

Metaanalyse von Klimaschutzszenarien für die Branchen Stahl, Zement und Chemie

Ein Ergebnis des Themenfeldes 3 „Szenarien und Transformationspfade“ des
Forschungsprojektes SCI4climate.NRW

Mit Unterstützung aus dem Projekt „Kompetenzzentrum Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme“

SCI4climate.NRW ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen unterstütztes Forschungsprojekt zur Entwicklung einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie bis zum Jahr 2045. Das Projekt ist innerhalb der Initiative IN4climate.NRW verankert und repräsentiert die Seite der Wissenschaft. Das Projekt erforscht die technologischen, ökologischen, ökonomischen, institutionellen und (infra)-strukturellen Systemherausforderungen für produzierende Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Ein transdisziplinärer Prozess mit den Partnerinnen und Partnern aus der Industrie und Wissenschaft erarbeitet gemeinsam mögliche Pfade und deren Auswirkungen hin zu einer klimaneutralen Industrie.



Bibliographische Angaben

Herausgeber:	SCI4climate.NRW
Veröffentlicht:	7. September 2021
AutorInnen:	Anna Röhnelt (bis Juni 2021 Wuppertal Institut) Dr. Sascha Samadi (Wuppertal Institut) Alexander Scholz (Wuppertal Institut) Ansgar Taubitz (Wuppertal Institut)
Kontakt:	sascha.samadi@wupperinst.org
Hinweis:	In die vorliegende Arbeit sind auch Analysen und Erkenntnisse zur Stahl- und Zementindustrie aus dem parallel laufenden Forschungsvorhaben „Kompetenzzentrum Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme“ am Wuppertal Institut eingeflossen.
Bitte zitieren als:	SCI4climate.NRW 2021: <i>Metaanalyse von Klimaschutzszenarien für die Branchen Stahl, Zement und Chemie</i> , Wuppertal

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
1 Einleitung.....	5
2 Auswahl und Vorstellung der analysierten Szenarien	6
3 Wesentliche Strategien für ambitionierten Klimaschutz in der Industrie.....	12
4 Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien in den analysierten Szenarien.....	15
4.1 Stahlindustrie.....	15
4.1.1 Einsatz klimaneutraler Energieträger.....	15
4.1.2 Energieeffizienz	21
4.1.3 Einsatz von CO ₂ -Abscheidung	21
4.1.4 Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen	23
4.2 Zementindustrie.....	26
4.2.1 Einsatz klimaneutraler Energieträger.....	26
4.2.2 Energieeffizienz	30
4.2.3 Einsatz von CO ₂ -Abscheidung	31
4.2.4 Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen	33
4.3 Chemische Industrie.....	36
4.3.1 Einsatz klimaneutraler Energieträger bzw. Feedstocks.....	36
4.3.2 Energie-/Ressourceneffizienz.....	43
4.3.3 Einsatz von CO ₂ -Abscheidung	44
4.3.4 Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen	46
5 Übersicht über zentrale Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Szenarien	50
5.1 Stahl.....	50
5.2 Zement.....	52
5.3 Chemie.....	54
6 Fazit.....	57
Literaturverzeichnis	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zehn Schlüsselstrategien zur Erreichung von Klimaneutralität in der Industrie12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die in der Metaanalyse berücksichtigten Studien	7
Tabelle 2: Übersicht über die in den Szenarien bis 2050 erreichten Emissionsminderungen.....	8
Tabelle 3: Endenergiebedarfsentwicklung nach Energieträgern in der Stahlbranche	16
Tabelle 4: Strombedarfsentwicklung in der Stahlbranche	17
Tabelle 5: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in der Stahlbranche.....	19
Tabelle 6: Biomassebedarfsentwicklung in der Stahlbranche	20
Tabelle 7: Bedeutung der CO ₂ -Abscheidung.....	22
Tabelle 8: Entwicklung der Rohstahlproduktion	23
Tabelle 9: Entwicklung der Anteile der Sekundärstahlroute an der Rohstahlproduktion	25
Tabelle 10: Endenergieverbrauch der Zementproduktion	26
Tabelle 11: Bedeutung von Strom im Endenergieverbrauch der Zementproduktion	28
Tabelle 12: Bedeutung von Biomasse im Endenergieverbrauch der Zementproduktion	29
Tabelle 13: Energieeffizienzgewinne bei der Zementproduktion	31
Tabelle 14: Einsatz von CO ₂ -Abscheidung in der Zementindustrie im Jahr 2050.....	32
Tabelle 15: Entwicklung der Produktionsmengen von Zement	33
Tabelle 16: Entwicklung des Klinkerfaktors	35
Tabelle 17: Gesamtenergiebedarf (GEB) in der chemischen Industrie (energetisch und stofflich)	37
Tabelle 18: Verwendung klimaneutraler Energieträger in der chemischen Industrie.....	38
Tabelle 19: Strombedarf (ohne Bedarf für die Wasserstoffherstellung) in der chemischen Industrie	39
Tabelle 20: Strombedarf zur Wasserstoffherstellung in der chemischen Industrie.....	41
Tabelle 21: Biomassebedarf in der chemischen Industrie.....	42
Tabelle 22: Rolle der CO ₂ -Abscheidung in der chemischen Industrie.....	44
Tabelle 23: Bedarf an Abfall (energetisch und stofflich) in der chemischen Industrie	47
Tabelle 24: Übersicht über die Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien nach Szenarien (Stahl)	51
Tabelle 25: Übersicht über die Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien nach Szenarien (Zement)	53
Tabelle 26: Übersicht über die Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien nach Szenarien (Chemie)	55

1 Einleitung

Das Erreichen der in vielen Ländern der Welt zunehmend ambitionierten Klimaschutzziele wird auch im Industriesektor sehr weitgehende Emissionsreduktionen innerhalb weniger Jahrzehnte erforderlich machen. Wie eine solche industrielle Transformation in Richtung Klimaneutralität technologisch, infrastrukturell, politisch und gesellschaftlich umgesetzt werden könnte, ist seit einigen Jahren verstärkt Gegenstand der Forschung. So sind in den letzten Jahren auch verschiedene Szenario-Studien und Branchen-Roadmaps erschienen, die für Deutschland, Europa oder auch die Welt aufzeigen, wie der Industriesektor bzw. einzelne Branchen der Industrie ihre Treibhausgasemissionen bis Mitte des Jahrhunderts sehr weitgehend oder sogar auf (netto) null reduzieren können.

In einer vorangegangenen, ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojekts SCI4climate.NRW durchgeführten Analyse wurden bereits mehrere Klimaschutzszenarien hinsichtlich ihrer jeweils unterstellten Klimaschutzstrategien ausgewertet. Eine Erkenntnis dieser Analyse war, dass vorliegende Szenarien abweichende Kombinationen von Strategien verfolgen, was darauf hindeutet, dass unterschiedliche Wege zu einer weitgehenden Emissionsminderung im Industriesektor führen können und dass es bisher keinen breiten Konsens über die wahrscheinlichste oder zu bevorzugende Kombination von Strategien gibt.

Diese vorangegangene Metaanalyse fokussierte auf die in den Szenarien beschriebenen Entwicklungen des gesamten Industriesektors. Sie konnte daher keine speziellen Aussagen für einzelne Industriebranchen treffen. Aufgrund der großen Heterogenität verschiedener Industriebranchen liegt es daher nahe, die vorliegende Metaanalyse um eine Metaanalyse von Szenarien und Roadmaps für einzelnen Branchen der Industrie zu ergänzen. Solche branchenspezifischen Metaanalysen ermöglichen beispielsweise Aussagen darüber, inwiefern sich vielversprechende Klimaschutzstrategien von Branche zu Branche unterscheiden und wie genau einzelne Strategien in bestimmten Branchen umgesetzt werden könnten.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden Metaanalysen von Klimaschutzszenarien und Roadmaps jeweils für die drei Branchen Stahl, Chemie und Zement durchgeführt. Diese drei Branchen wurden für die Analyse ausgewählt, da sie zum einen diejenigen Industriebranchen mit den höchsten Treibhausgasemissionen sind und zum anderen für sie die meisten aktuellen Szenarien und Roadmaps vorliegen. Berücksichtigt werden dabei sowohl solche Studien, die einzelne dieser Branchen separat betrachten als auch Studien, die den gesamten Industriesektor in den Blick nehmen – sofern sie in ausreichender Detailtiefe gesonderte Aussagen über die drei genannten Branchen bieten.

Im folgenden Kapitel 2 wird die Auswahl der betrachteten Studien näher erläutert und diese Studien sowie die aus ihnen für die Metaanalyse ausgewählten Szenarien vorgestellt. In Kapitel 3 werden anschließend zehn zentrale Klimaschutzstrategien für den Industriesektor definiert. Diese zehn Strategien bilden die Grundlage für die – nach Branchen unterteilte – Analyse der Klimaschutzstrategien in den verschiedenen Szenarien in Kapitel 4. Kapitel 5 fasst anschließend für die einzelnen Branchen die wesentlichen Erkenntnisse aus dieser Metaanalyse zusammen. Abschließend formuliert Kapitel 6 ein Fazit der Metaanalyse und leitet weiteren Forschungsbedarf ab.

2 Auswahl und Vorstellung der analysierten Szenarien

Für die Auswahl der in dieser Metaanalyse zu berücksichtigenden Szenarien bzw. Roadmaps wurden die folgenden Kriterien angesetzt:

- **Aktualität:** Veröffentlichung des Szenarios im Jahr 2018 oder später
- **Geografische und branchenspezifische Abgrenzung:** Betrachtung Deutschlands, Europas oder der Welt in einer Abgrenzung, die eine separate Analyse mindestens einer der untersuchten Branchen ermöglicht.
- **Detailtiefe:** Ausreichende quantitative Detailtiefe hinsichtlich der Entwicklung der Emissionen und der verfolgten Klimaschutzstrategien.
- **Ambitionsniveau:** Minderung der Treibhausgasemissionen der Industrie bzw. einzelner Branchen in Einklang mit dem EU-Ziel der Klimaneutralität bis 2050 bzw. (für die globalen Szenarien) mit der „deutlich unter 2 Grad“-Zielformulierung des Pariser Klimaabkommens¹

Auf Grundlage der Kenntnisse der Autorinnen und Autoren dieser Metaanalyse zu einschlägigen Veröffentlichungen von Szenariostudien auf nationaler und internationaler Ebene sowie einer ergänzenden Literaturrecherche über Online-Datenbanken wurden zunächst 14 Studien identifiziert, die Klimaschutzszenarien für die Industrie enthalten, seit 2018 erschienen sind und die hier gewünschte geografische und branchenspezifische Abgrenzung aufweisen.² Diese Studien wurden anschließend genauer dahingehend betrachtet, ob sie auch die für diese Metaanalyse benötigte ausreichende quantitative Detailtiefe und das definierte Mindest-Ambitionsniveau aufweisen.

