC	-100 % -100 % -100 % -100 % -100 % -95 %	+0,12 % -18 % +0,61 %	0 % -14 % 0 % -12 % -30 % -12 %	2015 2050
iC2050	Region: EU27 Produkte: Ammoniak, Benzol, Chlor, Ethylen, Ethylenoxid, Wasserstoff, MEG, Methanol, PE, PET, PP, Propylen, PS, PTA, PVC, Styrol, Toluol, Xylol Emissionen: THG Scope 1, 2, teilweise 3 (upstream) Energie: Primärenergie exkl. Feedstock	High electrification Fostering circularity Sustainable biomass CO ₂ capture	-100 % -100 % -100 % -100 %	+36 % +74 % +78 % +46 %	+33 % +33 % +33 % +33 %	2019 2050
Meys et al.	Region: Global Produkte: Kunststoffe Emissionen: THG Scope 1, 2, 3 Energie: Endenergie inkl. Feedstock	Circular carbon pathway	-101 %	-	+255 %	2015 2050

Saygin & Gielen	Region: Global Produkte: Chemische Industrie Emissionen: CO ₂ Scope 1, teilweise 3, (downstream) Energie: Endenergie inkl. Feedstock	1.5 °C case	-100 %	+173 %	+146 %	2017 2050
PlanPos	Region: Global Produkte: Ammoniak, Ammoniumnitrat, Butadien, Benzol, Ethylen, Methanol, Propylen, Toluol, Harnstoff, Xylol Emissionen: THG Scope 1, 2, wichtigste Scope 3 Energie: Primärenergie inkl. Feedstock	LC-NFAX	-107 %	+30 %	+143 %	2020 2050

Alle Roadmaps weisen im Zieljahr nahezu Netto-Null-Emissionen oder sogar negative Emissionen auf. Es ist jedoch sehr wichtig zu beachten, dass sich die verschiedenen Roadmaps auf unterschiedliche Emissionsbereiche beziehen und keine einheitlichen Bilanzierungsregeln verwenden, sodass die jeweils angegebenen CO₂- bzw. THG-Minderungen nicht ohne Weiteres miteinander verglichen werden können. Der Geltungsbereich kann auf bestimmte Abschnitte des Lebenszyklus (z. B. cradle-to-gate, nur Emissionen aus einer bestimmten geografischen Region oder verschiedene Arten der Anrechnung von biogenem und gebundenem Kohlenstoff), auf bestimmte Produkte (z. B. nur Kunststoffe) oder nur auf CO₂-Emissionen (also nicht alle THG-Emissionen) beschränkt sein. Tatsächlich umfasst keine Roadmap alle Treibhausgasemissionen aus dem gesamten Lebenszyklus aller Produkte der chemischen Industrie. Die Emissionen aus der End-of-Life-Behandlung sind aus der Lebenszyklusperspektive im derzeitigen System besonders bedeutsam, weshalb die Einbeziehung oder der Ausschluss dieser Emissionen von großer Relevanz sein kann. Emissionen am Ende des Lebenszyklus sind in etwa der Hälfte der Roadmaps enthalten, obwohl sie in einigen Fällen anderen Sektoren in einem Netto-Null-System zugeordnet werden. Unterschiedliche Bilanzierungsansätze wirken sich z.B. darauf aus, ob und welche Kohlenstoffströme als negativ gezählt werden, insbesondere wenn es sich um abgeschiedenen und biogenen Kohlenstoff handelt. Aus diesen Gründen lassen die THG-Minderungen in diesen Szenarien zwar alle auf erhebliche Anstrengungen schließen, die genauen Emissionsreduzierungen können jedoch nicht unmittelbar verglichen werden.

Abb. 4-1 zeigt die zeitliche Entwicklung der THG-Emissionen in den verschiedenen Szenarien bis zum Jahr 2050. Wie hier illustrativ dargestellt, lassen sich die betrachteten Szenarien bezüglich ihrer zeitlichen Dimension grob in zwei Kategorien einordnen: Etwa die Hälfte sieht einen relativ linearen Rückgang der Emissionen vor (blauer Wertebereich), was für kontinuierliche Minderungsbemühungen und eine gleichmäßige Skalierung von Dekarbonisierungsoptionen spricht. Für die andere Hälfte der Szenarien (gelber Wertebereich) zeichnet sich hingegen ein eher konkaver Verlauf ab, bei dem die Emissionen zunächst langsamer zurückgehen, ab dem Jahr 2035 oder 2040 dann jedoch sehr stark abfallen. Dies spricht tendenziell für den Einsatz von Sprunginnovationen, welche erst später in großem Maßstab zur Verfügung stehen, dann aber rapide Emissionsminderungen leisten.

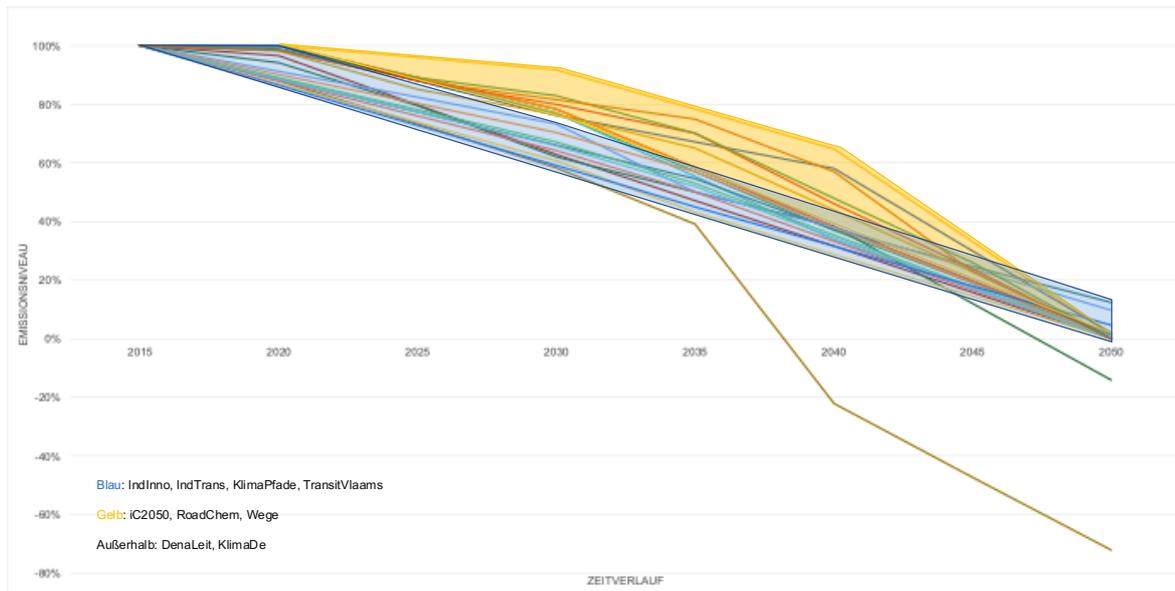


Abb. 4-1 Zeitlicher Verlauf der CO₂- bzw. THG-Emissionen in den betrachteten Szenarien.

Hinweis: Für diese Darstellung wurden nur Szenarien berücksichtigt, die für den zeitlichen Verlauf der Emissionsminderung neben einem Start- und Endpunkt mindestens einen Zwischenschritt ausweisen. Für einige Szenarien wurden weitere Zwischenschritte interpoliert. Für die Szenarien von *Wege* wurde im Einklang mit den anderen Publikationen ein heutiges Emissionsniveau i.H.v. 37 Mt CO₂-Äq unterstellt, da kein Startwert angegeben war. Bei den Szenarien von *KlimaDe*, *DenaLeit* und *iC2050* wurden Restemissionen im Zieljahr mit den dort ausgewiesenen THG-Senken verrechnet.

Was die Entwicklung des Energieverbrauchs betrifft, ist es schwierig, klare Schlussfolgerungen aus dem Vergleich der Szenarien zu ziehen. Die Ergebnisse können in den verschiedenen Szenarien drastisch voneinander abweichen, wobei einige einen deutlichen Anstieg, andere einen Rückgang aufweisen. Die Unterschiede sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass unterschiedliche Definitionen des Energieverbrauchs zugrunde liegen, z. B. welche Prozesse berücksichtigt werden, die Frage, ob es sich um den Primär- oder den Endenergiebedarf handelt, ob Feedstocks einbezogen werden oder nicht und wie die im Zusammenhang mit Wasserstoff oder Synfuels benötigte oder enthaltene Energie berücksichtigt wird. Betrachtet man nur die Endenergieerzeugung, d. h. ohne die Energie für Feedstocks und ohne die Umwandlungsverluste bei der Bereitstellung von Endenergieträgern, so beschreiben fast alle Szenarien einen Rückgang in der Größenordnung von 20 % (*KlimaPfade*) bis 65 % (*DeepDecarb CYC* Szenario exkl. Elektrizität für Wasserstoff; allerdings ein Anstieg von 31 %, wenn Wasserstoffproduktion berücksichtigt wird). Wird die Energie für Feedstocks einbezogen, ergibt sich ein gemischteres Bild. Wird dabei auch der Energiegehalt von Wasserstoff und anderen E-Fuels berücksichtigt, sehen die meisten Szenarien einen Bedarfsrückgang, während die übrigen einen Anstieg in einem weiten Bereich von 0,2 % (*IndInno*) bis 173 % (*Saygin & Gielen*) unterstellen. Die großen Steigerungen werden für die globalen Szenarien angenommen, während die moderaten für die europäischen/deutschen Szenarien gelten. Werden Wasserstoff und E-Fuels in Bezug auf die zu ihrer Erzeugung benötigte Elektrizität berücksichtigt, sagen die meisten Szenarien nach eigenen Berechnungen einen Anstieg des Energiebedarfs in einem breiten Bereich von 1 % (*KlimaDe*) bis 173 % (*Saygin & Gielen*) voraus. Der von den verbleibenden vier Szenarien beschriebene Rückgang liegt in der

Größenordnung von 10 % bis 30 %, wobei jedoch zu beachten ist, dass drei dieser Szenarien alle aus einer Veröffentlichung stammen (*IndTrans*). In den Diskussionen der Roadmaps wird auf eine Reihe von Faktoren hingewiesen, die einen großen Einfluss auf den resultierenden Energiebedarf haben. Einerseits tragen Energieeffizienzmaßnahmen und die Direktelektrifizierung, die in einigen Fällen energieeffizientere Prozesse ermöglicht, zur Verringerung des Gesamtenergiebedarfs bei. Andererseits erfordert die Herstellung von grünem Wasserstoff und anderen E-Treibstoffen große Mengen an Strom.

Was die Entwicklung der Produktionsmengen oder das wertmäßige Wachstum betrifft, so gehen die meisten Szenarien von einer Produktionssteigerung aus, die jedoch stark vom geografischen Geltungsbereich abhängt. Auf globaler Ebene erwarten die entsprechenden Szenarien mindestens eine Verdopplung der Nachfrage bis zum Jahr 2050 (gegenüber dem jeweiligen Referenzjahr), aber auf europäischer und nationaler Ebene sind die Produktionsannahmen uneinheitlich. Es wird davon ausgegangen, dass das globale Nachfragewachstum größtenteils durch eine außereuropäische Produktion gedeckt wird, aber es bleibt offen, inwieweit die europäischen Industrien ihre derzeitigen Produktionsmengen beibehalten oder ebenfalls zu Wachstum in der Lage sein werden. Auf Produktebene kann festgestellt werden, dass die Herstellung von Ammoniak den Szenarien zufolge zumindest regional in Deutschland bzw. Europa eher zurückgehen wird. Das Gleiche gilt für High-Value-Chemicals und spezifisch Ethylen, da auch hier in mehreren Szenarien von einem Rückgang der Produktion ausgegangen wird. Allerdings sind die letztgenannten Zusammenhänge schwieriger für alle Szenarien zu beurteilen, da diese Produkte oft nicht separat ausgewiesen werden. In vier Roadmaps wird die Nachfrage speziell nach Kunststoffen dargestellt, wobei zwei dieser Roadmaps auf weltweiter Basis erstellt wurden und einen drastischen Anstieg aufweisen, während sich die beiden anderen Roadmaps auf Europa und Deutschland beziehen und eine insgesamt stabile Produktion zeigen. Die Annahmen für die Produktionsmengen werden in der Regel innerhalb einer bestimmten Publikation nicht variiert, d. h. die gleiche Annahme wird für alle Szenarien getroffen. Die Ausnahme ist *IndTrans*, wo das Szenario für die Kreislaufwirtschaft einen Rückgang der Produktion (inkl. Recycling) enthält und nicht stabil bleibt wie in den anderen beiden Szenarien.

4.2 Vergleich der Strategien

4.2.1 Beiträge zur Emissionsverringering

Insgesamt gehen die in den Roadmaps genannten Strategien mit den Themen Feedstockwechsel, Elektrizität, erneuerbare Wärme und Dampf, End-of-Pipe-CCS und Effizienzverbesserungen verschiedener Art einher. Tabelle 4-2 enthält quantitative Angaben zu den verfolgten Minderungsstrategien (für diejenigen Roadmaps, die solche Daten vorgelegt haben).

Tab. 4-2 Strategien zur Verringerung der THG-Emissionen nach Anteil.