Mehrere der identifizierten Studien weisen keine ausreichende Detailtiefe auf und wurden daher in der folgenden Metaanalyse nicht berücksichtigt (ETC 2019, BDI 2018, EUROFER 2019, ETH 2018). Eine ausreichend detaillierte quantitative Darstellung der Szenarien ist notwendig, um einen präzisen Vergleich der Szenarien hinsichtlich der jeweiligen Rolle unterschiedlicher Klimaschutzszenarien zu ermöglichen. Zwei der identifizierten Szenarien wurden hingegen nicht in der Metaanalyse betrachtet, weil sie das in den Kriterien vorgegebene Mindest-Ambitionsniveau nicht erreichen (IEA 2018a, IEA 2018b).

Die in Tabelle 1 dargestellten Szenarien aus den aufgeführten Studien erfüllen hingegen alle formulierten Kriterien und wurden daher in der folgenden Metaanalyse berücksichtigt.

¹ Dabei wurde angenommen, dass Klimaneutralität bis 2050 nur dann erreichbar ist, wenn die direkten Treibhausgasemissionen des Industriesektors bis 2050 gegenüber 2010 um mindestens 90 % sinken. Etwaige Restemissionen könnten dann noch – so die Annahme hier – über natürliche Senken oder „Direct Air Capture“ (DAC) kompensiert werden. Für eine Kompatibilität mit dem „deutlich-unter-zwei-Grad“-Ziel wird auf Grundlage des IPCC-Sonderberichts über 1,5 °C globale Erwärmung (IPCC 2018) angenommen, dass die Emissionen des Industriesektors 2050 mindestens 50 % unter dem Wert von 2010 liegen müssen.

² Neben den acht schließlich berücksichtigten Studien (s. Tabelle 1) wurden zudem die folgenden sechs Studien identifiziert: ETC 2019, BDI 2018, EUROFER 2019, IEA 2018a, IEA 2018b und ETH 2018. Zudem sind nach Auswahl der Studien und Szenarien und dem Beginn der Metaanalyse mit IEA 2021 und BMWi 2021 zwei weitere potenziell für die Metaanalyse geeignete Szenariostudien erschienen, die allerdings nicht mehr berücksichtigt werden konnten.

Tabelle 1: Übersicht über die in der Metaanalyse berücksichtigten Studien

Titel der Studie	Jahr	Herausgeber/ Auftraggeber	Geografie	Ausgewählte Szenarien	Minderung der THG-/CO ₂ -Emis- sionen in der Industrie bis 2050 (vs. 2010)
Branchenübergreifende Studien mit separaten Betrachtungen der Stahl-, Chemie- und/oder Zementindustrie					
Klimaneutrales Deutschland (Agora Energiewende u. a. 2020)	2020	Agora Energie- wende u. a.	Deutsch- land	KN2050	– 116 % ³
Energy Technology Perspectives 2020 (IEA 2020)	2020	IEA	Welt	SDS	ca. – 52 %
Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonization of Industry (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	2019	ICF, Fraunhofer ISI	Europa	Mix95	ca. – 92 %
Industrial Transformation 2050 (Material Economics 2019)	2019	Material Economics	Europa	New Processes, Circular Economy, Carbon Capture	ca. – 95 %
Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (UBA 2019)	2019	UBA	Deutsch- land	GreenSupreme ⁴	– 95 %
Studien speziell zur Zementindustrie					
Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien (VDZ 2020)	2020	VDZ	Deutsch- land	Klimaneutralität	– 109 % ⁵
Cementing the European Green Deal (Cembureau 2020)	2020	Cembureau	Europa	2050 roadmap	– 100 % ⁶
Studie speziell zur chemischen Industrie					
Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutra- len chemischen Industrie in Deutschland (FutureCamp/DECHEMA 2019)	2019	VCI	Deutsch- land	Treibhausgas- neutralität 2050	ca. – 98 % ⁷

³ In diesem Szenario werden im Jahr 2050 unterm Strich durch den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CO₂-Abscheidung und Speicherung negative Emissionen im Industriesektor realisiert.

⁴ Weitere Szenarien dieser Studie erfüllen die hier angelegten Kriterien. Aufgrund der starken Ähnlichkeiten der verschiedenen Szenarien der Studie wurde aber entschieden, in die vorliegende Metaanalyse lediglich eines der Szenarien – mit *GreenSupreme* das ambitionierteste – aufzunehmen.

⁵ Der Werte bezieht sich auf die Zementindustrie. In diesem Szenario werden 2050 unterm Strich durch den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CO₂-Abscheidung und Speicherung negative Emissionen realisiert.

⁶ Der Wert bezieht sich auf die Zementindustrie

⁷ Der Wert bezieht sich auf die chemische Industrie, und zwar auf eine Abgrenzung ihrer Treibhausgasemissionen nach „Scope 3“-Ansatz. Dies bedeutet, dass neben den direkten Emissionen der Branche („Scope 1“) auch die indirekten Emissionen aus dem Fremdbezug von Strom und Wärme und den zugekauften Produkten entlang der Wertschöpfungskette sowie auch die End-of-Life-Emissionen der hergestellten Produkte mitbetrachtet werden.

Die folgende Tabelle 2 zeigt die CO₂- bzw. THG-Emissionsminderungen, die in den jeweiligen Szenarien und Branchen bis zum Jahr 2050 (gegenüber dem jeweiligen Basisjahr) erreicht werden.

Tabelle 2: Übersicht über die in den Szenarien bis 2050 erreichten Emissionsminderungen

Szenario	Geografie	Minderung der CO ₂ - bzw. THG-Emissionen ⁸ bis 2050 (gegenüber dem jeweiligen Basisjahr)		
		Stahl	Zement	Chemie
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DECHEMA 2019)	Deutschland	nicht betrachtet	nicht betrachtet	– 98 %
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	Deutschland	– 124 % ⁹	– 97 %	– 172 % ¹⁰
Klimaneutralität (VDZ 2020)	Deutschland	nicht betrachtet	– 108 % ¹¹	nicht betrachtet
GreenSupreme (UBA 2019)	Deutschland	– 100 %	– 80 %	– 99 %
2050 roadmap (Cembureau 2020)	Europa	nicht betrachtet	– 100 %	nicht betrachtet
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	Europa	– 96 %	k. A.	– 91 %
New Processes (Material Economics 2019)	Europa	– 99 %	– 96 %	– 100 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	Europa	– 100 %	– 98 %	– 100 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	Europa	– 99 %	– 100 %	– 99 %
SDS (IEA 2020)	Welt	– 53 %	– 65 %	– 56 %

Die meisten der branchenübergreifenden Szenarien – mit Ausnahme von *Mix95* und *GreenSupreme* – werden in allen drei folgenden branchenspezifischen Metaanalysen berücksichtigt. In *Mix95* wird die Zementindustrie nicht als gesonderte Branche aufgeführt, sondern nur aggregiert als Industriezweig der nichtmetallischen Minerale, unter den unter anderem auch die Glas- und Keramikindustrie fällt. Aufgrund der unvermeidlichen Unschärfe, die sich aus einem Vergleich der Werte dieses gesamten Industriezweigs mit den (aus den anderen Studien vorliegenden) Werten ausschließlich der

⁸ In den meisten betrachteten Szenarien werden die CO₂-Emissionen der einzelnen Branchen aufgeführt, in einzelnen Fällen werden aber auch andere Treibhausgase berücksichtigt und in Form von CO₂-Äquivalenten aufgeführt. Aufgrund der klaren Dominanz des Treibhausgases CO₂ wird dieser Unterschied zwischen den Studien für die vorliegende Metaanalyse nicht als relevant erachtet.

⁹ Durch den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CCS werden in der Stahlindustrie in diesem Szenario negative Emissionen erzielt.

¹⁰ Durch den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CCS werden in der chemischen Industrie in diesem Szenario negative Emissionen erzielt.

¹¹ Durch den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CCS werden in der Zementindustrie in diesem Szenario negative Emissionen erzielt.

Zementindustrie ergeben hätten, wurde entschieden, *Mix95* nicht in die Metaanalyse der Szenarien der Zementindustrie aufzunehmen. *GreenSupreme* bietet hingegen in Bezug auf die chemische Industrie nur einen (für die hier beabsichtigte Metaanalyse) unzureichenden quantitativen Detailgrad und wird daher im Folgenden nur in den Metaanalysen für die Branchen Stahl und Zement berücksichtigt.

Zusätzlich wurde jeweils ein branchenspezifisches Szenario für die Zementindustrie und die chemische Industrie identifiziert und aufgrund der Erfüllung der angelegten Kriterien in die Metaanalyse der jeweiligen Branche aufgenommen. Für die Stahlindustrie konnte kein branchenspezifisches Szenario identifiziert werden, das die Kriterien erfüllt.

Im Folgenden werden die acht für die Metaanalyse ausgewählten Studien und ihre Szenarien kurz vorgestellt:

- Klimaneutrales Deutschland (Agora Energiewende u. a. 2020)

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland“ wurde von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und der Stiftung Klimaneutralität beauftragt und im November 2020 veröffentlicht. Erstellt wurde die Studie von einem Konsortium bestehend aus Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut. Letzteres hat die Modellierung des Industriesektors übernommen. In der Studie wird das Szenario „Klimaneutral 2050“ (*KN2050*) entwickelt und beschrieben, das in der hier vorliegenden Metaanalyse berücksichtigt wird. Das Szenario zeigt auf, wie Deutschland bis 2050 über alle treibhausgasemittierenden Sektoren hinweg klimaneutral werden könnte. Auch 2050 noch als unvermeidbar eingeschätzte Restemissionen (v. a. aus der Landwirtschaft) werden in dem Szenario durch „negative“ Emissionen kompensiert. Eine ebenfalls in der Studie betrachtete Szenariovariante (*KNmin*) untersucht, was sich gegenüber *KN2050* nach 2030 ändern müsste, wenn bis dann nur eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 60 % (statt um 65 % wie im Szenario *KN2050*) erreicht werden würde. Diese Variante wurde nicht in die folgende Metaanalyse aufgenommen.

- Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien (VDZ 2020)

Im November 2020 veröffentlichte der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) eine Studie, die verdeutlichen möchte, wie die deutsche Zementindustrie bis Mitte des Jahrhunderts Klimaneutralität erreichen könnte. In einem „ambitionierten Referenzszenario“ wird zunächst aufgezeigt, wie mit konventionellen Minderungsmaßnahmen bis 2050 gegenüber 2019 eine weitere Reduktion der CO₂-Emissionen um 36 % erreicht werden könnte. Gegenüber 1990 würde dies einer Halbierung der Emissionen entsprechen. Im Szenario *Klimaneutralität*, das in der folgenden Metaanalyse berücksichtigt wird, wird bis 2050 hingegen Klimaneutralität erreicht, indem die Anwendung neuartiger Technologien unterstellt wird. Hierzu zählt die Studie unter anderem die Markteinführung von Zementen mit sehr niedrigen Klinkeranteilen (35 bis 50 %), der Einsatz von Wasserstoff zur Wärmebereitstellung sowie insbesondere die Abscheidung und anschließende Speicherung oder Nutzung von CO₂.

- Energy Technology Perspectives 2020 (IEA 2020)

Die Studie „Energy Technology Perspectives 2020“ wurde im September 2020 von der Internationalen Energieagentur veröffentlicht. Die Studie ist Teil einer Reihe, die seit 2006 in unterschiedlichen Abständen langfristige Szenarien für die Entwicklung des globalen Energiesystems vorstellt und dabei einen Schwerpunkt auf die Beschreibung des Bedarfs und des

Entwicklungsstands zentraler Klimaschutztechnologien legt. In „Energy Technology Perspectives 2020“ steht das *“Sustainable Development Scenario” (SDS)* im Vordergrund. In diesem Szenario werden die energiebedingten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2070 auf null reduziert. Das ebenfalls in der Studie aufgeführte „Faster Innovation Case“-Szenario erreicht Netto-Nullemissionen im Energiesystem bereits 2050, wird im Bericht allerdings nicht ausreichend detailliert dokumentiert, weshalb für die vorliegende Metaanalyse auf das SDS-Szenario zurückgegriffen wird.

■ **Cementing the European Green Deal – Reaching Climate Neutrality Along the Cement and Concrete Value Chain by 2050 (Cembureau 2020)**

Im Mai 2020 veröffentlichte der europäische Zementverband (Cembureau) eine Roadmap, die einen möglichen Pfad zur Klimaneutralität in der Zementindustrie bis zum Jahr 2050 aufzeigen soll. Bereits 2013 hatte der Verband eine Roadmap erarbeitet, die eine CO₂-Reduzierung bis Mitte des Jahrhunderts um 80 % beschrieb (Cembureau 2013). Die aktuelle Publikation verschärft die dort entwickelte Zielsetzung und ergänzt sie um einen "5C-Ansatz", welcher Maßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette Klinker-Zement-Beton-Bau-Karbonisierung (engl. **C**linker-**C**ement-**C**oncrete-**C**onstruction-**C**arbonation) vorsieht. Für jedes der 5C werden Bereiche für Emissionsminderungen identifiziert, die nötigen Schlüsseltechnologien aufgezeigt und politische Hebel zur Realisierung beschrieben. Innerhalb der Studie gibt es nur ein quantitatives Szenario, das über Zwischenziele für 2030 den Weg zur Klimaneutralität bis 2050 aufzeigt.

■ **Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (UBA 2019)**

Die Studie „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“ wurde vom Umweltbundesamt im November 2019 veröffentlicht. Sie beschreibt sechs verschiedene Szenarien, wie Deutschland bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral werden und gleichzeitig seinen Ressourcenbedarf deutlich reduzieren kann. Die sechs Szenarien unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der Geschwindigkeit, in der die Treibhausgasemissionen gesenkt werden, ihrer Rohstoffinanspruchnahme und des Ausmaßes der angenommenen Verhaltensänderungen. Im Gegensatz zu den meisten anderen Szenarien, die in der vorliegenden Metaanalyse betrachtet werden, schließen die Szenarien dieser Studie die Abscheidung und anschließende geologische Speicherung von CO₂ grundsätzlich aus, da das Umweltbundesamt dieses Verfahren als nicht nachhaltig bewertet. Die Unterschiede zwischen den sechs Szenarien sind hinsichtlich der Entwicklungen im Industriesektor vergleichsweise gering. Daher wird in der vorliegenden Studie nur eines der Szenarien für die Metaanalyse ausgewählt, und zwar das Szenario *GreenSupreme*. Dieses sieht eine besonders schnelle Reduktion der Emissionen vor und setzt dafür auch in bedeutendem Maß auf Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen.

■ **Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland (FutureCamp/DECHEMA 2019)**

Die Studie „Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland“ wurde im Oktober 2019 veröffentlicht. Erstellt wurde die Studie von FutureCamp und DECHEMA, im Auftrag vom Verband der Chemischen Industrie (VCI). Im Rahmen der Studie wurden drei Szenarien erarbeitet. Neben dem „Referenzpfad“, der ermittelt, welche Emissionsreduktionen unter derzeitigen Rahmenbedingungen bis 2050

wirtschaftlich realisierbar wären, wird zusätzlich ein „Technologiefad“ sowie ein „Pfad Treibhausgasneutralität 2050“ beschrieben. Im Szenario „Technologiefad“ wird zwar auf neuartige Klimaschutztechnologien gesetzt, jedoch unter der Annahme einer bestimmten Begrenzung hinsichtlich der verfügbaren Menge an klimafreundlichem Strom sowie hinsichtlich der verfügbaren Investitionsvolumina. Im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050*, das in der folgenden Metaanalyse berücksichtigt wird, werden hingegen bei den neuartigen Technologien keine Restriktionen hinsichtlich Kosten, Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit vorgegeben. Dies führt gegenüber dem „Technologiefad“ zu einer schnelleren und bis Mitte des Jahrhunderts weitergehenden Marktdurchdringung dieser Technologien.

■ Industrial Transformation 2050 (Material Economics 2019)

„Industrial Transformation 2050“ ist eine im April 2019 veröffentlichte Studie, die von Material Economics mit Unterstützung des Wuppertal Instituts und dem Institute of European Studies an der Freien Universität Brüssel erarbeitet wurde. Die Studie möchte aufzeigen, wie eine (weitgehend) klimaneutrale Grundstoffindustrie in Europa bis zum Jahr 2050 realisiert werden kann und dass verschiedene Wege dorthin führen können. So werden drei Szenarien mit sehr unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen beschrieben: Das Szenario *New Processes* setzt in hohem Maße auf neue – häufig mit Strom betriebene – industrielle Prozesse. Das Szenario *Circular Economy* legt hingegen einen Schwerpunkt auf die Wiederverwendung von Materialien und eine höhere Materialeffizienz. Und das Szenario *Carbon Capture* weist der Kohlenstoffabscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) eine besonders große Rolle bei der Emissionsreduktion zu. Für die Branchen Stahl, Chemie und Zement werden diese unterschiedlichen Szenarien in der Studie quantifiziert. Alle drei Szenarien erreichen ähnliche und sehr weitgehende Emissionsreduktionen bis zum Jahr 2050 und alle drei Szenarien werden in der folgenden Metaanalyse berücksichtigt.

■ Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonization of Industry (ICF, Fraunhofer ISI 2019a)

Die Studie „Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonization of Industry“ ist im März 2019 erschienen. Sie wurde von ICF und Fraunhofer ISI im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet und beschreibt zwei Referenz- sowie sechs Klimaschutzszenarien für den europäischen Industriesektor. Fünf der sechs Klimaschutzszenarien beschreiben eine Minderung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors um rund 80 % bis 2050 (gegenüber 1990), mit unterschiedlichen technologischen Schwerpunkten. Für die vorliegende Metaanalyse wurde angesichts der definierten Kriterien (s. oben) aber das Szenario „Mix95“ ausgewählt, das als einziges der Szenarien des Berichts eine Minderung der Emissionen der europäischen Industrie um 95 % beschreibt. Diese Studie stellte eine Grundlage dar für die im November 2018 veröffentlichte Mitteilung der Europäischen Kommission „Ein sauberer Planet für alle“, die eine Vision für ein klimaneutrales und wettbewerbsfähiges Europa im Jahr 2050 darstellt.

3 Wesentliche Strategien für ambitionierten Klimaschutz in der Industrie

Im Rahmen der in der Einleitung erwähnten Metaanalyse von Klimaschutzszenarien für die gesamte Industrie (Samadi/Barthel 2020a, 2020b) wurden zehn Strategien in vier übergreifenden Kategorien definiert, die relevante Beiträge zur Emissionsreduktion im Industriesektor leisten können.

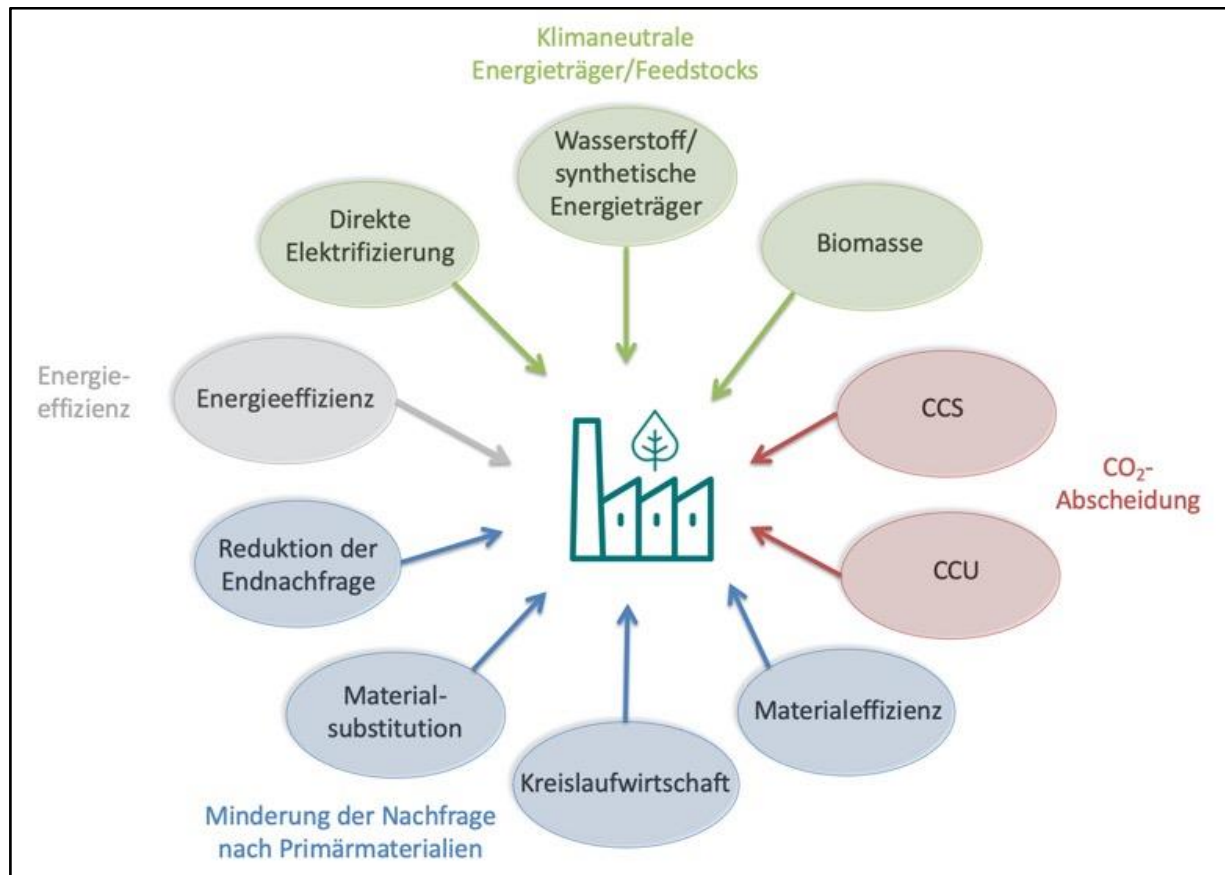


Abbildung 1: Zehn Schlüsselstrategien zur Erreichung von Klimaneutralität in der Industrie

Im Folgenden wird jede dieser zehn Strategien kurz erläutert.¹² Auf Grundlage dieser Strategien werden anschließend in Kapitel 4 die ausgewählten Szenarien – separat für die Branchen Stahl, Chemie und Zement – miteinander verglichen.