Hinweis: Die Zahlen sind als Prozentsatz der Emissionen im Bezugsjahr angegeben. Die Kategorie "Wachstumseffekt" steht für die Notwendigkeit einer stärkeren Emissionsreduzierung aufgrund des erwarteten Wachstums der Branche, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben. Emissionsverringerungen sind in Cyan und erhöhte Emissionen in Rot dargestellt. Eine dunklere Farbe entspricht einem größeren absoluten Wert. Gelb wird verwendet, wenn die Strategie erwähnt, aber nicht quantifiziert wird ("nq"). Anmerkungen und Spezifikation der Spalte „Andere“, wie in den Roadmaps genannt: ¹Biomasse, die als Feedstock und nicht als Energieträger genutzt wird, sofern diese Differenzierung möglich war ²Produktion von Chemikalien über CCU- und H₂-Routen, wenn möglich ohne Ammoniak, das in anderen Kategorien dargestellt wird ³Energetische Nutzung erneuerbarer Energiequellen (z.B. Biomasse, Solarthermie, Geothermie), wenn möglich ohne erneuerbaren Strom, der in anderen Kategorien dargestellt wird ⁴Enthalten in Erneuerbare Energien ⁵Verringerung von N₂O-Emissionen ⁶Enthalten in Andere ⁷"Non-IND levers" (z.B. Verhaltensänderungen), "material switch", "tech development", "energy carrier switch" ⁸Enthalten in Elektrifizierung ⁹H₂ for ammonia/urea" ¹⁰Enthält H₂ über Elektrolyse ¹¹Alle biogenen Kohlenstoffentfernungen, d. h. sowohl für Rohstoffe als auch für Energie ¹²Enthalten in Biomasse ¹³Andere „direct emissions“, „upstream“ und „imported building blocks“ ¹⁴H₂-Rohstoffe einschließlich Ammoniak.

Roadmap	Szenario	Reduzierung der Emissionen	Recycling	Biomasse ¹	CCU/H ₂ ²	Elektrifizierung	Emissionsfaktor Elektrizität	Erneuerbare Energien (Nicht-Strom) ³	CCS	Effizienz-Verbesserungen	Andere	Wachstumseffekt	Referenzjahr
Chem-ForCli	Circular & biobased	96 %	8 %	59 %	1 %	0 %	12 %	11 %	0 %	3 %	9 % ⁵	-7 %	2005
	Electrification	96 %	7 %	3 %	58 %	nq ⁴	11 %	9 %	0 %	5 %	9 % ⁵	-7 %	2005
	2030 compliance	96 %	8 %	37 %	1 %	nq ⁴	11 %	11 %	18 %	7 %	9 % ⁵	-7 %	2005
	Direct action	95 %	7 %	28 %	11 %	nq ⁴	11 %	5 %	23 %	7 %	9 % ⁵	-7 %	2005
ScenBel	CORE-95	88 %	nq	nq ⁶	nq ⁶	nq ⁶	nq	nq ⁶	17 %	32 %	36 % ⁷	-1 %	2015
LowCarb	Maximum	206 %	0 %	25 %	145 %	25 %	nq ⁸	nq	0 %	2 %	49 % ⁹	-41 %	2015
IndTrans	Kunststoffe NP	100 %	nq	nq	0 %	nq	nq	nq	0 %	nq	-	-11 %	2015
	Kunststoffe CE	100 %	nq	nq	0 %	nq	nq	nq	0 %	nq	-	-11 %	2015
	Kunststoffe CC	100 %	nq	nq	0 %	nq	nq	nq	34 %	nq	-	-11 %	2015
	Ammoniak NP	100 %	2 %	0 %	-	61 % ¹⁰	nq	nq	0 %	9 %	-	27 %	2015
	Ammoniak CE	100 %	5 %	0 %	-	50 % ¹⁰	nq	nq	0 %	18 %	-	27 %	2015
	Ammoniak CC	95 %	2 %	0 %	-	18 % ¹⁰	nq	nq	39 %	9 %	-	27 %	2015
iC2050	High electrification	100 %	nq	31 % ¹¹	2 %	nq	16 %	nq ¹²	6 %	nq	44 % ¹³	-	2019
	Fostering circularity	100 %	nq	19 % ¹¹	3 %	nq	13 %	nq ¹²	17 %	nq	47 % ¹³	-	2019
	Sustainable biomass	100 %	nq	27 % ¹¹	2 %	nq	13 %	nq ¹²	17 %	nq	41 % ¹³	-	2019
	CO ₂ capture	100 %	nq	31 % ¹¹	0 %	0 %	12 %	nq ¹²	45 %	nq	12 % ¹³	-	2019
Saygin & Gielen	1.5 °C case	100 %	11 %	6 %	25 % ¹⁴	nq	33 %	7 %	68 %	70 %	-	-115 %	2017

Es gibt im Gesamtüberblick über die Szenarien keine eindeutige Präferenz bei den gewählten Strategien, und die Emissionsreduzierungen werden in den Szenarien durch eine Mischung aus Rohstoff- und Energiewende sowie CCS und Effizienzsteigerungen erreicht. Die Strategie mit den größten Beiträgen zur Emissionsminderung variiert von Szenario zu Szenario. Recycling und erneuerbare Energien (Nicht-Elektrizität) sind in den Roadmaps mit entsprechenden Angaben verantwortlich für jeweils maximal 11 % der Emissionsreduktion. Allerdings liefert fast die Hälfte der Szenarien an dieser Stelle keine spezifischen Daten; stattdessen verfassen die Autor*innen qualitative Aussagen über entsprechende Minderungspotenziale. *IndTrans* beispielsweise beschreibt ein großes Potenzial zur Emissionsreduzierung durch "Materialeffizienz und zirkuläre Geschäftsmodelle" und insbesondere "Materialrückführung und -substitution" und argumentiert, dass solche Strategien noch nicht ausreichend erforscht sind.

Die Verwendung von Biomasse spielt in mehreren Szenarien aus verschiedenen Roadmaps eine große Rolle, wobei häufig etwa 30 % der Emissionen durch die Substitution durch Biomasse reduziert werden. In zwei Szenarien aus verschiedenen Roadmaps sticht die CCU-Strategie als die wichtigste Emissionsminderungsstrategie heraus, aber gleichzeitig verzichten mehrere andere Szenarien vollständig auf den Einsatz von CCU oder erreichen nur marginale Emissionsreduzierungen durch diese Strategie.

Bei denjenigen Strategien, die auf die Emissionen aus dem Energiebereich abzielen, ergibt sich ein kombinierter Beitrag von 12 % bis 40 % Emissionsminderung durch die Elektrifizierung von Prozessen zur Vermeidung des Einsatzes fossiler Brennstoffe sowie durch die Dekarbonisierung des Elektrizitätssystems. CCS zeichnet sich als eine Technologie aus, die potenziell einen großen Anteil an der Emissionsreduzierung hat und in mehreren Fällen zur Abscheidung von mehr als 30% und in einem globalen Szenario sogar von 68 % des derzeitigen Emissionsvolumens eingesetzt wird. Teilweise wird diese Strategie in einigen Szenarien jedoch gänzlich vermieden, oder das abgeschiedene CO₂ wird vollständig für CCU-Prozesse genutzt (letztenanntes im *LowCarb*-Szenario). Was Effizienzverbesserungen betrifft, so sind die Emissionsverringerungen in der Regel bescheiden, selten mehr als 10 %, und beziehen sich meist auf die Energieeffizienz, nur in *ScenBel* beziehen sie sich auf die Materialeffizienz. Das Potenzial könnte jedoch weltweit viel höher sein, wie *Saygin & Gielen* zeigen.

Mehrere Roadmaps sehen auch Emissionsreduzierungen in Kategorien, die nicht zu den anderen Strategien passen. So reduziert *ScenBel* 26 % der Emissionen durch "Non-IND levers" (z. B. Verhaltensänderungen). *LowCarb* gibt an, dass 49 % der Emissionsminderungen auf H₂ für Ammoniak/Harnstoff zurückzuführen sind und bei *iC2050* ist ein großer Teil auf die Reduzierung anderer direkter Emissionen sowie auf Emissionen in anderen Teilen der Wertschöpfungskette zurückzuführen. In allen Szenarien mit Ausnahme derjenigen, die sich ausschließlich auf Ammoniak konzentrieren, würde das erwartete Wachstum der chemischen Industrie in einem "Business-as-usual"-Fall zu einem Anstieg der Emissionen beitragen (Wachstumseffekt in Tabelle 4-2). Dieser Effekt variiert auch zwischen den Szenarien stark, selbst wenn nur Szenarien mit demselben geografischen Geltungsbereich betrachtet werden.

Durch einen Szenario-Vergleich für verschiedene geografische Kontexte (d. h. Deutschland, die Niederlande, Belgien, Europa und die Welt), der über die in Tabelle 4-2 dargestellten Daten hinausgeht, können einige Beobachtungen gemacht werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Stichprobe für die Einzelregionen recht begrenzt ist, insbesondere für Belgien und die Niederlande. Beginnend mit Deutschland neigen die Roadmaps eher dazu, CCS für den Chemiesektor zu vermeiden (wenn auch nicht unbedingt für andere Sektoren wie Zement). Während *Wege*, *RoadChem* und *KlimaPfade* alle CCS für die chemische Industrie ausschließen, begründet nur *Wege* diesen Ausschluss eindeutig mit den politischen und ökologischen Risiken der Technologie.

Bei den Roadmaps für die Niederlande fällt auf, dass Effizienzverbesserungen als Teil der Emissionsminderungen weniger diskutiert werden. In zwei der drei Roadmaps werden sie in den Szenarien nicht erwähnt, während ihr Beitrag zur Emissionsminderung in der dritten Roadmap (*ChemForCli*) höchstens 7 % beträgt. Die Roadmaps für die Niederlande enthalten mehrere Szenarien, in denen jeweils eine bestimmte Strategie im Vordergrund steht, und weitere „kombinierte“ Szenarien, die eine Mischung aus den in den anderen Szenarien fokussierten Strategien verwenden.

Die gefundenen belgischen Beispiele entsprechen nicht immer einem Netto-Null-Ziel für die chemische Industrie, die Nettoreduzierung liegt eher bei rund 90 % als bei 100 %. Die Ergebnisse sind auch weniger detailliert und basieren auf direkten Annahmen über das Ausmaß des Einsatzes verschiedener Technologien und nicht umfangreichen Modellierungen.

Bei den internationalen Roadmaps ist es üblicher, die Emissionsminderungsanstrengungen wie in Tabelle 4-2 auf Strategien aufzuteilen. Es sind unterschiedliche Schwerpunkte erkennbar, wobei die Strategien mit den größten Beiträgen von CCU und Wasserstoff über Biomasse bis hin zu CCS und Effizienzsteigerungen reichen. Das globale Szenario von *Saygin & Gielen* zeigt nachdrücklich die potenziell sehr starken Auswirkungen eines deutlichen Anstiegs der weltweiten Produktionsmengen.

4.2.2 Rohstoffe für chemischen Feedstock

Für die Versorgung mit Rohstoffen in einer zukünftigen Netto-Null-Chemieindustrie sind die in den Roadmaps dargestellten Optionen fossiler, recycelter, biobasierter oder abgeschiedener Kohlenstoff sowie zusätzlicher Wasserstoff als stoffliche Basis für Ammoniak und als Energiegehalt in Kohlenwasserstoffen. Das unterschiedliche Ausmaß, in dem diese Quellen in den verschiedenen Szenarien genutzt werden, ist in Tabelle 4-3 dargestellt. In einigen Fällen wird die Herkunft der Rohstoffe nicht spezifiziert und die Rohstoffe werden stattdessen als Zwischenprodukte klassifiziert, d. h. Methanol oder synthetisches Naphtha usw. Diese können auch importiert werden, wobei die Herkunft in den betrachteten Roadmaps dann unbestimmt bleibt.

Die verschiedenen Rohstoffe werden in den betrachteten Szenarien in unterschiedlichem Umfang genutzt, wobei die Streuung auf große Unsicherheiten schließen lässt. Besonders groß ist die Spanne bei der fortgesetzten Nutzung fossiler Rohstoffe und der Nutzung von abgeschiedenem CO₂, während sich die Schätzungen für rezyklierte Rohstoffe und Biomasse weniger stark unterscheiden.

Tab. 4-3 Im Zieljahr eingesetzte Rohstoffe als Anteil an der gesamten Rohstoffbasis.

Hinweis: Die Produkte können zwischen den Roadmaps variieren, sodass die Werte möglicherweise nicht vollständig vergleichbar sind. Bei Roadmaps, in denen das werkstoffliche und das chemische Recycling getrennt aufgeführt sind, wird in dieser Tabelle das werkstoffliche Recycling als erster Wert und das chemische Recycling als zweiter Wert angegeben. Eine dunklere Farbe entspricht einem größeren Anteil. Gelb wird verwendet, wenn die Rohstoffquelle zwar erwähnt, aber nicht quantifiziert wird ("nq"). Die dargestellten Anteile spiegeln nur die in der Roadmap quantifizierten Mengen oder Anteile an Rohstoffen wider. In manchen Roadmaps wurden die konkreten recycelten Anteile nicht quantifiziert, auch in Fällen, in denen Recycling ein Teil des Netto-Null-Szenarios ist.