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

Es wird erwartet, dass *klimaneutraler Wasserstoff und synthetische Energieträger* eine wichtige Rolle bei der Erzielung tiefgreifender Emissionsminderungen in der Grundstoffindustrie spielen werden. Die Realisierung einer klimaneutralen Primärstahlproduktion kann zum Beispiel den Wasserstoff-Einsatz

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

in Direktreduktionsanlagen erfordern. Zudem könnte Wasserstoff in Zukunft in der chemischen Industrie in großen Mengen als Feedstock genutzt werden. Auch klimaneutrale synthetische Kraftstoffe könnten im industriellen Bereich eine Rolle spielen, entweder als Energieträger oder als Feedstock.

Eine Minderung der Treibhausgasemissionen kann auch durch den Ersatz fossiler Energieträger durch *Biomasse* erreicht werden. Wichtige potenzielle Einsatzgebiete für Biomasse in der Industrie sind die Bereitstellung von Wärme und die Nutzung als Feedstock für die chemische Grundstoffindustrie. Zukünftige Anwendungen können auch die Nutzung von Biomasse in Kombination mit CCS in Industrieanlagen zur Erzielung negativer Emissionen (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) oder ein anteiliger Einsatz von Biomethan als klimaneutraler Kohlenstofflieferant bei der wasserstoffbasierten Stahlproduktion sein. Es ist jedoch zu beachten, dass das nachhaltige Biomassepotenzial begrenzt und in der Höhe umstritten ist.

Die *Steigerung der Energieeffizienz* ist eine wichtige ergänzende Strategie für eine weitgehende Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Industrie. Die Realisierung von Energieeffizienzpotenzialen in Querschnittstechnologien wie Motoren und Pumpen sowie in branchenspezifischen Prozessen kann den Druck zur Nutzung anderer Minderungsstrategien verringern.

Die *Abscheidung und dauerhaften Speicherung von energie- oder prozessbedingtem CO₂ (CCS)* kann prinzipiell an verschiedenen Industrieanlagen eingesetzt werden. Unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit eignen sich für den CCS-Einsatz vor allem solche Anlagen, in denen relativ große Mengen an CO₂ in hoher Konzentration entstehen. Hierzu zählen insbesondere die Standorte der Primärstahlerzeugung sowie die Dampfreformer zur Erzeugung von Wasserstoff auf Erdgasbasis. Auch die Steamcracker der Chemischen Industrie sowie größere Anlagen der Industrie zur Erzeugung von Strom und Wärme sind wichtige Punktquellen für CO₂-Emissionen und könnten mit CCS ausgerüstet werden. CCS könnte zudem für weitgehende Emissionsminderungen bei der Zementherstellung unverzichtbar sein.

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

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

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

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

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

4 Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien in den analysierten Szenarien

In diesem Kapitel wird untersucht, in welchem Maße die ausgewählten Szenarien jeweils auf die in Kapitel 3 unterschiedenen Klimaschutzstrategien setzen. Dabei wird zunächst in Abschnitt 4.1 auf die Stahlindustrie eingegangen, anschließend in Abschnitt 4.2 auf die Zementindustrie und abschließend in Abschnitt 4.3 auf die chemische Industrie.

4.1 Stahlindustrie

In diesem Abschnitt wird dargestellt, in welchem Maße die für die Stahlindustrie ausgewählten Szenarien jeweils auf unterschiedliche zentrale Klimaschutzstrategien setzen. Diese Analyse soll die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Szenarien verdeutlichen.

4.1.1 Einsatz klimaneutraler Energieträger

In diesem Abschnitt werden auf die Entwicklungen der Höhe und Zusammensetzung des Energiebedarfs der Stahlindustrie in den ausgewählten Szenarien eingegangen, mit einem Fokus auf den Einsatz (potenziell) klimaneutraler Energieträger. Dabei wird auf die Verschiebungen der unterschiedlichen Energieträger zwischen dem Basisjahr – je nach Szenario 2015, 2016 oder 2019 – und 2050 fokussiert.

Der Endenergiebedarf der Stahlindustrie nimmt in den kommenden Jahrzehnten in allen betrachteten Szenarien ab (s. Tabelle 3). Die Minderung ist dabei unterschiedlich stark ausgeprägt. Die stärksten Rückgänge weisen die Szenarien *Mix95*, *KN2050* und *Circular Economy* mit je – 49 % auf. Vergleichsweise moderate Rückgänge der Endenergienachfrage (je ca. – 15 %) sind in *New Processes* und *SDS* festzustellen. Im Szenario *Carbon Capture* sinkt der Endenergiebedarf nur sehr geringfügig (– 2 %).

Tabelle 3: Endenergiebedarfsentwicklung nach Energieträgern in der Stahlbranche

Szenario	Geo- grafie	Jahr	Endenergieverbrauch (EEV) (in TWh)					
			Gesamt	Strom	Wasser- stoff	Synfuels	Bio- masse	Fossile und Sonstige ¹³
KN2050 (Agora Energie- wende u. a. 2020)	DE	2016	179	24	0	0	0	155
		2050	92	23	36	0	34	0
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	2016 ¹⁴	179	24	0	0	0	155
		2050	86	39	47	0	0	0
New Processes* (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	528	75	0	0	0	453
		2050	392	178	124	0	43	47
Circular Economy* (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	528	75	0	0	0	453
		2050	271	139	54	0	23	55
Carbon Capture* (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	528	75	0	0	0	453
		2050	520	188	72	0	61	199
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	2015	584	113	0	0	0	471
		2050	298	154	73	37	9	25
SDS (IEA 2020)	Welt	2019	9827	1233	0	0	77	8517
		2050	8420	2466	22 ¹⁵	0	570	5362

*In der Studie von Material Economics wird der „Energemix“ der Stahlbranche aufgeführt. Dieser könnte sich in gewissem Maße von dem in den anderen Studien aufgeführten Endenergieverbrauch unterscheiden, insbesondere hinsichtlich der Einordnung der Stromerzeugung in den Kraftwerken der Stahlindustrie.

In allen betrachteten Szenarien wird ein Rückgang der fossilen Energieträger sowie ein steigender Anteil an (potenziell) klimaneutralen Energieträgern wie Strom, Biomasse und Wasserstoff beschrieben. In den betrachteten europäischen Szenarien und dem globalen Szenario *SDS* wird jedoch auch im Jahr 2050 weiterhin ein nicht unerheblicher Anteil an fossilen Energieträgern eingesetzt. Die für Deutschland erstellten Szenarien *KN2050* und *GreenSupreme* verzichten hingegen im Jahr 2050 komplett auf den Einsatz fossiler Energieträger.

In den nachfolgenden drei Abschnitten wird im Einzelnen für alle sieben untersuchten Szenarien auf die drei (potenziell) klimaneutralen Energieträger Strom, Wasserstoff und Biomasse eingegangen.

¹³ Für die Szenarien *Mix95* und *SDS* werden vor allem für 2050 gewisse Mengen an Fernwärme und (für *Mix95*) auch Umgebungswärme und Müllverwertung separat ausgewiesen und hier als „Sonstige“ mit aufgeführt.

¹⁴ In UBA (2019) werden für den Endenergieverbrauch des Stahlsektors keine Angaben für 2016 gemacht. Die hier aufgeführten Zahlen für 2016 sind daher der Studie von Agora Energiewende u. a. (2020) entnommen.

¹⁵ Es wird in diesem Szenario mehr Wasserstoff im Stahlsektor eingesetzt, als hier ausgewiesen wird. Allerdings wird dieser zusätzliche Wasserstoff im Stahlsektor selbst aus Kohle, Strom und Erdgas gewonnen (genaue Mengen werden in der Studie nicht konkret ausgewiesen). Die Energiebedarfe sind also in den Energiemengen von Kohle, Strom und Erdgas inkludiert.

Strom/Direktelektrifizierung

In der Stahlbranche verzeichnen alle untersuchten Szenarien einen deutlichen Anstieg des Anteils von Strom am Endenergiebedarf. So steigt dieser in den Szenarien von 13 bis 19 % im jeweiligen Basisjahr auf 25 bis 52 % im Jahr 2050 (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Strombedarfsentwicklung in der Stahlbranche

Szenario	Geo- grafie	Basisjahr			2050			Änderung des Strom- bedarfs (2050 vs. Basisjahr)
		EEV gesamt (in TWh)	Strom- einsatz (in TWh)	Anteil von Strom am gesamten EEV	EEV gesamt (in TWh)	Strom- einsatz (in TWh)	Anteil von Strom am gesamten EEV	
KN2050 (Agora Energie- wende u. a. 2020)	DE	179	24	13 %	92	23	25 %	- 4 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	179	24	13 %	86	39	45 %	+ 63 %
New Processes (Material Econo- mics 2019)	EU	528	75	14 %	392	178	45 %	+137 %
Circular Economy (Material Econo- mics 2019)	EU	528	75	14 %	271	139	51 %	+ 85 %
Carbon Capture (Material Econo- mics 2019)	EU	528	75	14 %	520	188	36 %	+ 151 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	584	113	19 % ¹⁶	298	154	52 %	+36 %
SDS ¹⁷ (IEA 2020)	Welt	9827	1233	13 %	8420	2466	29 %	+ 100 %

Dabei sollte erwähnt werden, dass der Strombedarf im Jahr 2050 insgesamt (inkl. des indirekten Strombedarfs) in fast allen Szenarien – mit Ausnahme des Szenarios *Carbon Capture* – noch höher liegt, da in diesen Szenarien für die Produktion von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse zusätzlich bedeutende Mengen an Strom benötigt werden. Der indirekte Strombedarf für die Erzeugung von grünem Wasserstoff wird im nächsten Abschnitt (0) diskutiert. Im *SDS*-Szenario sind allerdings die Strommengen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff in dem in Tabelle 4: Strombedarfsentwicklung in der

¹⁶ Auffällig ist der gegenüber den anderen Szenarien höhere Anteil von Strom am Endenergieverbrauch bereits im Basisjahr, insbesondere gegenüber den Szenarien der Studie von Material Economics (2019), die ebenfalls die EU-28 betrachten. Eine Klärung der Diskrepanz ist im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich. Denkbare Gründe für den Unterschied sind abweichende Definitionen des Energieverbrauchs (s. auch Hinweis unter Tabelle 3) und unterschiedliche Abgrenzungen des Stahlsektors (z. B. hinsichtlich der Berücksichtigung von Kokeereien und Walzwerken).