Roadmap	Szenario	Fossil	Recycling		Biomasse	CO ₂ /H ₂	Veränderung des Einsatzes fossiler Rohstoffe
			mech	chem			
Wege	(All scenarios)	0 %	nq		22 %	78 %	-100 %
RoadChem	Pfad Treibhausgasneutralität 2050	6 %	11 %		28 %	55 %	-92 %
KlimaPfade	Empfohlener Pfad	0 %	18 %	12 %	0 %	70 %	-100 %
DenaLeit	KN 100	19 %	Nq		9 %	72 %	-53 %
Manuel et al.	OPN, CCS, ELE, HYD (HVC)	0 %	0 %		23 %	77 %	-100 %
	BIO (HVC)	0 %	21 %		78 %	0 %	-100 %
TransitVlaams	MIX (HVC)	59 %	22 %		8 %	11 %	-23 %
	VAR1 (HVC)	78 %	22 %		0 %	0 %	1 %
	VAR2 (HVC)	63 %	22 %		4 %	10 %	-18 %
LowCarb	Maximum	4 %	0 %		4 %	92 %	-93 %
IndInno	Mix95	0 %	nq		0 %	100 %	-100 %
IndTrans	Kunststoffe NP	0 %	15 %	47 %	38 %	0 %	-100 %
	Kunststoffe CE	0 %	25 %	38 %	37 %	0 %	-100 %
	Kunststoffe CC	38 %	15 %	14 %	33 %	0 %	-60 %
iC2050	High electrification	60 %	8 %		27 %	5 %	17 %
	Fostering circularity	54 %	19 %		17 %	10 %	-19 %
	Sustainable biomass	53 %	7 %		35 %	5 %	7 %
	CO ₂ capture	88 %	11 %		1 %	0 %	28 %
Meys et al.	Circular carbon pathway	1 %	19 %	25 %	38 %	17 %	nq
Saygin & Gielen	1.5 °C case	36 %	nq		25 %	39 %	nq
PlanPos	LC-NFAX (non-ammonia)	13 %	22 %	9 %	31 %	25 %	nq

Der Anteil von Recyclingmaterial liegt in der Regel zwischen 20 und 35 % des gesamten Einsatzmaterials. *IndTrans* geht jedoch von einem deutlich höheren Anteil von 62 % aus, während *iC2050* und *RoadChem* lediglich Anteile von etwa 10 % annehmen. Darüber hinaus werden recycelte Rohstoffe in der Darstellung der Feedstocks nicht immer berücksichtigt, denn sie sind derzeit nicht Teil der chemischen Industrie – was sich in einem zukünftigen Netto-Null-System ändern dürfte. Feedstocks werden in den Roadmaps mechanisch und chemisch durch Pyrolyse oder Gasifizierung recycelt. Auch das Recycling von Kunststoffabfällen durch Solvolyse oder Auflösung wird manchmal für bestimmte Kunststoffarten erwähnt. Neben den Recyclingtechnologien werden in einigen Roadmaps auch allgemeine Verbesserungen der Materialeffizienz thematisiert, wie z.B. eine Verringerung der Nachfrage, Car-Sharing und andere zirkuläre Geschäftsmodelle, längere Produktlebensdauern, weniger Material oder bessere Recyclingfähigkeit sowie optimierte Trennungen.

Der Anteil der Biomasse an den Feedstocks reicht relativ gleichmäßig von wenigen Prozent bis zu fast 40 %, wobei das BIO-Szenario von *Manuel et al.* mit 76 % einen Ausreißer darstellt. Die am häufigsten erwähnte Technologie für die Nutzung von Biomasse ist die Gasifizierung, aber auch Verfahren auf Ethanolbasis oder Biomethan werden genannt. Gelegentlich wird auch eine Reihe spezifischer Produktionsverfahren genannt, z. B. Bioraffinerien und auf Lignin ausgerichtete Verfahren in *Transit-Vlaams*. In einigen Fällen werden die Ausgangsstoffe spezifiziert, z. B. organische Abfälle und Rückstände aus der Land- oder Forstwirtschaft, in anderen Fällen werden auch Nicht-Reststoffquellen genannt oder die Quelle der Biomasse wird nicht angegeben.

Bei der Nutzung von abgeschiedenem Kohlenstoff in Kombination mit Wasserstoff reichen die Anteile von 0 % bis fast 100 %, und auf der Grundlage der untersuchten Roadmaps kann kein typischer Wert angegeben werden. Deutsche Roadmaps setzen tendenziell stärker auf diese Strategie, ebenso wie die in Deutschland erstellten europäischen Roadmaps *LowCarb* und *IndInno*. Der abgeschiedene Kohlenstoff kann aus industriellen Punktquellen stammen und entweder fossilen oder biogenen Ursprungs sein, oder er kann aus der Luft abgeschieden werden. Wenn Angaben gemacht werden, wird häufig davon ausgegangen, dass der Kohlenstoff durch DAC oder aus Industrien mit unvermeidbaren oder nicht-fossilen Emissionen, z. B. Zement und Kalk, Müllverbrennungsanlagen oder Biomassequellen gewonnen wird.

Mehrere Roadmaps stützen sich auch auf importierte Zwischenprodukte wie Methanol und grünes Naphtha, so dass die Kohlenstoffabscheidung, die Herstellung von Wasserstoff und die ersten Verarbeitungsschritte in einem anderen Land stattfinden. In diesen Fällen wird der Produktionsweg oder die Quelle des Kohlenstoffs oft nicht angegeben, obwohl DAC vermutet werden kann. Es ist nicht klar oder noch nicht festgelegt, wie diese potenziell vermiedenen Emissionen verbucht werden sollen, z. B. welcher Industriezweig oder welches Land die Kohlenstoffgutschrift erhält, wenn es nicht mit dem Land identisch ist, in dem der Kohlenstoff verwendet wird.

Auch der Anteil fossiler Feedstocks an der Nutzung ist in den Szenarien sehr unterschiedlich. Fossile Feedstocks werden in vielen Szenarien auch im Zieljahr weiterhin verwendet und deren Anteil reicht von wenigen Prozent in *Meys et al.* und *LowCarb* bis zu 88 % in *iC2050*. Mehrere Roadmaps vermeiden jedoch auch ausdrücklich fos-

sile Feedstocks und zielen auf eine vollständige Defossilisierung sowie Kohlenstoffneutralität ab, insbesondere Roadmaps, die im deutschen Kontext erstellt wurden. Es ist anzumerken, dass das Erreichen von Netto-Null-Emissionen aus der Lebenszyklus-Perspektive möglicherweise nicht realisierbar ist, wenn große Anteile an fossilen Rohstoffen verbleiben. Keiner der beiden Roadmaps, die einen Anteil von mehr als 50 % an fossilen Feedstocks aufweisen, d. h. *TransitVlaams* und *iC2050*, beziehen die Emissionen am Ende des Lebenszyklus in ihren jeweiligen Betrachtungsbereich ein. Es ist jedoch möglich, dass fossile Feedstocks auch unter Berücksichtigung der End-of-Life-Emissionen erhebliche Anteile einnehmen, wie dies bei *IndTrans* (36 % fossil) und *Saygin & Gielen* (38 % fossil) der Fall ist. In diesen Szenarien wird die Nutzung fossiler Feedstocks durch einen erheblichen Einsatz von CCS kompensiert. Auch wenn der Anteil der fossilen Feedstocks deutlich zurückgeht, kann der Gesamtverbrauch in einigen Szenarien aufgrund einer höheren Produktion stagnieren oder sogar steigen. Letztgenanntes passiert in drei der vier Szenarien von *iC2050*. Die Nutzung fossiler Feedstocks steigt dort zwischen 7 % und 28 %. Im VAR1-Szenario von *TransitVlaams* bleibt die Nutzung in etwa konstant.

Angesichts der Dringlichkeit der Emissionsminderung stellt sich die wichtige Frage, wann die benötigten Technologien verfügbar sein werden. In den Roadmaps werden in der Regel Hinweise darauf gegeben, wann die Technologien zum Einsatz kommen, wobei diese Schätzungen deutlich variieren. Zu den besonders wichtigen Gruppen von Technologien gehören biobasierte Verfahren, CCUS-Anwendungen, chemisches Recycling und neue Produktionsverfahren (einschließlich elektrischem Steamcracking, MtO/MtA und Ammoniak aus erneuerbarem Wasserstoff).

Der Einsatz biobasierter Routen zur Herstellung chemischer Grundstoffe wird in den betrachteten Szenarien tendenziell erst ab den 2030er-Jahren angenommen, wenngleich Anwendungsfelder im Bereich Gasifizierung und Bio-Kohlenwasserstoffe von zwei unterschiedlichen Publikationen auch schon vorher gesehen werden.

Kategorie	Technologie	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biobasierte Routen	Gasifizierung von Biomasse		◆					
	Biobasierte Kohlenwasserstoffe		◆		◆			
	Bio-Naphtha			◆				
	Bio-BTX				◆			
	Bio-Methanol				◆			
	Bio-HVC			◆	◆◆			

Abb. 4-2 Verfügbarkeit biobasierter Routen in den betrachteten Szenarien.

Hinweis: Ein schwarzes Symbol auf grünem Hintergrund markiert jeweils den erstmaligen Einsatz in einer Publikation.

CCUS-Technologien und insbesondere die Abscheidung und geologische Speicherung wird in den betrachteten Szenarien bereits in wenigen Jahren unterstellt, vier Publikationen gehen von einem Einsatz ab 2025 und weitere vier von einem Einsatz ab 2030 aus. Die früheren Angaben gelten häufig für Punktquellen mit hohen CO₂-Konzentrationen und die späteren für Quellen mit niedrigeren Konzentrationen im Rauchgas. Die zeitlichen Einschätzungen hinsichtlich Power-to-X basierter Feedstocks gehen hingegen weit auseinander. Synthetisches Methanol wird hier von verschiedenen Publikationen deutlich früher gesehen als synthetisches Naphtha.

Kategorie	Technologie	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CCUS	CCS		◆◆◆◆	◆◆◆◆	◆			
	PtX Methanol		◆	◆	◆			
	PtX Naphtha				◆	◆		

Abb. 4-3 Verfügbarkeit von CCUS-Technologien in den betrachteten Szenarien.

Hinweis: Ein schwarzes Symbol auf grünem Hintergrund markiert jeweils den erstmaligen Einsatz in einer Publikation.

Die zeitlichen Einschätzungen zum Einstieg ins chemische Recycling im Allgemeinen sowie hinsichtlich spezifischer Technologien liegen überwiegend in den 2030er-Jahren, mit lediglich zwei Ausreißern in beide Richtungen.

Kategorie	Technologie	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Chem. Recycling	Chemisches Recycling (allgemein)		◆	◆◆◆	◆			
	Katalytisches Cracken von Plastikabfall			◆	◆			
	Solvolyse			◆	◆		◆	
	Pyrolyse			◆				

Abb. 4-4 Verfügbarkeit von chemischem Recycling in den betrachteten Szenarien.

Hinweis: Ein schwarzes Symbol auf grünem Hintergrund markiert jeweils den erstmaligen Einsatz in einer Publikation.

Neue Produktionsverfahren zur Herstellung von Olefinen und Aromaten wie elektrisch betriebene Steamcracker oder methanolbasierte Routen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle in den meisten betrachteten Szenarien. Eine Elektrifizierung von Steamcrackern wird frühestens im Jahr 2030, tendenziell etwas später, gesehen. Die Produktion von Olefinen und Aromaten auf Basis von synthetischem Methanol (Methanol-to-Olefins, MtO bzw. Methanol-to-Aromatics, MtA) wird zeitlich sehr unterschiedlich eingeschätzt, wobei die MtO-Route generell häufiger genannt und tendenziell für die 2030er-Jahre gesehen wird.

Kategorie	Technologie	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Neue Prozesse	Elektrisches Steamcracking			◆◆	◆◆◆◆			
	Methanol-to-Olefins	◆		◆◆	◆◆◆	◆		
	Methanol-to-Aromatics		◆		◆			
	Methanol-to-X		◆					
	PtX Ammoniak		◆				◆◆	

Abb. 4-5 Verfügbarkeit neuer Produktionsprozesse in den betrachteten Szenarien.

Hinweis: Ein schwarzes Symbol auf grünem Hintergrund markiert jeweils den erstmaligen Einsatz in einer Publikation.

4.2.3 Energieträger

Tabelle 4-4 zeigt die im Zieljahr für Wärme- und Stromerzeugung eingesetzten Energieträger für verschiedene Szenarien. Diese werden in der betrachteten Literatur zumindest teilweise von fossilen Quellen auf hauptsächlich Elektrizität verlagert. So deckt Strom im Zieljahr in den meisten Szenarien 60 % oder mehr des Energiebedarfs. Der Strom wird dann zum Beispiel in Elektrokesseln, elektrischen Steamcrackern oder Wärmepumpen genutzt. Als Ergänzung und je nach Temperaturbedarf werden auch andere Energiequellen eingesetzt. Dabei handelt es sich in der Regel um einen Mix aus z. B. Biomasse, Biogas, Wasserstoff oder anderen Energieträgern, die jeweils etwa 10-20 % des gesamten Energiebedarfs decken. Zu den „anderen Energieträgern“ gehören vor allem Fernwärme, Umgebungswärme oder auch synthetisches Methan. Für energetische Zwecke werden synthetische Brennstoffe jedoch oft nicht verwendet oder spielen nur eine untergeordnete Rolle (etwa maximal 10 %). Ein großer Teil des Endenergiebedarfs liegt in Form von Dampf vor, der in Heizkesseln erzeugt wird. Abgesehen von Elektrokesseln können diese auch mit Biomasse, Wasserstoff oder synthetischen Brennstoffen befeuert werden. *KlimaDe* und *Transit-Vlaams* nehmen an, dass diese Kessel zukünftig flexibel betrieben werden und sowohl Wasserstoff als auch Synthesegas aufnehmen können, je nachdem, wie sich die Infrastruktur entwickelt.

Tab. 4-4 Eingesetzte Energiequellen als Anteile am Gesamtenergieverbrauch, exklusive der Energie für Feedstocks.

Hinweis: Eine dunklere Farbe entspricht einem größeren Anteil. Gelb wird verwendet, wenn der Energieträger erwähnt, aber nicht quantifiziert wird ("nq"), und "nm" bedeutet, dass die Strategie nicht erwähnt wird. Die Energie von Wasserstoff und Synthesekraftstoff kann entweder als Energiegehalt des Kraftstoffs ("C") oder als Energie in Form von Elektrizität ("E"), die zur Herstellung des Kraftstoffs benötigt wird, quantifiziert werden, was je nach Roadmap unterschiedlich ist (s. Spalte „Hinweis“). Anmerkung zu iC2050: ¹H₂ bezieht sich auf Wasserstoff, der außerhalb des Chemiesektors erzeugt wird und als Energieinhalt gezählt wird, während Strom, der für die Wasserstofferzeugung innerhalb des Chemiesektors angenommen wird, als Elektrizität gezählt wird.

Roadmap	Szenario	Fossil	Abfall-Material	Biomasse	H ₂	Elektrizität	Sonstiges/Nicht trennbar	Hinweis
Wege	GreenEe1	0 %	nq	0 %	nq	74 %	26 %	C
	GreenLate	0 %	nq	0 %	nq	82 %	18 %	C
KlimaPfade	Vorgeschlagener Pfad	0 %	2 %	11 %	2 %	76 %	8 %	C
KlimaDe	KN2045	0 %	0 %	37 %	5 %	53 %	5 %	C
DenaLeit	KN100	5 %	0 %	17 %	16 %	50 %	12 %	C
DeepDecarb	BIO	21 %	7 %	7 %	nq	64 %	nq	E
	CYC	5 %	nq	0 %	nq	80 %	15 %	E
TransitVlaams	VAR1	28 %	0 %	1 %	0 %	67 %	4 %	?
	VAR2	43 %	0 %	12 %	0 %	37 %	7 %	?
ScenBel	CORE-95	nq	nq	nq	nq	50 %	-	-
IndInno	Mix95	2 %	0 %	3 %	0 %	73 %	22 %	C
iC2050	High electrification	12 %	nm	0 %	nq	88 %	nm	Beide ¹
	Fostering circularity	9 %	nm	1 %	36 %	55 %	nm	Beide ¹
	Sustainable biomass	10 %	nm	2 %	34 %	54 %	nm	Beide ¹
	CO ₂ capture	19 %	nm	41 %	9 %	31 %	nm	Beide ¹
Saygin & Gielen	1.5 °C case	24 %	nq	28 %	19 %	20 %	9 %	C

Der Energieeinsatz in der chemischen Industrie erfolgt auch in Form von Feedstocks, weshalb in einigen Roadmaps stattdessen der Gesamtenergiebedarf einschließlich der Feedstocks angegeben wird, wie in Tabelle 4-5 dargestellt. Dies zeigt ein gemischteres Bild, das sowohl die stärkere Rolle der Elektrizität als auch die Verwendung einer Vielzahl von Feedstocks, wie oben beschrieben, widerspiegelt. Insgesamt liegt der Schwerpunkt bei der Energieversorgung entweder auf Elektrizität, Wasserstoff oder synthetischen Brennstoffen, während Biomasse in den meisten Veröffentlichungen mit 10 bis 30 % und in einem Szenario sogar mit 87 % ebenfalls eine wichtige Rolle spielt. *IndTrans* sticht mit einem Fokus auf Altkunststoffen erneut hervor.

Tab. 4-5 Eingesetzte Energiequellen als Anteile am Gesamtenergieverbrauch, inklusive der Energie für Feedstocks.

Hinweis: Eine dunklere Farbe entspricht einem größeren Anteil. Gelb wird verwendet, wenn der Energieträger erwähnt, aber nicht quantifiziert wird ("nq"), und "nm" bedeutet, dass die Strategie nicht erwähnt wird. Die Energie von Wasserstoff und Synthesekraftstoff kann entweder als Energiegehalt des Kraftstoffs ("C") oder als Energie in Form von Elektrizität ("E"), die zur Herstellung des Kraftstoffs benötigt wird, quantifiziert werden. Anmerkung: ¹Die Energie für Wasserstoff ist in Elektrizität enthalten.

Roadmap	Szenario	Fossil	Abfall-Material	Biomasse	H ₂	Elektrizität	Sonstiges/Nicht trennbar	Hinweis
Wege	GreenEe1	0 %	nq	15 %	nq	22 %	63 %	C
	GreenLate	0 %	nq	14 %	nq	30 %	56 %	C
RoadChem	Pfad Treibhausgasneutralität 2050	2 %	2 %	11 %	nq	81 %	3 %	E
KlimaDe	KN2045	0 %	24 %	14 %	(15 %) ¹	61 %	1 %	E
Manuel et al.	OPN (HVC)	4 %	0 %	12 %	0 %	3 %	81 %	C
	BIO (HVC)	4 %	0 %	87 %	0 %	3 %	6 %	C
	CCS (HVC)	4 %	0 %	12 %	0 %	3 %	81 %	C
	ELE (HVC)	0 %	0 %	13 %	0 %	25 %	62 %	C
	HYD (HVC)	0 %	0 %	13 %	24 %	3 %	60 %	C
LowCarb	Maximum	3 %	0 %	7 %	Nq	90 %	nq	E
IndInno	Mix95	2 %	0 %	2 %	53 %	34 %	10 %	C
IndTrans	Kunststoffe NP	0 %	45 %	29 %	nq	29 %	nm	E
	Kunststoffe CE	0 %	46 %	29 %	nq	26 %	nm	E
	Kunststoffe CC	33 %	20 %	22 %	nq	26 %	nm	E
Meys et al.	Circular carbon pathway	0 %	nq	35 %	nq	65 %	nm	E
Saygin & Gielen	1.5 °C case	29 %	nq	27 %	29 %	10 %	5 %	C
PlanPos	LC-NFAX	8 %	16 %		62 %	11 %	-	C

Die Art der Bilanzierung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen kann starke Auswirkungen auf den in den Szenarien ausgewiesenen Energiebedarf haben. In den Roadmaps werden diese Energieträger manchmal in Form des Energiegehalts des Kraftstoffs (in der Tabelle mit "C" gekennzeichnet) und manchmal in Form des Strombedarfs zu ihrer Herstellung (mit "E" gekennzeichnet) dargestellt. Wird die Energie in Form des für die Produktion benötigten Stroms angegeben, kann der Energiebedarf der chemischen Industrie deutlich ansteigen, was wiederum die große Abhängigkeit von erneuerbarem Strom verdeutlicht. Da jedoch häufig davon ausgegangen wird, dass synthetische Brennstoffe und manchmal auch Wasserstoff importiert werden, könnten große Teile der Stromerzeugung im Ausland benötigt werden. Die angenommenen Importe bedeuten auch, dass ein internationaler Markt oder bilaterale Abkommen erforderlich sind, um diese Energieformen für die heimische chemische Industrie bereitstellen zu können.

Fossile Energieträger sind in mehreren Szenarien immer noch eine wichtige Energiequelle. *DeepDecarb*, *TransitVlaams*, *iC2050*, *IndTrans* und *Saygin & Gielen* enthalten alle Szenarien, in denen sie mehr als 10 % des Energie- oder Energie- und Rohstoffverbrauchs ausmachen. Der höchste Anteil ist im Szenario *TransitVlaams VAR2* mit einem Anteil von 43 % am Endenergieverbrauch zu finden.

4.3 Herausforderungen, Chancen und politische Empfehlungen

In den Roadmaps über die industrielle Defossilisierung werden Herausforderungen und Chancen sowie die oben beschriebenen technologischen Fragen identifiziert und diskutiert. Hier werden Teile dieser Diskussion in Form von Herausforderungen, Chancen und politischen Empfehlungen festgehalten.

4.3.1 Herausforderungen

Die großen Themen in der Diskussion um die Herausforderungen drehen sich erstens darum, die nicht-fossilen Alternativen überhaupt verfügbar zu machen. Dies gilt beispielsweise für erneuerbare Energie und Feedstocks sowie für die erforderliche Infrastruktur. Zweitens dreht sich die Diskussion um den „Business Case“, d. h. um die Wettbewerbsfähigkeit der nicht-fossilen Lösungen. Die relativ hohen Energie- und Ressourcenkosten dieser Lösungen sind dabei eine Frage, aber auch die erforderlichen Investitionen und die wirtschaftlichen Risiken, die mit der Unsicherheit bezüglich künftiger Preise, Märkte und politischer Rahmenbedingungen verbunden sind. Dies ist in der Wortwolke in Abb. 4-6 zu erkennen, die einige der Schlüsselwörter enthält, die in den betrachteten Studien in der Diskussion über Herausforderungen häufig vorkommen. In der Wortwolke finden sich auch Begriffe, die auf die Herausforderungen in Bezug auf die öffentliche Akzeptanz von CCS sowie auf den Umfang und die erforderliche Geschwindigkeit der Transformation verweisen.

Was die Optionen für Feedstocks angeht, so sind diese den Roadmaps zufolge alle mit besonderen Herausforderungen verbunden: So gehören zu den häufig genannten Schwierigkeiten bei recycelten Rohstoffen der Zugang zu geeigneten Abfallressourcen, der hohe Energiebedarf sowie eine begrenzte wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit im derzeitigen Marktumfeld. Bei der Verwendung von Biomasse ist den Studien zufolge ein Hauptproblem die begrenzte Verfügbarkeit und die hohe Nutzungskonkurrenz bei nachhaltiger Biomasse. Für Prozesse, die abgeschiedenes CO₂ nutzen, ist der Bedarf an zusätzlicher Energie in Form von Wasserstoff und der damit einhergehende Bedarf an großen Mengen erschwinglichen erneuerbaren Stroms eine große Herausforderung. Darüber hinaus bedarf es einer CO₂- und Wasserstoffinfrastruktur und die Abscheidungstechnologien müssen weiterentwickelt und zugebaut werden. Strategien, die teilweise nur indirekt mit den Feedstocks verbunden sind, stehen ebenfalls vor Herausforderungen, wie z. B. die öffentliche Akzeptanz von CCS, der stark beschleunigte Ausbau erneuerbarer Energien und die Technologieentwicklung für die Elektrifizierung.

struktur sollte vorzugsweise mit der Biomassestrategie und der Wasserstoffinfrastruktur koordiniert werden. Schließlich erfordern mehrere der Strategien die Weiterentwicklung von Technologien, insbesondere durch die Errichtung und Erprobung von Demonstrationsanlagen, das Sammeln von Betriebserfahrung und ein „Scale-up“, um die Marktreife zu erreichen. Bei denjenigen Technologien, die sich noch nicht in großem Maßstab bewährt haben, besteht zudem eine gewisse Unsicherheit, ob sie in Zukunft überhaupt wie beabsichtigt funktionieren und rentabel betrieben werden können.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die hohen Investitionen, die erforderlich sind, um die derzeitigen industriellen Prozesse zu ersetzen oder umzurüsten, teilweise nicht modulierbar sind. Die Realisierung dieser Investitionen erfordern daher eine Gewissheit und Zusicherung der künftigen Rentabilität, die derzeit nicht gegeben ist. Wenn sich diese Investitionen verzögern, besteht gleichzeitig die Gefahr, dass Investitionen in den kommenden Jahren weiterhin in Anlagen zur Nutzung fossiler Brennstoffe getätigt werden und langfristig „verloren“ gehen (fossile lock-in-Effekte und „stranded assets“). So weisen *IndTrans* und *PlanPos* darauf hin, dass die als notwendig erachteten Investitionen in neue Technologien und Infrastrukturen Koordination, Risikoteilung und andere Formen öffentlicher Investitionen und Unterstützung erfordern. Alle Herausforderungen werden durch die Dringlichkeit und Geschwindigkeit, die für eine erfolgreiche Defossilisierung bis 2050 erforderlich sind, verstärkt.