¹⁷ Bei den Angaben zu diesem Szenario ist zu beachten, dass im Gegensatz zu den anderen Szenarien hier auch der indirekte Strombedarf (für die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff) enthalten ist.

Stahlbranche aufgeführten Strombedarf inkludiert, da sie in der Studie nicht separat ausgewiesen werden. Folglich ist ein Vergleich zwischen dem Szenario *SDS* und den übrigen Szenarien hinsichtlich des zukünftigen Anteils von Strom am Endenergiebedarf nicht sinnvoll.

Das Szenario *Mix95* setzt im Jahr 2050 mit 52 % am Endenergiebedarf stärker auf Strom als direkt eingesetzten Energieträger als die übrigen Szenarien. Das beruht zum einen auf einem gegenüber dem Basisjahr verstärkten Einsatz des Elektrolichtbogenofens in der Sekundär- und Primärstahlproduktion (91 von 154 TWh im Jahr 2050) und zum anderen in der angenommenen Verwendung der stromintensiven Eisenelektrolyse-Route (36 von 154 TWh). Diese Route zur Primärstahlerzeugung wird nur im Szenario *Mix95* eingesetzt. Sie befindet sich derzeit noch in einem frühen Entwicklungsstadium, weshalb die übrigen Szenarien eine Nutzung dieser Route bis Mitte des Jahrhunderts nicht annehmen.

Den stärksten Anstieg des Strombedarfs verzeichnen das Szenario *Carbon Capture* mit rund 150 %, gefolgt von Szenario *New Processes* mit 137 %. In beiden Szenarien ist dieser starke Anstieg neben der verstärkten Nutzung des Elektrolichtbogenofens (EAF) vor allen Dingen auf die starke Durchdringung der Elektrifizierung der Wärmebereitstellung sowie von weiteren Haupt- und Nebenprozessen in der Stahlbranche zurückzuführen. So verdoppelt bis verdreifacht sich in den Szenarien *Carbon Capture* und *New Processes* in etwa die Stromnachfrage für die elektrifizierten Hauptprozesse, z. B. das Sintern von Eisenerz, und die nachgelagerten Prozesse – z. B. die Wärmebereitstellung für das Warmwalzen und Gießen. Auch im Szenario *GreenSupreme* erfolgt eine vollständige Umstellung vom Energieträger Gas auf eine induktive Erwärmung des Walzguts durch den Energieträger Strom.

Szenarioübergreifend ist einer der Haupttreiber des verstärkten Stromeinsatzes der vermehrte EAF-Einsatz. Sowohl in der Sekundär- als auch in der Primärstahlproduktion werden EAF in Kombination mit Direktreduktionsanlagen (DRI-EAF-Route) eingesetzt – DRI steht hierbei für *Direct Reduced Iron*. Eine genauere Betrachtung hinsichtlich der Entwicklung der Anteile der Sekundärstahlproduktion erfolgt in Abschnitt 4.1.4.2 (Kreislaufwirtschaft/Recyclingquoten).

Der Anteil der DRI-EAF-Route an der Primärstahlproduktion ist in den betrachteten Szenarien unterschiedlich stark ausgeprägt. Während in den Szenarien *NE* und *Circular Economy* die Anteile im Jahr 2050 bei ca. 85 % bzw. 67 % liegen, erfolgt im *GreenSupreme*-Szenario die Primärstahlproduktion im Jahr 2050 ausschließlich über die DRI-EAF-Route. Moderater fällt der Einsatz der Route in den Szenarien *SDS* (ca. 20 %), *Mix95* (ca. 33 %) und *Carbon Capture* (ca. 40 %) aus.

Das Szenario *KN2050* benennt zwar die DRI-EAF-Route als eine der beiden Routen für die zukünftige Primärstahlproduktion in Deutschland – die andere ist die DRI-SAF-Route (Kombination aus DRI und einem Schmelzreduktionsofen (SAF)) – jedoch werden keine genauen Anteile der beiden Technologien ausgewiesen. Ein SAF benötigt ebenfalls Strom, jedoch weniger als ein EAF.

Wasserstoff und Synfuels

In der Stahlbranche setzen alle sieben untersuchten Szenarien zukünftig Wasserstoff als neuen Endenergieträger ein. Während in den Basisjahren noch kein Wasserstoff im Endenergieverbrauch (EEV) genutzt wird, steigt sein Anteil in den Szenarien *KN2050*, *GreenSupreme*, *New Processes*, *Circular Economy* und *Mix95* bis 2050 deutlich auf 20 bis 55 % an (s. Tabelle 5).

Tabelle 5: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in der Stahlbranche

Szenario	Geo- grafie	Basisjahr			2050		
		EEV gesamt (in TWh)	Wasser- stoffein- satz (in TWh)	Anteil von Wasserstoff am gesamten EEV	EEV gesamt (in TWh)	Wasser- stoffein- satz (in TWh)	Anteil von Wasserstoff am gesamt- en EEV
KN2050 (Agora Energie- wende u. a. 2020)	DE	179	0	0 %	92	36	39 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	179	0	0 %	86	47	55 %
New Processes (Material Econo- mics 2019)	EU	528	0	0 %	392	124	32 %
Circular Economy (Material Econo- mics 2019)	EU	528	0	0 %	271	54	20 %
Carbon Capture (Material Econo- mics 2019)	EU	528	0	0 %	520	72	14 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	584	0	0 %	298	73	24 %
SDS ¹⁸ (IEA 2020)	Welt	9827	0	0 %	8420	22	0 %

Im Szenario *Carbon Capture* wird in der Stahlbranche hingegen bis 2050 nur ein Wasserstoff-Anteil von 14 % erreicht. Die Hälfte der benötigten Wasserstoffmenge wird dabei über Dampfreformierung mit Erdgas und anschließender CO₂-Abscheidung gedeckt, die andere Hälfte über elektrolytisch erzeugten Wasserstoff. Im globalen Szenario *SDS* werden explizit lediglich 22 TWh Wasserstoff für das Jahr 2050 angegeben. Jedoch wird in dem Szenario weiterer Wasserstoff eingesetzt, der innerhalb der Abgrenzung der Stahlindustrie aus Kohle, Erdgas und Strom gewonnen wird. Da die dafür benötigten Energiemengen in der Studie nicht separat ausgewiesen werden, sondern in den Energiemengen für Kohle, Erdgas und Strom inkludiert sind, ist folglich keine Nachvollziehbarkeit möglich, wie viel Wasserstoff in dem Szenario für die Stahlindustrie genau (und mit welchem Verfahren) erzeugt wird.

Die Nachfrage nach Wasserstoff in der Stahlbranche beruht vor allem auf dem Einsatz des Direktreduktionsverfahrens (DRI) in der Primärstahlproduktion. Während in den Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* die Anteile der DRI-EAF-Route an der Primärstahlproduktion im Jahr 2050 mit 85 % bzw. ca. 67 % bereits sehr hoch sind und in diesen Szenarien 40 bzw. 25 % des Endenergiebedarfs der Stahlbranche über Wasserstoff gedeckt werden, beruht im *GreenSupreme*- und im *KN2050*-Szenario die Primärstahlproduktion zukünftig sogar ausschließlich auf der DRI-EAF- bzw. DRI-SAF-Route. Der

¹⁸ Bei den Angaben zu diesem Szenario ist zu beachten, dass im Gegensatz zu den anderen Szenarien hier nur der extern bezogene Wasserstoffbedarf aufgeführt ist. Es wird deutlich mehr Wasserstoff im Stahlsektor eingesetzt, der innerhalb der Abgrenzung der Stahlindustrie aus Kohle, Erdgas und Strom gewonnen wird. Die entsprechenden Energiemengen werden in der Studie aber nicht ausgewiesen.

Fokus der beiden Szenarien auf diese wasserstoffintensive Primärstahlerzeugung spiegelt sich in den hohen Anteilen von Wasserstoff am Endenergiebedarf (55 % bzw. 39 %) wider.

Etwas moderater fällt der Einsatz der DRI-EAF-Route in den Szenarien *SDS* (ca. 20 % der Primärstahlproduktion), *Mix95* (ca. 33 %) und *Carbon Capture* (ca. 40 %) aus.

Neben der DRI-Route zieht das Szenario *Mix95* im Jahr 2050 mit der Wasserstoffplasma-Schmelzreduktion eine weitere Route zur Primärstahlerzeugung heran, die Wasserstoff benötigt. Aufgrund des frühen derzeitigen Entwicklungsstadiums dieser Route findet der Einsatz jedoch auch im Jahr 2050 lediglich in begrenztem Umfang statt.

Lediglich im Szenario *Mix95* wird bei der Stahlerzeugung neben Wasserstoff auch synthetisches Methan eingesetzt, um bis Mitte des Jahrhunderts den Erdgasbedarf komplett zu ersetzen. In diesem Szenario macht synthetisches Methan im Jahr 2050 rund 12 % des Endenergiebedarfs der Branche aus.

Biomasse

Mit Ausnahme des Szenarios *KN2050* nimmt die Nutzung von Biomasse in der zukünftigen Stahlproduktion im Vergleich zur direkten Elektrifizierung und zum Wasserstoffeinsatz eine untergeordnete Rolle in den Szenarien ein. Außer in *GreenSupreme*, in dem 2050 überhaupt keine Biomasse eingesetzt wird, steigt zwar der Einsatz der Biomasse in den übrigen Szenarien gegenüber dem niedrigen oder nicht vorhandenen Einsatz von Biomasse in den Basisjahren an, die Biomasse-Anteile am Endenergiebedarf bleiben jedoch in diesen Szenarien auch im Jahr 2050 mit 3 bis 12 % relativ gering (s. Tabelle 6).

Tabelle 6: Biomassebedarfsentwicklung in der Stahlbranche

Szenario	Geografie	Basisjahr			2050		
		EEV gesamt (in TWh)	Biomasse-einsatz (in TWh)	Anteil von Biomasse am gesamten EEV	EEV gesamt (in TWh)	Biomasse-einsatz (in TWh)	Anteil von Biomasse am gesamten EEV
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	179	0	0 %	92	34	37 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	179	0	0 %	86	0	0 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	528	0	0 %	392	46	12 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	528	0	0 %	271	28	10 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	528	0	0 %	520	56	11 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	584	0	0 %	298	9	3 %
SDS (IEA 2020)	Welt	9827	77	1 %	8420	570	7 %

Das bereits erwähnte Szenario *KN2050* weist 2050 mit 37 % den mit Abstand höchsten Biomasseanteil am Endenergiebedarf auf. Biomasse wird im Szenario *KN2050* unter anderem als Kohlenstofflieferant für metallurgische Prozesse eingesetzt sowie für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme, z. B. für das Wiedererwärmen des Stahls für das Warmwalzen. Außerdem soll durch Gasifizierung der Biomasse Synthesegas bereitgestellt werden, welches durch Nutzung in Oxyfuel-Öfen sehr reine Abgasströme mit hoher CO₂-Konzentration liefert. An dieser Stelle setzt *KN2050* auf eine CO₂-Abscheidung und eine anschließende Einspeicherung in geologische Speicherstätten (BECCS). Auf diese Weise lassen sich in dem Szenario sogenannte “negative Emissionen” in der Stahlbranche realisieren.

In den drei Szenarien von Material Economics (*New Processes, Circular Economy, Carbon Capture*) wird die Biomasse vor allem als eine Option der möglichst frühzeitigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen der Stahlbranche betrachtet. Hinsichtlich der langfristigen Dekarbonisierung nimmt die Biomasse jedoch lediglich eine Nebenrolle ein, da der Einsatz von Wasserstoff und die Direktelektrifizierung gegenüber einem starken Einsatz von begrenzt verfügbarer Biomasse als aussichtsreicher angesehen werden. Die Biomasse wird in diesen drei Szenarien v. a. in der chemischen Industrie als Feedstock eingesetzt. Ein genauer Einsatz der Biomassemenge nach Anwendungsbereich ist in diesen Szenarien nicht ausgewiesen. Grundsätzlich wird jedoch der Einsatz von vergaster Biomasse in Hochöfen, DRI-Prozessen sowie in der Schmelzreduktion mit CCS (BECCS) erwähnt.

Das Szenario *SDS* setzt 2050 mit einem Biomasseanteil von 7 % am Endenergiebedarf ebenfalls nur vergleichsweise moderat auf Biomasse als zukünftigen Endenergieträger in der Stahlindustrie. Das Szenario sieht den Biomasse-Einsatz vor allem in der Beimischung kleinerer Mengen in bestehende Hochöfen und am ehesten in Regionen mit Zugang zu kostengünstigen Holzkohle-Quellen (z. B. Brasilien).

Vom Szenario *GreenSupreme* abgesehen, dass überhaupt keine Biomasse in der Stahlbranche einsetzt, weist *Mix95* den geringsten Biomasseeinsatz mit einem Endenergie-Anteil von knapp 3 % im Jahr 2050 auf. Der Einsatz der gasifizierten Biomasse erfolgt hier dahingehend, um den im Jahr 2050 noch verbliebenen geringen Erdgasbedarf zu ersetzen.

4.1.2 Energieeffizienz

Alle untersuchten Szenarien nehmen Effizienzsteigerungen bis zum Jahr 2050 an – wobei hier unter Energieeffizienz der Endenergieeinsatz pro erzeugter Tonne Stahl verstanden wird. (Angaben zur spezifischen Effizienz einzelner Prozessrouten finden sich in den meisten betrachteten Szenarien nicht.)

Das Szenario *SDS* weist zwischen Basisjahr und 2050 eine Steigerung der Energieeffizienz um 21 % aus. Das Szenario *GreenSupreme* liegt hier bei ähnlichen 20 %. Im Szenario *Circular Economy*, in dem 2050 ein sehr hoher Anteil von Sekundärstahlerzeugung beschrieben wird, steigt die Energieeffizienz um 42 %. Einen ähnlichen Wert erreichen die Szenarien *KN2050* und *Mix95* mit jeweils 44 %. Im Szenario *New Processes* liegt der Wert bei 27 % und im Szenario *Carbon Capture*, das stark auf CCS setzt und einen relativ geringen Sekundärstahlanteil erreicht, verbessert sich die Energieeffizienz lediglich um 2 %.

4.1.3 Einsatz von CO₂-Abscheidung

Hinsichtlich der zukünftigen Nutzung von CO₂-Abscheidung in der Stahlbranche vermitteln die sieben untersuchten Szenarien ein uneinheitliches Bild. So setzen *GreenSupreme* und *Mix95* überhaupt keine CO₂-Abscheidung im Jahr 2050 an. Demgegenüber stehen mit den drei Szenarien von Material Economics, dem Szenario *KN2050* sowie dem Szenario *SDS* fünf Szenarien, welche in unterschiedlichem Umfang auf CCS bzw. CCU setzen (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Bedeutung der CO₂-Abscheidung

Szenario	Geo- grafie	2050		
		Abgeschie- denes CO ₂ (in Mt/a)	Anteil der CO ₂ - Abscheidung an der CO ₂ -Gesamt- reduktion in der Stahlbranche	Bedeutung der Nutzung des CO ₂ aus der Stahlin- dustrie (CCU)
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	13	19 %	Kein CCU
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	0	0 %	Kein CCU
New Processes (Material Economics 2019)	EU	11	5 %	Keine genauen Angaben
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	16	8 %	Keine genauen Angaben
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	71	34 %	Keine genauen Angaben
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	0	0 %	Kein CCU
SDS (IEA 2020)	Welt	400	30 %	Keine genauen Angaben

CCS

Alle drei Szenarien von Material Economics setzen zur Vermeidung von CO₂-Emissionen in der Stahlindustrie auch auf CO₂-Abscheidung. Das Szenario *Carbon Capture* stellt hierbei mit 34 % abgediehnem CO₂ bezogen auf die insgesamt zwischen Basisjahr und dem Jahr 2050 in der Stahlindustrie reduzierten Emissionen dasjenige Szenario dar, welches am stärksten auf eine CO₂-Abscheidung setzt. In diesem Szenario wird neben der CO₂-Abscheidung an der Hochofen-Konverter-Routen auch bei der Dampfreformierung mit Erdgas CCS genutzt. So sollen 50 % des Wasserstoffs für die DRI-EAF-Routen mit blauem Wasserstoff gedeckt werden – die übrigen 50 % über grünen Wasserstoff.

In den Szenarien *Circular Economy* und *New Processes* nimmt die CO₂-Abscheidung mit 8 % bzw. 5 % abgediehnem CO₂ bezogen auf die insgesamt gegenüber dem Basisjahr reduzierte CO₂-Menge eher eine Nebenrolle ein. Das globale Szenario *SDS* setzt hingegen mit 30 % abgediehnem CO₂ bezogen auf die insgesamt gegenüber dem Basisjahr reduzierte CO₂-Menge am zweitstärksten auf CO₂-Abscheidung. Anders als die übrigen untersuchten Szenarien nimmt es eine große Bandbreite an Primärstahlerzeugungstechnologien mit möglicher CO₂-Abscheidung an: erdgasbasierte Direktreduktionsanlagen, sauerstoffreiche Schmelzreduktion wie auch konventionelle Hochöfen.

In *KN2050* wird CO₂-Abscheidung in biomassebetriebenen Oxyfuel-Öfen mit anschließender geologischer Speicherung als zukünftige CO₂-Senke (BECCS) verwendet. Der Anteil der per CO₂-Abscheidung vermiedenen Emissionen liegt in diesem Szenario bei 19 %. Das abgediehene CO₂ wird einem Pipelinennetz zugeführt, welches dieses zu den vorgesehenen geologischen Speicherstätten führt. Durch die Einspeicherung von biogenem CO₂ erreicht die Stahlbranche in diesem Szenario negative Emissionen.

CCU

Alle drei Szenarien von Material Economics erwähnen CCU, spezifizieren jedoch keine genauen Mengen. Die Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* weisen von vornherein relativ geringe CO₂-Abscheidemengen aus, von denen jeweils der größere Anteil eingespeichert werden soll – hier wird also die Möglichkeit von CCU in geringen Maßen offengelassen. Auch im Szenario *Carbon Capture* ist der Einsatz von CCU begrenzt, da auch hier ein Großteil des abgeschiedenen CO₂ in geologische Speicherstätten eingelagert wird. Konkret werden in diesen drei Szenarien jedoch weder quantitative Angaben zum Umfang der CCU-Nutzung noch die genauen Arten von CCU-Anwendungen erwähnt.

Das globale Szenario *SDS* identifiziert ebenfalls nur einen geringen Bedarf an CCU – der Großteil des abgeschiedenen CO₂ soll geologisch eingespeichert werden. CCU kann nach Ansicht der Autorinnen und Autoren der Studie eine Übergangslösung sein, z. B. für die Produktion von Methanol. Langfristig sehen sie einen kleinen – nicht näher spezifizierten – Anteil an CCU in geschlossenen Kohlenstoffkreisläufen, in denen das inhärente CO₂ der Produkte am Ende des Lebenszyklus wieder abgeschieden wird.

Im Szenario *KN2050* ist nur CCS, nicht jedoch CCU vorgesehen.

4.1.4 Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen

Neben den Optionen einer klimafreundlicheren Produktion von Stahl durch Energieträgerwechsel, Effizienzsteigerungen sowie CCS bietet die Vermeidung von Emissionen durch einen reduzierten Bedarf an Rohstahl eine vierte grundsätzliche Option der Emissionsminderung in der Stahlindustrie. In der folgenden Tabelle 8 sind die Entwicklungen der Rohstahlproduktion in den betrachteten Szenarien abgebildet.

Tabelle 8: Entwicklung der Rohstahlproduktion

Szenario	Geografie	Produktionsmengen Rohstahl im Basisjahr (in Mt)	Produktionsmengen Rohstahl im Jahr 2050 (in Mt)	Prozentuale Entwicklung der Produktionsmenge (2050 vs. Basisjahr)
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	44	40	– 9 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	45	32	– 29 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	169	181	7 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	169	139	– 18 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	169	181	7 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	167	153	– 8 %
SDS (IEA 2020)	Welt	1869	2054	10 %

Vier der sieben Szenarien weisen im Jahr 2050 gegenüber ihren jeweiligen Basisjahren einen Rückgang der Rohstahlproduktion auf. Im Szenario *GreenSupreme* sowie im Szenario *Circular Economy* sind die größten Rückgänge mit etwa 29 bzw. 18 % festzustellen. Die europäischen Szenarien *New Processes* und *Carbon Capture* sowie das globale Szenario *SDS* weisen hingegen mit einem Anstieg von 7 bzw. 10 % eine moderat höhere Nachfrage im Jahr 2050 auf.