4.3.2 Chancen

Trotz einer stärkeren Fokussierung auf die Herausforderungen und deren Bewältigung wird in den untersuchten Studien in mehreren Fällen auch auf die Chancen und Synergien hingewiesen, die sich aus der Defossilisierung der chemischen Industrie ergeben. Einige der in diesem Zusammenhang genannten Stichworte sind in Abb. 4-7 dargestellt. Eine zügige Transformation wird in diesem Zusammenhang für Regionen, Länder und Unternehmen als eine Möglichkeit beschrieben, eine neue grüne Wirtschaft anzuführen und die Vorteile zu nutzen, die sich aus einer Vorreiterrolle ergeben. Ein weiteres Thema, das sich in Hinblick auf Chancen identifizieren lässt, sind Synergien, zum Beispiel in Bezug auf Effizienz, Energiesystemdienstleistungen oder andere (über eine CO₂-Reduktion hinausgehende) ökologische Vorteile.

Wenn eine Region oder ein Sektor den Weg zu Netto-Null-Emissionen einschlägt, können sich den betrachteten Studien zufolge Vorteile aus dieser Vorreiterposition ergeben. So demonstrieren entsprechende Schritte Verantwortung, zeigen Lösungen auf und rücken den Sektor oder die Region auf diese Weise in ein positives Licht. *PlanPos* hebt diesen Aspekt besonders hervor, indem dort auf die Bedeutung der Kunststoffindustrie für die Einhaltung mehrerer planetarischer Grenzen hingewiesen wird und betont wird, dass sie durch ihr Engagement für netto-negative Lösungen gegenüber der Gesellschaft eine Erneuerung ihrer Betriebserlaubnis („*license to operate*“) rechtfertigen kann. Ein Vorreiter zu sein bringt auch zusätzliche strategische Vorteile mit sich: z. B. die Möglichkeit zu steuern, welche Technologien eingeführt werden, einen Wettbewerbsvorteil bei dem Einsatz bestimmter Technologien zu erlangen, frühzeitige Investitionen und Fachkräfte anzuziehen, Arbeitsplätze zu schaffen, sowie Zugang zu Fördermitteln zu erhalten.

Abgesehen von der bereits erwähnten Synergie mit der chemischen Industrie, die z. B. durch eine zeitlich flexible Produktion von Wasserstoff für einen Netzausgleich im Energiesystem sorgen kann, werden in einigen Roadmaps auch andere Synergien genannt. So führt *IndTrans* beispielsweise Vorteile an, die sich aus der Materialeffizienz ergeben, wie z. B. ein geringerer Ressourcenbedarf, was zu Kosteneinsparungen und einem verminderten Investitionsbedarf führen kann, sowie weitere Vorteile aufgrund weniger externer Effekte. *Wege*, das auf eine Begrenzung der Biomassenutzung abzielt, hebt insbesondere Synergien mit Umweltaspekten wie der biologischen Vielfalt hervor, und *DeepDecarb* erwähnt die mit der Transformation einhergehende Verbesserung der Luftqualität. Zwei Roadmaps, *DeepDecarb* und *PlanPos*, weisen auch auf die Möglichkeit hin, die chemische Industrie von einem Nettoemittenten zu einem Klimaschützer zu machen, indem sie durch den Einsatz von DACCS oder BECCS netto-negative Emissionen erzeugt.

4.3.3 Politische Empfehlungen

Um die Herausforderungen zu bewältigen und die vorhandenen Chancen zu nutzen, werden in den betrachteten Studien Empfehlungen an die Regierungen und politischen Entscheidungsträger ausgesprochen. Diese drehen sich häufig um Themen wie Investitionen und wirtschaftliche Unterstützung, robuste und ermöglichende rechtliche Rahmenbedingungen sowie den Ausbau erneuerbarer Energien und der Infrastruktur. Die Wordcloud in Abb. 4-8 zeigt auch Nennungen, die sich auf Innovation, Technologieentwicklung und Umsetzung beziehen.

Märkten zugunsten einer kohlenstoffarmen Produktion zu verschieben. Vorgeschlagen werden in den Studien verschiedene Formen der Finanzierung und staatliche Unterstützung für Investitionen in noch unrentable Technologien. Es brauche dafür flexiblere Regeln für die staatliche Unterstützung kohlenstoffarmer Technologien, einschließlich einer Änderung der Vorschriften für staatliche Beihilfen, um eine stärker zielgerichtete Unterstützung zu ermöglichen. Grüne Leitmärkte, z. B. in Form von Materialquoten und öffentlicher Beschaffung, sind ein weiteres in den Studien genanntes Instrument, um eine Nachfrage nach kohlenstoffarmen Produkten zu schaffen, bevor diese vollständig mit konventionell hergestellten Produkten konkurrieren können. Carbon Contracts for Difference (CCfD) werden ebenfalls vorgeschlagen und in den deutschen Roadmaps häufiger erwähnt.

Während für kohlenstoffarme Technologien günstigere Bedingungen geschaffen werden sollen, zielen andere politische Empfehlungen darauf ab, schädliche Aktivitäten weniger wirtschaftlich zu machen. Einige schlagen eine Verschärfung des EU-Emissionshandelssystems vor, und dass Industrien, die derzeit nicht in das EU-Emissionshandelssystem einbezogen sind, in das System aufgenommen werden. In einigen Roadmaps wird insbesondere auf die Einbeziehung von Emissionen aus der Abfallverbrennung hingewiesen, zumindest sobald Technologien zur Kohlenstoffabscheidung für solche Anlagen kommerziell verfügbar sind. Die Stilllegung alter oder besonders emissions- oder energieintensiver Anlagen wird ebenfalls in mehreren Roadmaps vorgeschlagen. Während auf weltweit gleiche Wettbewerbsbedingungen und internationale Koordinierung hingearbeitet wird, werden Wege vorgeschlagen, um die Wettbewerbsfähigkeit in Vorreiter-Regionen auch in Ermangelung solcher Bedingungen sicherzustellen. *KlimaPfade* empfiehlt in diesem Zusammenhang, dass die derzeitige kostenlose Zuteilung von Emissionszertifikaten für bestimmte Industriezweige beibehalten werden sollte, um die Verlagerung von CO₂-Emissionen zu vermeiden.

Es gibt den betrachteten Studien zufolge weitere rechtliche Hürden, die im Weg stehen können. Dazu zählen die Regeln für den grenzüberschreitenden Handel mit Abfällen, die nach Ansicht von *IndTrans* geändert werden könnten, um die Verwendung von Abfällen als Ausgangsmaterial zu erleichtern. Gleichzeitig weisen *DenaLeit* und *PlanPos* darauf hin, dass die Ausfuhr von Abfällen in andere Länder verboten oder eingeschränkt werden sollte, um zu verhindern, dass sie dort nicht ordnungsgemäß behandelt werden. Der Schwerpunkt der Empfehlungen in den Studien liegt auf dem Einsatz der Kreislaufwirtschaft und der Verwendung von Abfallstoffen als Ausgangsmaterial, z. B. durch erhöhte Recyclingziele. Für diese wie auch für andere Strategien wird in den Roadmaps auf die Notwendigkeit von Definitionen und Rahmenvorschriften hingewiesen, z. B. Definitionen von Kunststoffsorten, die Berücksichtigung von in Produkten gespeichertem Kohlenstoff und die Frage, ob, wann und wie Biomasse verwendet werden sollte.

5 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse

Die in der vorliegenden Arbeit vorgenommene Analyse verschiedener vorliegender Studien zeigt ein sehr unterschiedliches Bild davon, wie Netto-Null Emissionen in der chemischen Industrie erreicht werden können. Sie zeigt auch eine sehr große Anzahl von Unsicherheiten, die mit einem solchen Wandel verbunden sind. Im Folgenden wird ausführlicher erörtert, wie dies zu interpretieren ist und es werden Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise im Hinblick auf die Entwicklung von Transition-Strategien gezogen. Zuvor werden jedoch wesentliche Gemeinsamkeiten zwischen den Roadmaps aufgezeigt und herausgearbeitet, welche Übereinstimmungen es trotz der vielen Unterschiede gibt. Zum Abschluss des Kapitels werden einige aktuelle Entwicklungen auf politischer Ebene zusammengefasst, die sich auf die in den Roadmaps angesprochenen Themen und Empfehlungen beziehen.

5.1 Wesentliche Gemeinsamkeiten der Studien

Die Gemeinsamkeiten, die zwischen den verschiedenen Roadmaps festgestellt werden können, sind größtenteils übergeordneter Natur. Sie betreffen das Gesamtbild in Bezug auf mögliche Strategien, den Zeitrahmen und die allgemeinen Herausforderungen. Darüber hinaus geht aus den meisten Roadmaps die Notwendigkeit hervor, mehr Strom aus erneuerbaren Energien zu erzeugen, und die deutschen Roadmaps weisen einige weitere Gemeinsamkeiten auf. Wenn mehrere Roadmaps in die gleiche Richtung weisen, können diese Aspekte als (relativ) „robuste“ Elemente angesehen werden. Ein Wissen über solche Elemente kann der Politik helfen, zeitnah angemessene Rahmenbedingungen für die Defossilisierung der chemischen Industrie umzusetzen. Einige wichtige Aspekte fehlen jedoch weitgehend in den betrachteten Roadmaps, auf die im Folgenden ebenfalls hingewiesen werden soll.

5.1.1 Technologien und Zeitpläne

Es gibt eine breite Palette an strategischen Optionen für die chemische Industrie, die in den meisten Roadmaps genannt werden. Dabei handelt es sich in Bezug auf die Feedstocks, wie oben dargelegt, um recycelte Kunststoffe, Feedstock aus Biomasse und CO₂-basierte Feedstocks. In Bezug auf den Energiebedarf der chemischen Industrie ist die wichtigste Option die Elektrifizierung. In einigen Fällen spielen fossile Rohstoffe in diesen Zukunftsszenarien auch Mitte des Jahrhunderts immer noch eine Rolle, aber neuen Rohstoffen (eine Kombination aus Abfall, Biomasse und CO₂) wird stets eine deutlich größere Bedeutung beigemessen als es heute der Fall ist. Darüber hinaus können CCS und verschiedene Arten von Effizienzsteigerungen eine ergänzende Rolle spielen.

Bei den für die chemische Industrie zentralen Strategien für eine erfolgreiche Transformation werden in den betrachteten Studien einige Schlüsseltechnologien häufig genannt, vor allem die Gasifizierung von Abfällen und Biomasse, die Pyrolyse von Kunststoffabfällen, die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft, die Wasserelektrolyse für Wasserstoff, sowie elektrifizierte Kessel und elektrifizierte Steamcracker. Wichtige wiederkehrende Technologien zur Verarbeitung der Ausgangsstoffe sind außerdem das MtO/MtA- und das Fischer-Tropsch-Verfahren für Methanol bzw. synthetisches Naphtha. Während diese Strategien und Technologien eine Art Konsens in Bezug auf die verfügbaren Optionen widerspiegeln, besteht noch immer keine

Übereinstimmung darüber, welche dieser Optionen zu bevorzugen und (in welchem Umfang) anzuwenden sind. Die Roadmaps deuten jedoch stark darauf hin, dass höchstwahrscheinlich eine Kombination dieser Optionen zum Einsatz kommen wird, so dass die Notwendigkeit dieser Technologien als robust angesehen werden kann. Es gibt eine große Zahl weiterer Technologien, die nur in einzelnen Studien erwähnt werden und über deren zukünftige Bedeutung offenbar kein breiter Konsens herrscht, z. B. das chemische Recycling durch Dissolution oder Solvolyse. Die Roadmaps konzentrieren sich in der Regel auf Technologien mit einem relativ hohen gegenwärtigen Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL), und obwohl manchmal Technologien mit relativ niedrigem TRL erwähnt werden, spielen diese in der Regel keine Rolle in den Szenarien (z. B. die direkte elektrokatalytische Umwandlung für Ammoniak oder Ethylen, photokatalytische Verfahren für Wasserstoff oder die künstliche Photosynthese, die in *LowCarb* und *IndInno* erwähnt werden).

Auch ein grober Zeitplan für die Minderung von Emissionen und die Einführung verschiedener Technologien kann aus den betrachteten Studien abgeleitet werden. Die meisten Szenarien beschreiben zunächst nur eine moderate Emissionsreduzierung bis 2030, hauptsächlich durch verringerte Emissionen aus dem Energiebereich. Es wird angenommen, dass erst anschließend die Technologien und Strukturen für eine Verlagerung der Feedstocks vorhanden sind. In den kommenden Jahren müssen also die neuen Technologien zur Verwertung alternativer Feedstocks weiterentwickelt werden, damit sie ab Beginn der 2030er Jahre Marktreife erlangen. Hierfür braucht es die richtigen Rahmenbedingungen. Die Roadmaps setzen voraus, dass insbesondere zwischen 2030 und 2050 neue Technologien und die entsprechenden Infrastrukturen, Märkte und Wertschöpfungsketten sehr schnell aufgebaut werden, was zu einer beschleunigten Emissionsreduzierung führt.