Bei dem Vergleich der Entwicklungen der Stahlnachfrage in den Szenarien ist zu bedenken, dass die Stahlnachfrage in Deutschland gegenwärtig deutlich gesättigter ist als im globalen Durchschnitt. Unabhängig von solchen Sättigungstendenzen können aber eine verstärkte Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft, Materialsubstitution und Suffizienz die Nachfrage grundlegend senken bzw. eine Steigerung der Nachfrage gegenüber einer Referenzentwicklung mindern. Nachfolgend wird auf diese vier Strategien zur Minderung des Stahlbedarfs im Einzelnen eingegangen.

Materialeffizienz

In den europäischen Szenarien *New Processes* und *Carbon Capture* werden im Jahr 2050 – gegenüber einer Referenzentwicklung – jeweils 12 Mt Rohstahl durch Materialeffizienz eingespart. Im Szenario *Circular Economy* liegt der Rohstahlbedarf durch Materialeffizienz (inkl. der Auswirkungen neuer Geschäftsmodelle in den Bereichen Bauen und Mobilität) in dem Jahr sogar um 54 Mt unter dem Wert des Referenzszenarios. Potenziale sieht die Studie in Minderungen der Verluste bei der Verarbeitung von Stahl im produzierenden Gewerbe, sowie in einer effizienteren Nutzung von Stahl unter anderem durch Car-Sharing und eine stärkere Nutzung von hochfestem Stahl im Bauwesen.

Mix95 dokumentiert keinen konkreten Wert bzgl. der Materialeffizienzsteigerung, nimmt jedoch eine Verbesserung der Materialeffizienz an, z. B. in Form geringerer Überdimensionierungen im Bauwesen. Eine weitere Möglichkeit zur Minderung des Stahlbedarfs liegt den Autorinnen und Autoren der Studie zufolge in einer Reduktion der Verluste im Verarbeitungsprozess, z. B. durch endkonturnahen Guss.

In *SDS* tragen Materialverbesserungen auf der Angebotsseite sowie verlängerte Lebensdauern von Gebäuden, verbessertes Design und Konstruktion von Gebäuden und der Leichtbau von Fahrzeugen dazu bei, dass die Nachfrage nach Stahl bis 2070 gegenüber einer Referenzentwicklung um rund ein Viertel sinkt. (Ein entsprechender Wert für das Jahr 2050 findet sich in der Studie nicht.)

Im Szenario *GreenSupreme* führen Änderungen auf der Nachfrageseite hin zu mehr Materialeffizienz zu einem Rückgang der Stahlnachfrage. Hierzu gehört eine deutliche Reduktion der Anzahl an Pkw unter anderem durch verstärktes Car- und Ride-Sharing. Diese Änderungen ziehen – zusammen mit der angenommenen teilweisen Substitution von Stahl im Bauwesen – eine Reduktion des Rohstahlbedarfs auf 32 Mt im Jahr 2050 (gegenüber 45 Mt im Basisjahr) nach sich. Allerdings bleibt unklar, wie hoch die Stahlnachfrage ohne die angenommenen Änderungen auf der Nachfrageseite wäre bzw. wie viel Reduktion die einzelnen Einsparungen jeweils erbringen.

Kreislaufwirtschaft/Recycling

Stahl zählt schon jetzt zu den am stärksten im Kreis geführten Stoffen der Welt. Die Recyclingquoten sind dabei eng mit der Sekundärstahlerzeugung, in der Stahlschrott eingeschmolzen wird, verknüpft. Allerdings wird Stahlschrott auch in andere Regionen verkauft und kann zukünftig vermehrt in EAF beigemischt werden, die für die Primärstahlproduktion eingesetzt werden. So wird das Aufkommen an Stahlschrott in den Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* mit 122 Mt bzw. 111 Mt höher angenommen als die eigentliche Rohstahlproduktion über die Sekundärstahlroute. In *GreenSupreme* steigt das Schrottaufkommen von aktuell 45 % der Rohstahlproduktion bis 2050 auf 67 %.

Die übrigen Szenarien weisen keine konkreten Angaben zum erwarteten Stahlschrottaufkommen aus. Im Folgenden werden die Szenarien daher in Hinblick auf ihre Sekundärstahlproduktion betrachtet (s. Tabelle 9). Die untersuchten deutschen und europäischen Szenarien nehmen eine Steigerung der Sekundärstahlproduktion an der Gesamtproduktion von 28 % (Deutschland) bzw. 40 bis 41 % (Europa) im Basisjahr auf 50 bis 70 % im Jahr 2050 an. Im globalen Szenario *SDS* steigt der Anteil der Sekundärstahlerzeugung an der Gesamtproduktion von 17 % im Basisjahr auf 39 % im Jahr 2050.

Tabelle 9: Entwicklung der Anteile der Sekundärstahlroute an der Rohstahlproduktion

Szenario	Anteil in der Sekundärstahlproduktion im Basisjahr	Anteil in der Sekundärstahlproduktion im Jahr 2050
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	28 %	50 %
GreenSupreme (UBA 2019)	28 %	60 %
New Processes (Material Economics 2019)	41 %	60 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	41 %	70 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	41 %	50 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	40 %	67 %
SDS (IEA 2020)	17 %	39 %

Materialsubstitution

Nur *Mix95* und *GreenSupreme* erwähnen, dass eine Stahlsubstitution in gewissem Maße angenommen wird. Beispielhaft wird in *Mix95* der Einsatz von Aluminium und Kohlefaser im Automobilbereich sowie die Verwendung von biomassebasierten Produkten im Bauwesen genannt. In *GreenSupreme* wird ein stärkerer Einsatz nachhaltig produzierter nachwachsender Rohstoffe beim Bauen angenommen, wodurch der Stahleinsatz (wie auch der Betoneinsatz) reduziert werden kann. Konkrete Angaben hinsichtlich der dadurch erreichten Einsparungen an Stahl oder CO₂ finden sich in der Studie aber nicht.

Nachfragereduzierung im Endverbrauch

Abgesehen von gewissen Verhaltensänderungen, die mit Konzepten wie Car-Sharing, Ride-Sharing und einer stärkeren Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel einhergehen – hier aber aufgrund einer durch diese Maßnahmen nicht grundsätzlich eingeschränkten Mobilität in den Bereich „Materialeffizienz“ eingeordnet werden, nehmen die meisten der betrachteten Szenarien keine weitgehenden Verhaltensänderungen bzw. suffizienteren Lebensstile an, die zu einer Minderung (unter anderem) der Stahlnachfrage führen könnten. Eine Ausnahme stellt das Szenario *GreenSupreme* dar, das gegenüber einer Referenzentwicklung explizit eine Minderung der Pro-Kopf-Wohnfläche sowie die Vermeidung eines Teils des Personenverkehrs unterstellt. Durch die damit einhergehende Reduktion der Nachfrage nach Fahrzeugen, Gebäuden und Infrastruktur kann auch die Stahlnachfrage reduziert werden.

4.2 Zementindustrie

In diesem Abschnitt wird dargestellt, in welchem Maße die für die Zementindustrie ausgewählten Szenarien jeweils auf unterschiedliche zentrale Klimaschutzstrategien setzen. Diese Analyse soll die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Szenarien verdeutlichen.

4.2.1 Einsatz klimaneutraler Energieträger

In diesem Abschnitt wird auf die Entwicklung der Höhe und Zusammensetzung des Energiebedarfs der Zementindustrie in den ausgewählten Szenarien eingegangen, mit einem besonderen Fokus auf den Einsatz (potenziell) klimaneutraler Energieträger. Dabei wird auf die Verschiebungen der unterschiedlichen Energieträger zwischen dem Basisjahr – je nach Szenario 2015, 2016, 2017 oder 2019 – und dem Jahr 2050 fokussiert (s. Tabelle 10).

Tabelle 10: Endenergieverbrauch der Zementproduktion

Szenario	Geo- grafie	Jahr	Endenergieverbrauch (in TWh)						
			Ge- samt	Strom	Wasser- stoff	Syn- fuels	Bio- masse ¹⁹	Abfall (fossil)	Fossile (außer Abfall)
KN2050 (Agora Energie- wende u. a. 2020)	DE	2016	29	4	0	0	6	11	9
		2050	24	5	0	0	7	11	0
Klimaneutralität (VDZ 2020)	DE	2019	30	4	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
		2050	k. A.	5	k. A. ²⁰	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	2016	28	3	0	0	15		10
		2050	12	3	0	9	0	0	0
2050 roadmap (Cembureau 2020)	EU	2017	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
		2050	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
New Processes (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	148	19	0	0	19	38	72
		2050	106	106	0	0	0	0	0
Circular Economy (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	148	19	0	0	19	38	72
		2050	78	54	0	0	4	7	13
Carbon Capture (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	148	19	0	0	19	38	72
		2050	132	44	0	0	13	27	48
SDS (IEA 2020)	Welt	2019	3280	427	0	0	107	142	2609
		2050	2609	427	0	0	297	119	2634

¹⁹ Biomasse inklusive biogenem Anteil in Ersatzbrennstoffen.

²⁰ Laut Studie macht der Wasserstoffbedarf in diesem Szenario Mitte des Jahrhunderts 10 % des gesamten Brennstoffbedarfs der Zementindustrie aus.

Der Endenergiebedarf der Zementindustrie nimmt in allen betrachteten Szenarien, für die entsprechende Zahlen vorliegen, zwischen dem Basisjahr und dem Jahr 2050 ab. Allerdings unterscheidet sich das Ausmaß der angenommenen Reduktion erheblich. So unterstellt *GreenSupreme* mit einem Rückgang um 58 % den stärksten Rückgang, während die Reduktion im Szenario *SDS* mit nur einem Prozent lediglich marginal ausfällt. Die Annahmen der übrigen Szenarien bewegen sich in Rückgängen des Endenergieverbrauchs zwischen 11 und 47 %.

In den Szenarien ist eine Tendenz weg von emissionsintensiven Energieträgern – vor allem Kohle – hin zu emissionsarmen bis klimaneutralen Alternativen erkennbar. Kohle, Erdgas und Öl spielen in den deutschen Szenarien langfristig überhaupt keine Rolle mehr, wengleich zum Teil nach wie vor auch Abfall mit fossiler Herkunft als Ersatzbrennstoff eingesetzt wird. Demgegenüber stehen die Szenarien mit europäischem und globalem Fokus, welche zum Teil auch im Jahr 2050 noch erhebliche Mengen fossiler Energieträger für die Zementproduktion vorsehen. So spielt Kohle im Szenario *Carbon Capture* auch langfristig eine wesentliche Rolle und im globalen Szenario *SDS* steigt der absolute Einsatz von Erdgas und Öl sogar. Beide Szenarien setzen daher entsprechend stark auf CCS, um trotz der anhaltenden Nutzung fossiler Energieträger weitgehende Emissionsminderungen erzielen zu können. In den meisten der betrachteten Szenarien lässt sich jedoch ein Trend hin zu einem verstärkten Einsatz von Strom und/oder Biomasse und weg von fossilen Energieträgern erkennen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die acht in Tabelle 10 dargestellten Szenarien näher auf den Einsatz der potentiell klimaneutralen Energieträger Strom, Wasserstoff und Biomasse untersucht.