Gleichzeitig wird allerdings in den Studien unterschiedlich eingeschätzt, wann genau diese verschiedenen Technologien zum Einsatz kommen werden, was viel Raum für Unsicherheiten lässt. Kurzfristig könnten die unterschiedlichen Zeitpläne für die Markteinführung verschiedener neuer Technologien den Verlauf der Transformation erheblich verändern. Die Entscheidungen, die in den kommenden Jahren getroffen werden, sind daher von größter Bedeutung. Das laufende Jahrzehnt ist daher entscheidend. Was die mittelfristigen Veränderungen bei den Feedstocks angeht, so hat sich in den USA die Ethylenproduktion bereits von Naphtha auf Ethan verlagert, was durch die Förderung von Schiefergas möglich geworden ist (Kim & Oh, 2020; Michot Foss et al., 2021). In den Roadmaps ist eine solche kurzfristige Umstellung auf andere fossile Rohstoffe nicht vorgesehen. In den Roadmaps wird nur selten auf mögliche zukünftige Veränderungen der Nachfrage auf Polymerebene eingegangen, sondern eher auf der Ebene des Chemiesektors oder in einigen Fällen auf die Nachfrage z. B. nach HVCs oder Kunststoffen insgesamt. Die Nachfrage auf Polymerebene könnte sich aber zum Beispiel ändern bzw. anpassen, um eine höhere Recyclingfähigkeit der hergestellten Polymere zu ermöglichen. Außerdem ist der Produktionspfad für Aromaten aus alternativen Quellen anders und schwieriger als der für Olefine. Änderungen in der Nachfragestruktur für Olefine und Aromaten hätten daher unterschiedliche Auswirkungen auf die notwendige Technologieentwicklung und den Ausbau verschiedener Lösungen, die mehr oder weniger anspruchsvoll sein können.

5.1.2 Herausforderungen

Auch in Bezug auf die identifizierten Herausforderungen und die notwendigen Rahmenbedingungen ergibt sich ein insgesamt kohärentes Bild. Es ist klar, dass im gegenwärtigen Marktumfeld die notwendigen Veränderungen wirtschaftlich nicht tragfähig sind. Dafür gibt es verschiedene Gründe, einer der wichtigsten ist jedoch der hohe Strompreis im Vergleich zu fossilen Energieträgern. Dies zeigt einmal mehr, dass ein rascher Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien notwendig ist, eine Schlussfolgerung, die sich mit der allgemeinen Diskussion über die Energiewende deckt. Daraus ergibt sich auch eine neue Rolle für die chemische Industrie im Energiesystem. Der Strombedarf wird durch die Elektrifizierung von Prozessen und die Wasserstoffproduktion steigen, während die Nutzung von Strom aus fossilen Quellen längerfristig nicht mehr in Frage kommen wird. Während Industriecluster wie der Hafen von Rotterdam sich bisher durch die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen vor Ort selbst mit Strom versorgen konnten, wird die chemische Industrie zukünftig viel stärker vom gesamten Stromsystem und den sich dort ergebenden Strompreisen abhängig sein. Gleichzeitig kann der Einsatz von Wasserstoff und hybriden Wärmeversorgungssystemen in der Industrie eine Flexibilität schaffen, durch die die chemische Industrie als ausgleichender Knotenpunkt im größeren Strom-Wasserstoff-System fungieren. Auf diese Weise kann die chemische Industrie durch einen stärkeren Strombezug zu Zeiten relativ niedriger Strompreise Kosten einsparen.

Dies berührt auch eine andere große Herausforderung, nämlich die Notwendigkeit der Integration mit anderen Sektoren und Industrien sowie die dafür erforderlichen Wertschöpfungsketten und Infrastrukturen. Da dies auch für andere Sektoren relevante Infrastrukturen wie Elektrizität, Wasserstoff und CO₂ betrifft, besteht hier die Möglichkeit einer gemeinsamen Planung (worauf in einigen Roadmaps auch hingewiesen wird). Der Bedarf an anderen Strömen wie Rohstoffen und Plattformchemikalien kann jedoch für die chemische Industrie sehr spezifisch sein und erfordert ebenfalls dezidierte Strategien und Planung. Die Roadmaps weisen auch auf die Notwendigkeit hin, dass staatliche Stellen in diese Art von systemweiten Integrationsprojekten eingebunden werden. Im Gegensatz zur Integration mit neuen Industrien werden gegenwärtigen Verflechtungen nur selten hervorgehoben und diskutiert, nämlich die enge Interaktion mit Raffinerien (oder der Schiefergasindustrie in den USA) durch die Nutzung ihrer Nebenprodukte. Möglicherweise hätte eine stärkere Berücksichtigung dieser Zusammenhänge die Szenarioentwicklung und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen der Roadmaps beeinflusst.

Bei den deutschen Roadmaps deutet die stärkere Abhängigkeit von importiertem Methanol und grünem Naphtha darauf hin, dass für die chemische Industrie in Ländern mit begrenzten heimischen Potenzialen erneuerbarer Energien ein globaler Markt für erneuerbare Feedstocks sehr wichtig sein wird. Es besteht die Möglichkeit, dass diese Länder Partnerschaften mit Ländern bilden, die diese Ressourcen bereitstellen können.

5.2 Verstehen der wichtigsten Abweichungen und Unsicherheiten

Die vorangegangene Analyse hat gezeigt, dass nicht nur die Dekarbonisierungsoptionen, sondern auch die Defossilisierungs- und THG-Minderungsambition, der Umfang des betrachteten Systems, die Annahmen über zukünftige Rahmenbedingungen und die strategischen Präferenzen in den Roadmaps sehr unterschiedlich sind.

Anders als in verwandten energieintensiven Sektoren wie Stahl und Zement ist der Weg zu Netto-Null-Emissionen im Chemiesektor, der durch hohe Komplexität und Prozessvielfalt gekennzeichnet ist, noch vergleichsweise unklar. Entsprechend zeichnet die einschlägige Szenarioliteratur zur chemischen Industrie ein sehr heterogenes Bild, wofür es verschiedene Gründe gibt. Dies stellt die Akteure und Entscheidungsträger jedoch vor große Herausforderungen, wenn sie versuchen, die Situation zu analysieren, eine kohärente Strategie zu entwickeln und die nächsten Schritte festzulegen. Dies birgt die Gefahr von Verzögerungen, die – ironischerweise – in den Roadmaps eindeutig und einheitlich als etwas hervorgehoben werden, das um jeden Preis zu vermeiden ist. Auch wenn gewisse Abweichungen in Szenarien zumindest teilweise unvermeidlich sind und als Teil einer wichtigen Diskussion um erstrebenswerte zukünftige Pfade angesehen werden können, sollten künftige Arbeiten für mehr Klarheit sorgen.

Um zwischen den verschiedenen Arten von Variationen zu unterscheiden, werden diese im Folgenden in vier Gruppen kategorisiert:

- Variationen aufgrund grundlegender Unsicherheiten
- Variationen aufgrund absichtlicher Exploration
- Variationen aufgrund unterschiedlicher Prioritäten und Erzählungen und
- Variationen aufgrund unterschiedlicher Modellierungsansätze.

Diese verschiedenen Kategorien werden im Folgenden beschrieben und diskutiert. Anhand dieser Gruppen entsteht ein klareres Bild davon, was die Roadmaps als Ganzes für die Transformation aussagen.

5.2.1 Variationen aufgrund grundlegender Unsicherheiten

Wir wissen nicht, was die Zukunft bringt. Diese Tatsache spiegelt sich in den vielen Variationen innerhalb und zwischen den Roadmaps wider, die alle auf unterschiedlichen Annahmen beruhen. Mit anderen Worten können diese Variationen so interpretiert werden, als dass die Autoren sagen wollen: *"Wir wissen nicht, wie dieser spezifische Faktor in der Zukunft aussehen wird, aber hier ist unsere Vermutung"* oder *"Wir wissen nicht, wie der Faktor aussehen wird, also haben wir ihn in einem Bereich variiert, den wir für plausibel halten."* Dies kann sich einerseits auf faktische Hypothesen beziehen, z. B. wann neue Technologien verfügbar sein werden, wie ihre Leistung und Bedeutung oder zukünftige Produktportfolios und Kosten für verschiedene Investitionen aussehen werden. Diese Unterschiede weisen auf eine Forschungslücke hin, die es zu schließen gilt, indem das Potenzial für grüne Feedstocktechnologien und ihre Rolle im europäischen Gesamtsystem erfasst wird. Dies ist ein zentrales Ziel des GreenFeed-Projekts, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstanden ist. Auch wenn einige Unsicherheiten verbleiben mögen, sollten für wichtige Annahmen plausible Spannweiten ermittelt werden.

Einige grundlegende Unsicherheiten sind eher gesellschaftlicher und struktureller als technischer Natur und haben ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die in den vorliegenden Studien getroffenen Annahmen. Bei dieser Art von Unsicherheit ist es möglicherweise nicht sinnvoll, die Variation der Ergebnisse zu begrenzen, sondern vielmehr zu klären, welche Umgebungsfaktoren zu den unterschiedlichen Ergebnissen führen können und unter welchen Bedingungen das Szenario robust ist. Beispiele hierfür sind die Entwicklung der globalen Märkte für grüne synthetische Rohstoffe und andere Ressourcen (z. B. Stromerzeugung, nachhaltige Biomasse), Infrastrukturentwicklungen, künftige Nachfrageniveaus und die Entwicklung der Klima- und Handelspolitik in verschiedenen Weltregionen. All diese Faktoren liegen im Spektrum der gesellschaftlichen und technischen Annahmen und sind sowohl von politischen als auch praktischen Unsicherheiten abhängig. Letztgenannte wirken sich beispielsweise auf die Preisannahmen aus, aber auch darauf, welche Optionen überhaupt in Frage kommen.

5.2.2 Variationen durch absichtliche Exploration

Nicht selten werden die Szenarien jedoch so erstellt, dass die Bandbreite der verfügbaren Optionen ausgelotet wird, ohne eine Präferenz anzugeben. Die Roadmap kann damit versuchen, verschiedenen exogen gegebenen Situationen Rechnung zu tragen, die von den beteiligten Interessengruppen nicht beeinflusst werden können. Dabei kann die Variation darauf hindeuten, dass in der Zukunft ein Bedarf an Flexibilität besteht, um zwischen den Pfaden zu wechseln. Die entwickelten Strategien sollten dann möglichst als „no-regret“ für alle Szenarien gelten (z. B. könnte eine Investition in die MtO-Technologie sowohl in einer eher abfallbasierten als auch in einer eher CO₂-basierten zukünftigen chemischen Industrie robust sein). In diesen Fällen sind die einzelnen Szenarien von geringerer Relevanz, wenn es darum geht, was als realistische Entwicklung anzusehen ist. In dieser Analyse wird zum Beispiel deutlich, dass ein sehr hoher Einsatz von Biomasse als Ausgangsmaterial nur in einem der fünf Szenarien von *Manuel et al.* namens *BIO* erreicht wird, und es gibt ähnliche "Ausreißer" in den thematischen Pfaden von *ChemForCli*. Letztgenannte weist auch ausdrücklich auf diesen Zweck solcher thematischen Pfade hin:

“The shaping of each of the transition pathways has been done in a rather extreme way, to give insight into the opportunities and challenges that arise when implementing each of these pathways to its full potential. In doing so, the technical, economic and sustainable boundaries of the solution themes and pathways have been elaborated.” (Stork et al., 2018, S. 29)

Mit anderen Worten: Das Interesse dieser Art von Szenarioanalyse gilt nicht den einzelnen Szenarien, sondern dem, was trotz der Breite der Möglichkeiten robust bleibt. Die vorliegende Meta-Analyse hat jedoch alle dargestellten Szenarien als eigenständige und gleichwertige Arbeiten untersucht. Die großen Unterschiede und die verbleibende Zeitspanne deuten aber darauf hin, dass es nun relativ kurzfristig klare, pragmatische und realistische Pfade zur Zielerreichung bedarf, anstatt die Möglichkeitsräume aufzuzeigen und Grenzen auszuloten. Wie bei *Manuel et al.* und *ChemForCli* sollten ausgewogenere Kombinationsszenarien bereitgestellt werden und den Schwerpunkt der Analyse bilden (neben eventuellen Extremszenarien), wenn auch mit nützlichen Erkenntnissen aus früheren Untersuchungen.

5.2.3 Variationen aufgrund unterschiedlicher Präferenzen und Erzählungen

Es gibt auch unterschiedliche Ansichten darüber, welche Art von Zukunft wir erreichen wollen. In einem Roadmapping-Prozess kann zwischen Szenarien unterschieden werden, die verschiedene exogen gegebene Situationen berücksichtigen (wie in den oben genannten Fällen), und Variationen, die auf unterschiedliche Präferenzen der beteiligten Akteure zurückzuführen sind. Unterschiedliche Akteure und Interessengruppen haben unterschiedliche Prioritäten, und diese Variationen spiegeln sich in den Roadmaps wider, manchmal mehr oder weniger explizit in Form von unterschiedlichen Erzählungen. Mit anderen Worten, diese Variationen können als Versuch der Autoren verstanden werden, zu sagen: *"Wir denken, dass x in der Diskussion fehlt, und schlagen vor, dass es auf diese Weise berücksichtigt werden sollte."* Einige Beispiele aus den Roadmaps in dieser Analyse sind der Verzicht auf Biomasse oder CCS in *Wege*, der außergewöhnlich hohe Anteil an rezyklierten Rohstoffen in *IndTrans* und der außergewöhnlich hohe Anteil an fossilen Rohstoffen in *iC2050*. In einigen Fällen kann es jedoch schwierig sein zu erkennen, inwieweit bestimmte Annahmen das Ergebnis der Argumentation und der Erzählung sind. So können beispielsweise die Produktionsmengen auf Prognosen ohne eine bestimmte Haltung beruhen, aber auch von Narrativen geprägt sein, die beispielsweise Suffizienz oder eine starke industrielle Produktion fördern.

Diese Variationen haben somit die Aufgabe, zu einer politischen und wissenschaftlichen Diskussion beizutragen, in der verschiedene Ansichten und Erkenntnisse geäußert werden sollten. Im Idealfall können dann die Erkenntnisse aus dieser Diskussion in spätere Roadmaps und Entscheidungen einfließen und eine gemeinsame Grundlage bilden. Auf diese Weise kann eine Entscheidung getroffen werden, die am besten mit den gemeinsamen Präferenzen und den besten Erkenntnissen übereinstimmt. Daher tragen solche Varianten zu einer wichtigen Diskussion bei, solange sie wissenschaftlich fundiert sind und etwas Neues in die Debatte einbringen. In dem Maße, wie sich in der Diskussion ein Konsens herausbildet, werden diese Abweichungen vermutlich abnehmen. Es kann jedoch schwierig sein, zwischen den Szenarien zu unterscheiden, die sich durch die Erforschung äußerer Bedingungen auszeichnen, und denjenigen, bei denen die beteiligten Interessengruppen eine Präferenz und ein Argument (häufig implizit) vorbringen.

5.2.4 Variationen aufgrund unterschiedlicher Modellierungsansätze

Die zuvor genannten Abweichungen spiegeln die Unterschiede in der beschriebenen zukünftigen Realität wider, aber die Ergebnisse variieren auch aufgrund der großen Bandbreite von Methoden und Rahmenannahmen, die in den verschiedenen Roadmaps verwendet werden. Die in dieser Analyse betrachteten Publikationen unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich des betrachteten Lebenszyklusumfangs, der Anrechnung negativer und nicht-fossiler Emissionen sowie der Berücksichtigung von vorübergehend gespeichertem Kohlenstoff. Dies sind zentrale Annahmen, die einen großen Einfluss auf Schlüsselindikatoren haben, wie z. B. darauf, was überhaupt als Emissionsreduzierung gezählt wird und wann Netto-Null als erreicht gilt. Es könnten also zwei Szenarien in ihren jeweiligen Geltungsbereichen und Modellen ähnliche Emissionsreduktionen aufweisen, aber sehr unterschiedliche Realitäten für diese Emissionen widerspiegeln, was sich auch zeigen würde, wenn die Geltungsbereiche

und Modellierungsansätze geändert würden. Beispielsweise zählt *LowCarb* in Produkten enthaltenes CO₂ (fossil oder biogen) als negative Emissionen, während *Meys et al.* einen Lebenszyklusansatz verfolgen und feststellen:

“*Net-negative greenhouse gas emissions over the life-cycle of plastics by CO₂ or biomass utilization can only be achieved by permanent carbon storage (25).*” (Meys et al., 2021, S. 9).

In einigen Roadmaps wird die Zuordnung von Emissionen nicht explizit beschrieben, sondern auf die Definitionen z. B. im deutschen Klimaschutzplan verwiesen. Dann können z. B. Emissionen aus der Entsorgung dem Abfallsektor und Emissionen aus dem externen Bezug von Strom und Wärme dem Energiesektor zugeordnet werden. Eine Roadmap mit Fokus auf den gesamten Lebenszyklus eines Produktes der chemischen Industrie hingegen würde bspw. die End-of-Life Emissionen mitberücksichtigen. Es stellt sich dann auch die Frage, wie recycelte Rohstoffe zu betrachten sind. In mehreren Fällen wird zumindest das werkstoffliche Recycling nach den derzeitigen Definitionen nicht als Teil des Chemiesektors betrachtet, kann aber dennoch ein wichtiger Bestandteil eines künftigen Kreislaufsystems sein. In Roadmaps mit einem solchen Systemansatz könnte dies deutlicher dargestellt werden. Ein weiteres Beispiel für unterschiedliche Modellierungsansätze ist die Frage, ob Aspekte wie die Nutzung verschiedener Strategien, Technologien oder Rohstoffe exogen angenommen werden oder ob sie beispielsweise das Ergebnis einer modellierten Optimierung sind. Bei einigen Roadmaps (z. B. *Saygin & Gielen, ScenBel*) werden alle Nutzungsebenen exogen angenommen, während bei anderen (z. B. *iC2050, RoadChem*) die Auswahl der Technologien hauptsächlich auf ökonomischen Optimierungen beruht. Wie wir gesehen haben, kann der Energiebedarf auf viele verschiedene Arten quantifiziert werden, insbesondere unter Einbeziehung oder Ausschluss von Feedstocks und unter Berücksichtigung von E-Kraftstoffen in Bezug auf deren Energiegehalt oder den Strombedarf für deren Erzeugung. Dies sind nur einige Beispiele und oft werden Annahmen und Modellierungsentscheidungen in den Studien nicht vollständig transparent gemacht.

Wie beim Ansatz der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung oder des Produktlebenszyklus liegt ein Grund für diese Unterschiede darin, dass unterschiedliche Logiken oder Standards verwendet werden. Dies lässt sich zum Teil auf unterschiedliche Prioritäten zurückführen, da die Verwendung eines bestimmten Modells das Forschungsinteresse widerspiegelt, das von Prioritäten bestimmt wird. Die verschiedenen Logiken oder Standards dienen also einem bestimmten Zweck. Ein weiterer Grund für diese methodischen Unterschiede ist die Tatsache, dass die Untersuchung aller Aspekte solcher Systeme zeit- und kapazitätsaufwendig ist und mit großen Unsicherheiten verbunden sein kann. *LowCarb* schreibt zum Beispiel, dass das Recycling von Polymerabfallströmen nicht in die Szenarien integriert wurde und eine gründliche Untersuchung des Lebenszyklus der Kreisläufe erfordern würde. Stattdessen konzentriert es sich auf neuartige Prozesse. *iC2050* in der hier berücksichtigten Form enthält keine End-of-Life-Emissionen und enthält weitere Vereinfachungen, die in einer aktualisierten Version enthalten sein sollen (Gonsolin, 2022).

Es gibt zwar Gründe für die unterschiedlichen Ansätze, aber der Verlust der Vergleichbarkeit macht es sehr schwierig, die Ergebnisse in einem Vergleich korrekt und aussagekräftig zu verarbeiten. Eine Form der Standardisierung würde helfen, einen

solchen Vergleich zu ermöglichen. Das Thema Kreislaufwirtschaft und die nachgelagerten Emissionen der Industrie sind von besonderem Interesse, da dies einen der grundlegenden Unterschiede in den Ansätzen der Roadmaps darstellt. Auch die Abgrenzung zwischen der Abfallwirtschaft und der stofflichen Produktion könnte in Zukunft unschärfer werden, sodass die Zusammenarbeit zwischen den Sektoren intensiviert wird, wie in einigen der Roadmaps vorgeschlagen. Andererseits kann die Anforderung, sich an Normen zu orientieren, auch zu einer Einschränkung bei der Erstellung von Szenarien führen und die Anpassungsfähigkeit je nach Forschung begrenzen. Wenn Szenarioentwickler neue, bisher nicht in Betracht gezogene Optionen und Möglichkeiten erforschen wollen, wird es immer noch eine Lücke in den Konventionen geben und damit eine Grenze, wie viel standardisiert werden kann. Welche Lösungen in Frage kommen, ist noch offen, aber in jedem Fall erleichtern Transparenz und das Wissen um die verschiedenen Methoden, Bereiche und Logiken, die bisher angewandt wurden, die Ausrichtung auf den am besten geeigneten Ansatz. In dem Maße, in dem die Roadmaps besser aufeinander abgestimmt und vergleichbar werden, könnte der Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie klarer werden.

5.3 Aktuelle politische Entwicklungen

In der politischen Diskussion über die in den Roadmaps angesprochenen Themen ist in letzter Zeit viel Bewegung entstanden. Auf EU-Ebene wurden die Bemühungen zum Thema Wasserstoff durch den REPowerEU-Plan im Mai 2022 verstärkt. In dem Zuge wurden Konsultationen zu zwei delegierten Rechtsakten eingeleitet, die auf die Fragen abzielen, welche Kriterien für die Anrechenbarkeit von erneuerbarem Wasserstoff gelten bzw. wie dessen Lebenszyklusemissionen zu berechnen sind (Europäische Kommission, 2022a). Diese haben sich jedoch verzögert, selbst nach einer erwarteten Veröffentlichung im Dezember (Kurmayer, 2022).

Auch mit Blick auf das Kohlenstoffmanagement gab es in den vergangenen Jahren EU-weit dynamische Entwicklungen. Dazu zählen eine Mitteilung aus dem Jahr 2021 über nachhaltige Kohlenstoffkreisläufe, in der Maßnahmen für die industrielle CO₂-Abscheidung, -Nutzung, -Speicherung und -Infrastruktur aufgelistet sind, sowie ein Vorschlag vom November 2022 für die Zertifizierung der Kohlenstoffabscheidung. Die Kommission arbeitet außerdem derzeit an zwei Studien in Bezug auf eine EU-weite CO₂-Infrastruktur bzw. die Regulierungsaufsicht über die CO₂-Infrastruktur, die im Sommer 2023 veröffentlicht werden sollen (Europäische Kommission, o. J.-b).

Ebenfalls im November 2022 schlug die Kommission eine Überarbeitung der Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle vor und veröffentlichte eine Mitteilung über einen politischen Rahmen für biobasierte, biologisch abbaubare und kompostierbare Kunststoffe (Europäische Kommission, 2022c, 2023). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verringerung der Mengen an Verpackungsabfällen, der Steigerung des Recyclings und der Verbesserung des Verständnisses über biobasierte, biologisch abbaubare und kompostierbare Kunststoffe. Zu den wichtigsten Maßnahmen gehören Zielvorgaben für die Verringerung von Verpackungsabfällen und für die Wiederverwendung, Beschränkungen für Überverpackungen und unnötige Verpackungen,

Designkriterien für die Wiederverwertbarkeit, Mindestquoten für die Wiederverwertung von Kunststoffverpackungen, obligatorische Pfandsysteme und Recycling-Kennzeichnungen auf allen Verpackungen und entsprechenden Behältern. Bei den biobasierten Materialien werden die Kriterien der nachhaltigen Beschaffung und der Nachhaltigkeit hervorgehoben, und es werden Kriterien für Angaben zu diesen Kunststoffen festgelegt, z. B. Angaben über den Anteil an biobasierten Inhalten, bei denen eine Massenbilanzierung nicht als geeignet angesehen wird.

Eine in den Roadmaps geforderte politische Maßnahme, die nun auch seitens der Europäischen Kommission vorgeschlagen wurde, ist die Änderung der Vorschriften für staatliche Beihilfen, um eine direktere staatliche Unterstützung der Industrie zu ermöglichen (Europäische Kommission, 2023b). Diese Diskussion wurde insbesondere nach der Verabschiedung des Inflation Reduction Act (IRA) der USA geführt (H.R.5376 - Inflation Reduction Act of 2022, 2022). Der IRA besteht aus umfangreichen staatlichen Subventionen und Steuergutschriften für Aktivitäten in den Bereichen CO₂-freie Elektrizität, Herstellung von emissionsfreien Fahrzeugen, Kohlenstoffabbau, Energieeffizienz und Energieinfrastruktur (Böhm, 2023). Als Reaktion darauf hat die Europäische Kommission kürzlich ihren Green-Deal-Industrieplan vorgestellt, der darauf abzielt, klimafreundliche Technologien massiv zu fördern, die Regeln für staatliche Subventionen zu lockern und so ein Gegengewicht zum US-IRA aufzubauen (Simon, 2023).

Auch auf nationaler Ebene sind Entwicklungen zu verzeichnen. So hat die deutsche Regierung den Entwurf einer nationalen Biomassestrategie veröffentlicht und die Entwicklung einer eigenen Kohlenstoffmanagementstrategie angekündigt, nachdem die deutsche Position zu CCS lange Zeit unklar war (BMWK, 2022a, 2022b). Darüber hinaus wird derzeit ein Pilotprogramm zu Carbon Contracts for Difference entwickelt, um die Mehrkosten klimafreundlicher Produktionsprozesse in energieintensiven Branchen wie der Stahl- und Chemieindustrie auszugleichen (BMWK, o. J.).

Viele der in den Roadmaps gestellten Forderungen nach einem geeigneten politischen Rahmen spiegeln sich somit in den gegenwärtigen Entwicklungen bereits wider. Ob diese jedoch in Geschwindigkeit und Skalierung ausreichen, um die Szenario-Pfade in Richtung Netto-Null-Emissionen zu beschreiten, bleibt abzuwarten.

5.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorliegende Analyse hat eine umfassende Übersicht über verschiedene Roadmaps für eine klimaneutrale chemische Industrie gegeben. Wichtige Aspekte aus den Roadmaps wurden zusammengefasst und mehrere Gemeinsamkeiten festgestellt, darunter wesentliche Strategien und Technologien, die Notwendigkeit einer Kombination von Strategien zur Erreichung der Ziele, der Bedarf an großen Mengen an erneuerbarer Elektrizität, ein grober Zeitplan für die Einführung verschiedener Technologien, zentrale Herausforderungen und einige politische Empfehlungen. Auch wenn bei diesen Themen Gemeinsamkeiten festgestellt wurden, ist eine zentrale Herausforderung die extreme Vielfalt zwischen den Roadmaps in Bezug auf technische Annahmen, Prioritäten, Rahmensetzungen und Modellierungsansätze und in der Folge auch in Bezug auf die Ergebnisse.

Folgende Empfehlungen wurden formuliert, um den Weg nach vorne klarer zu machen:

- Schließung von Forschungslücken bei wichtigen Annahmen zu zentralen Strukturen und Technologien und ihren jeweiligen Rollen im zukünftigen Energie- und Industriesystem. Solche Schlüsselfragen betreffen insbesondere chemische Recyclingtechnologien und -potenziale, nachhaltige Biomassepotenziale und -umwandlungsprozesse, den Einsatz von CCU und neuen Wertschöpfungsketten. Dazu gehört auch die Frage, wann und wie Infrastrukturen, politische Rahmenbedingungen und neue Wertschöpfungsketten für Wasserstoff, CO₂, Zwischenprodukte, Abfälle und Biomasse errichtet werden können.
- Bei künftigen Szenarioanalysen sollte der Schwerpunkt darauf liegen, plausible Wege zu finden und zu erforschen, anstatt die Grenzen in Extremfällen zu betonen. Das Ziel sollte darin bestehen, einen realistischen Weg in die Zukunft zu finden, der jedoch genügend Flexibilität lässt, um auf exogene Schocks reagieren zu können.
- Es besteht Bedarf an Diskussionen und Informationsaustausch zwischen verschiedenen Interessengruppen und Entscheidungsträgern, insbesondere in Bezug auf Fragen zur Dauer der weiteren Nutzung fossiler Ressourcen, dem Einsatz von CCS und der Verwendung von Biomasse in der chemischen Industrie, um einen Konsens zu erzielen oder zumindest die unterschiedlichen Prioritäten und Präferenzen der Entscheidungsträger zu klären. Es könnte auch zur Entscheidungsfindung beitragen, wenn die Argumente und Präferenzen in Roadmaps und ähnlichen Arbeiten expliziter erläutert und begründet würden.
- Idealerweise sollte eine gemeinsame Praxis für die Bearbeitung und Darstellung von Schlüsselaspekten entwickelt werden. Während einige Aspekte von Fall zu Fall von den geltenden politischen Rahmenbedingungen abhängen können, würde ein stärker standardisierter Ansatz für andere Schlüsselaspekte einen Vergleich zwischen den Roadmaps erleichtern. Insbesondere sollte der gesamte Lebenszyklus von chemischen Produkten bei der Entwicklung von Transformations-Roadmaps berücksichtigt werden, da dies (insbesondere das Ende des Lebenszyklus) einen großen Teil der Auswirkungen der chemischen Industrie auf ihre Produkte ausmacht und in einer künftigen Kreislaufwirtschaft ein zunehmend integrierter Bestandteil sein wird. Darüber hinaus sollte der Ansatz für die Berücksichtigung abgechiedener Emissionen an frühere Arbeiten oder verfügbare Empfehlungen angeglichen werden, z. B. wie über Kohlenstoff, der aus verschiedenen Quellen wie der Luft, der chemischen Industrie, anderen Industrien, Biomasse und in anderen Ländern abgechieden wird, berichtet werden sollte. Ebenso ist mehr Klarheit darüber erforderlich, wie vorübergehend in Produkten gespeicherter Kohlenstoff berücksichtigt werden sollte. Wenn für diese Schlüsselaspekte kein abgestimmter Umgang erreicht werden kann, sollten zukünftige Roadmaps zumindest Transparenz über die getroffenen Entscheidungen schaffen.

Die aktuelle Energiekrise infolge der Invasion Russlands in der Ukraine und die neuen Bedingungen für umweltfreundliche Investitionen in den USA aufgrund des kürzlich verabschiedeten IRA sind zwei wichtige Entwicklungen, die in der vorliegenden Analyse nur kurz berührt wurden. Diese und einige andere politische Entwick-

lungen verändern derzeit die Bedingungen für die chemische Industrie und ihre Defossilisierung grundlegend. Die einseitige Abhängigkeit Europas von russischen Erdgas- und Mineralöllieferungen hat sich nicht nur als unhaltbar, sondern auch als unzuverlässig und riskant erwiesen. Der IRA hat das globale Spielfeld insbesondere für die industrielle Produktion auf Basis erneuerbarer Energien verändert und angedeutet, dass auch die USA eine führende Rolle bei der Industrietransformation übernehmen wollen. Entwicklungen wie diese zeigen, dass es für die energieintensiven Industrien so etwas wie ein „Business-as-usual“ nicht mehr geben wird. Die konventionelle Industriestruktur ist in jedem Fall nicht mehr zukunftsfähig, was bedeutet, dass die Industrie grundlegende Veränderungen durchlaufen muss. Wie diese Veränderungen im Detail aussehen werden und inwieweit es gelingen wird, diese Veränderungen planvoll umzusetzen, ist jedoch insbesondere in Hinblick auf die chemische Industrie noch nicht entschieden. Welcher Weg eingeschlagen und wie er beschritten wird, hängt von den in den kommenden Jahren getroffenen Entscheidungen in Industrie, Politik und Gesellschaft ab.

6 Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende und Wuppertal Institut. (2019). *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf
- Antonopoulos, I., Faraca, G., & Tonini, D. (2021). *Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers*. *Waste Management*, 126, 694–705. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.002>
- Bazzanella, A., & Ausfelder, F. (2017). *Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry* [Technology study].
- BCG. (2021). *Klimapfade 2.0 Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>
- BMWK. (o. J.). *Programm Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfD)*. Abgerufen 25. Januar 2023, von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/018-pilotprogramm.html>
- BMWK. (2022a). *Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS)*. <https://www.bmuv.de/download/eckpunkte-fuer-eine-nationale-biomassestrategie-nabis>
- BMWK. (2022b, Dezember 21). *Bundeskabinett beschließt Evaluierungsbericht zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG)*. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/12/20221221-bundeskabinett-beschliesst-evaluierungsbericht-zum-kohlendioxid-speicherungsgesetz-kspg.html>
- Boehm, L. (2023). *EU-US climate and energy relations in light of the Inflation Reduction Act* [Briefing]. Think Tank European Parliament. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2023\)739300](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2023)739300)
- Cefic. (2022, Januar 13). *Energy Consumption*. <https://cefic.org/a-pillar-of-the-european-economy/facts-and-figures-of-the-european-chemical-industry/energy-consumption/>
- Center for Global Commons & YSTEMIQ. (2022). *Planet Positive Chemicals—Pathways for the chemical industry to enable a sustainable global economy*. <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2022/10/Main-report-v1.22.pdf>
- Deloitte. (2021). *IC2050 PROJECT REPORT - Shining a light on the EU27 chemical sector's journey toward climate neutrality* [Project report].
- Deloitte, VUB-IES, AMS, & Climact. (2020). *Transitiepotentieel van de Vlaamse industrie: Roadmapstudie en ontwerp van transitiekader*. <https://www.vlaio.be/nl/publicaties/naar-een-koolstofcirculaire-en-co2-arme-vlaamse-industrie>
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). (2021). *Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*.
- Directorate-General for Energy. (2016). *Mapping and analyses of the current and future (2020-2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables); Work package 2: Assessment of the technologies for the year 2012* [Study]. European Commission, Directorate-General for Energy. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2017-03/mapping-hc-final_report-wp2_0.pdf
- ERK. (2022). *Zweijahresgutachten 2022. Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz)*. Hg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK). <https://expertenrat-klima.de/>
- Europäische Kommission. (o. J.-a). *Biomass*. Abgerufen 17. Januar 2023, von https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomass_en
- Europäische Kommission. (o. J.-b). *Carbon capture, storage and utilisation*. Abgerufen 31. Januar 2023, von https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/carbon-capture-storage-and-utilisation_en

- Europäische Kommission. (2022a, Mai 23). *Commission launches consultations on the regulatory framework for renewable hydrogen* [News Article]. https://commission.europa.eu/news/commission-launches-consultations-regulatory-framework-renewable-hydrogen-2022-05-23_en
- Europäische Kommission. (2022b). *Communication—EU policy framework on biobased, biodegradable and compostable plastics*. https://environment.ec.europa.eu/publications/communication-eu-policy-framework-biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en
- Europäische Kommission. (2022c, November 30). *Packaging waste*. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/packaging-waste_en
- Europäische Kommission. (2023a, Januar 11). *Biobased, biodegradable and compostable plastics*. https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en
- Europäische Kommission. (2023b, March 9). *State aid: Commission adopts Temporary Crisis and Transition Framework to further support transition towards net-zero economy* [Press release]. European Commission - European Commission. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1563
- Eurostat. (2022a, Oktober 27). *Gas prices for non-household consumers—Bi-annual data (from 2007 onwards)*. https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/NRG_PC_203__custom_4640751/default/table?lang=en
- Eurostat. (2022b, Dezember 20). *Electricity prices for non-household consumers—Bi-annual data (from 2007 onwards)*. https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/NRG_PC_205__custom_4640899/default/table?lang=en
- Eurostat. (2023, Januar 22). *Complete energy balances*. https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/NRG_BAL_C__custom_1970141/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=d9edf51f-af56-42e2-a7f5-c8debed97494
- Fleiter, T., Herbst, A., Rehfeldt, M., & Arens, M. (2019). *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonisation*. ICF, Fraunhofer ISI. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-07/industrial_innovation_part_2_en.pdf
- FPS Public Health: DG Environment: Climate Change Section. (2021). *Scenarios for a climate neutral Belgium by 2050*. FPS Public Health: DG Environment: Climate Change Section. <https://climat.be/doc/climate-neutral-belgium-by-2050-report.pdf>
- Gonsolin, F. (2022, November 22). *Developing key steps Pathways to a climate-neutral European chemical industry*. eceee Zero Carbon Industry 2022, Antwerpen.
- Kim, S., & Oh, S. (2020). Impact of US Shale Gas on the Vertical and Horizontal Dynamics of Ethylene Price. *Energies*, 13(17), 4479. <https://doi.org/10.3390/en13174479>
- Kurmayer, N. J. (2022, Dezember 2). *LEAK: Long-awaited EU rules on renewable hydrogen expected 15 Dec*. <https://www.euractiv.com/section/energy/news/leak-long-awaited-eu-rules-on-renewable-hydrogen-expected-15-dec/>
- Manuel, S. D., Floris, T., Kira, W., Jos, S., & André, F. (2022). *High technical and temporal resolution integrated energy system modelling of industrial decarbonisation*. *Advances in Applied Energy*, 7, 100105. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2022.100105>
- Material Economics. (2019). *Industrial Transformation 2050: Pathways to net-zero emissions from EU Heavy Industry*. University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership Cambridge. <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>
- Meys, R., Kätelhön, A., Bachmann, M., Winter, B., Zibunas, C., Suh, S., & Bardow, A. (2021). *Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy*. *Science*, 374(6563), 71–76. <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>
- Michot Foss, M., Gülen, G., Quijano, D., & Shook, B. (2021). *Petrochemicals: An Industrial Renaissance?* In M. Michot Foss, A. Mikulska, & G. Gülen (Hrsg.), *Monetizing Natu-*

- ral Gas in the New “New Deal” Economy* (S. 189–234). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59983-6_3
- Plastics Europe. (2022). *Plastics—The Facts 2022*. https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2022/10/PE-PLASTICS-THE-FACTS_20221017.pdf
- Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., & Nuss, P. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann* Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- Roland Geres, Kohn, A., Lenz, S. C., Ausfelder, F., Bazzanella, A., & Möller, A. (2019). *Roadmap Chemie 2050 auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland: Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI*. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Samadi, S. (2016). *Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam*. Environment and Energy.
- Samadi, S., Schneider, C., & Lechtenböhmer, S. (2018). Deep decarbonisation pathways for the industrial cluster of the Port of Rotterdam. *Leading the Low-Carbon Transition: ECEEE Industrial Summer Study; 11-13 June 2018, Berlin, Germany; Proceedings*, 399-- 409. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-70364>
- Saygin, D., & Gielen, D. (2021). Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector. *Energies*, 14(13), 3772. <https://doi.org/10.3390/en14133772>
- Simon, F. (2023, Januar 18). *EU Commission announces „Green Deal Industrial Plan“, but no fresh money*. [Www.Euractiv.Com. https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/eu-commission-announces-green-deal-industrial-plan-but-no-fresh-money/](https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/eu-commission-announces-green-deal-industrial-plan-but-no-fresh-money/)
- Stork, M., de Beer, J., Lintmeijer, N., & Den Ouden, B. (2018). *Chemistry for Climate: Acting on the need for speed-Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050*. Ecofys, Berenschot. https://task42.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/10/2018/10/VNCI_Routekaart-2050.pdf
- H.R.5376—Inflation Reduction Act of 2022, Nr. 117–169 (2022). <https://www.congress.gov/117/plaws/publ169/PLAW-117publ169.pdf>