Strom/Direktelektrifizierung

Ein verstärkter Einsatz von Strom spielt in den meisten betrachteten Szenarien eine wesentliche Rolle bei der weitgehenden Reduktion der CO₂-Emissionen der Zementindustrie. Dabei nimmt sowohl der relative Anteil von Strom am Endenergieverbrauch zu als auch dessen absolut eingesetzte Menge. Die beiden zentralen Treiber hinter dieser Entwicklung sind

- der Einsatz von Technologien zur CO₂-Abtrennung (CCS), welche in fast allen quantitativen Szenarien (außer in *GreenSupreme*) vorgesehen sind (s. Abschnitt 4.2.3), sowie
- die Elektrifizierung von Zementöfen, welche lediglich in den zwei Szenarien *New Processes* (vollständig) und *Circular Economy* (teilweise) unterstellt wird.

Fast alle Szenarien erwarten zukünftig einen Bedeutungszuwachs von Strom (s. Tabelle 11). Mit Ausnahme des Szenarios *SDS* steigt der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch in den Szenarien von 12 bis 13 % (Basisjahr) auf 22 bis 100 % im Jahr 2050. Dabei zeigen diejenigen Szenarien, die nicht auf eine Elektrifizierung von Zementöfen setzen, aber einen Einsatz von CCS-Technologien vorsehen, eine Erhöhung der eingesetzten absoluten Strommengen in der Zementbranche von 36 % (*Klimaneutralität*) bis 132 % (*Carbon Capture*) gegenüber dem Basisjahr. Die Steigerungen des Strombedarfs sind in denjenigen Szenarien mit Elektrifizierungsstrategie noch deutlich höher. So wird im Szenario *New Processes*, das eine vollständige Elektrifizierung aller Zementöfen in Europa vorsieht, bis zum Jahr 2050 gegenüber heute die fünffache Menge an Strom für die Zementproduktion benötigt. Damit einhergehend entfällt der Brennstoffbedarf vollständig. Die meisten der betrachteten Szenarien sehen jedoch wegen vermuteter technologischer Hürden und des hohen Strombedarfs entweder gar keine oder nur eine teilweise Elektrifizierung von Zementöfen vor und antizipieren erhöhte Strombedarfe in erster Linie aufgrund von CO₂-Abtrennungen, insbesondere mit Blick auf die Oxyfuel-Technologie.

Tabelle 11: Bedeutung von Strom im Endenergieverbrauch der Zementproduktion

Szenario	Geo- grafie	Basisjahr			2050			Änderung des Strom- bedarfs (2050 vs. Basisjahr)
		EEV gesamt (in TWh)	Strom- einsatz (in TWh)	Anteil von Strom am gesamten EEV	EEV gesamt (in TWh)	Strom- einsatz (in TWh)	Anteil von Strom am gesamten EEV	
KN2050 (Agora Energie- wende u. a. 2020)	DE	29	4	13 %	24	5	22 %	+ 47 %
Klimaneutralität (VDZ 2020)	DE	30	4	13 %	k. A.	5	k. A.	+ 36 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	28	3	12 %	12	3	25 %	- 12 %
2050 roadmap (Cembureau 2020)	EU	k. A.	k. A.	13 %	k. A.	k. A.	26 %	k. A.
New Processes (Material Econo- mics 2019)	EU	148	19	13 %	106	106	100 %	+ 458 %
Circular Economy (Material Econo- mics 2019)	EU	148	19	13 %	78	54	69 %	+ 184 %
Carbon Capture (Material Econo- mics 2019)	EU	148	19	13 %	132	44	33 %	+ 132 %
SDS (IEA 2020)	Welt	3280	427	13 %	3245	427	13 %	0 %

Eine Ausnahme bildet das Szenario *SDS*, das keine erhöhte Relevanz von Strom für die Zementproduktion beschreibt. Zwar spielt CCS auch hier eine wichtige Rolle (s. Abschnitt 4.2.3), allerdings wird angenommen, dass für die Abtrennung Verfahren der chemischen Absorption eingesetzt werden, die insbesondere thermische Energie benötigen. Eine Elektrifizierung von Zementöfen findet im Szenario *SDS* nicht statt. *GreenSupreme* geht sogar von einem insgesamt rückläufigen Strombedarf aus, da weder ein CCS-Einsatz vorgesehen ist, noch weitergehende Elektrifizierungsmaßnahmen unterstellt werden. Gleichzeitig wird von sehr hohen elektrischen Effizienzgewinnen ausgegangen, welche einerseits bei der konventionellen Zementproduktion realisiert werden, andererseits aber auch aus dem angenommenen massiven Einsatz alternativer Bindemittel mit deutlich geringerem Strombedarf resultieren.²¹

²¹ In Vorgriff auf den nachfolgenden Abschnitt sei jedoch angemerkt, dass im Szenario *GreenSupreme* der gesamte Brennstoffbedarf aus importiertem synthetischem Methan abgedeckt wird, deren stromintensive Erzeugung in der Studie aber nicht Eingang in die Bilanzgrenze der Zementproduktion findet. Dies gilt auch für in der Studie diskutierten CCU-Anwendungen, die zwar als durchaus stromintensiv gekennzeichnet sind, deren (nicht quantifizierter) Bedarf jedoch dem Umwandlungssektor zugeschrieben wird.

Wasserstoff und Synfuels

Wie in Tabelle 10 ersichtlich, spielt ein zukünftiger Einsatz von Wasserstoff oder synthetischen Brennstoffen in den meisten betrachteten Szenarien keine Rolle bei der Reduktion der CO₂-Emissionen der Zementindustrie. Ausnahmen bilden die Szenario *GreenSupreme*, in dem 2050 der gesamte thermische Energiebedarf durch (importiertes) synthetisches Methan gedeckt wird sowie das Szenario *Klimaneutralität*, in dem Wasserstoff Mitte des Jahrhunderts 10 % des Brennstoffbedarfs ausmacht. Auch in *2050 roadmap* wird 2050 ein gewisser Einsatz von Wasserstoff angenommen, jedoch nicht quantifiziert.

Biomasse

Wie in Tabelle 12 dargestellt, unterscheidet sich die Bedeutung der Biomasse in der Zementproduktion in den betrachteten Szenarien im Jahr 2050 deutlich.

Tabelle 12: Bedeutung von Biomasse im Endenergieverbrauch der Zementproduktion

Szenario	Geo- grafie	Basisjahr			2050			Änderung des Bio- massebe- darfs (2050 vs. Basisjahr)
		EEV gesamt (in TWh)	Bio- masse- einsatz ²² (in TWh)	Anteil von Biomasse am gesam- ten EEV	EEV gesamt (in TWh)	Bio- masse- einsatz (in TWh)	Anteil von Biomasse am gesam- ten EEV	
KN2050 (Agora Energie- wende u. a. 2020)	DE	29	5,5	19 %	24	7	31 %	+ 33 %
Klimaneutralität (VDZ 2020)	DE	30	5	18 %	k. A.	k. A.	k. A. ²³	k. A.
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	28	k. A. ²⁴	k. A.	12	0	0 %	- 100 %
2050 roadmap (Cembureau 2020)	EU	k. A.	k. A.	7 %	k. A.	k. A.	33 %	k. A.
New Processes (Material Econo- mics 2019)	EU	148	19	13 %	106	0	0	- 100 %
Circular Economy (Material Econo- mics 2019)	EU	148	19	13 %	78	4	5 %	- 79 %
Carbon Capture (Material Econo- mics 2019)	EU	148	19	13 %	132	13	10 %	- 32 %
SDS (IEA 2020)	Welt	3280	107	3 %	3245	297	9 %	+ 178 %

²² Biomasse inklusive biogenem Anteil in abfallstämmigen Ersatzbrennstoffen.

²³ Aus der Studie lässt sich entnehmen, dass Biomasse (in Form von biogenem Abfall) in dem Szenario im Jahr 2050 einen Anteil am gesamten Brennstoffbedarf von rund 32 % hat.

²⁴ Der Einsatz von alternativen Brennstoffen beläuft sich in *GreenSupreme* insgesamt auf 14,7 TWh im Basisjahr, der biogene Anteil ist in der Studie jedoch nicht angegeben.

In vier der acht betrachteten Szenarien (*KN2050*, *2050 roadmap*, *Klimaneutralität*, *SDS*) gewinnt die thermische Verwendung von Biomasse stark an Bedeutung. Dies erfolgt vor allem über die Zufeuerung abfallstämmiger Ersatzbrennstoffe, deren Einsatz insgesamt deutlich zunimmt und die zudem immer höhere biogene Anteile aufweisen. So sehen die Szenarien *Klimaneutralität* und *2050 roadmap* vor, dass Mitte des Jahrhunderts 90 % des thermischen Energiebedarfs über alternative Brennstoffe gedeckt werden, mit einem biogenen Anteil von 35 bzw. 50 %. In den Szenarien *Klimaneutralität* und *KN2050* wird der Einsatz fester oder gasförmiger Biomasse zudem mit CCS kombiniert (BECCS), um auf diese Weise negative Emissionen zu generieren.

In den vier Szenarien *GreenSupreme*, *New Processes*, *Circular Economy* und *Carbon Capture* wird 2050 entweder gar kein oder zumindest ein rückläufiger Einsatz von Biomasse vorgesehen. Die Gründe hierfür sind unterschiedlich: So entfällt in *New Processes* wegen der Elektrifizierung sämtlicher Zementöfen der Bedarf an Brennstoffen und damit auch an Biomasse. Auch in *Circular Economy* findet zumindest eine Teilelektrifizierung statt und zudem werden in diesem Szenario ambitionierte Fortschritte bei der Materialeffizienz angenommen, die den Brennstoffbedarf zusätzlich reduzieren. Das Szenario *GreenSupreme* stellt hingegen generell die Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit biomassebasierter Brennstoffe in Frage und schließt daher den Einsatz von Biomasse als Strategie zur Minderung der CO₂-Emissionen der Zementindustrie aus.

4.2.2 Energieeffizienz

Wie in Tabelle 13 ersichtlich, gehen die meisten betrachteten Szenarien bis 2050 von moderaten Steigerungen der thermischen Effizienz der Zementherstellung aus.²⁵ Sie verweisen dabei teilweise auf den grundsätzlich bereits hohen energetischen Standard der bestehenden Zementwerke. Die realisierbaren Potentiale zur Verbesserung der thermischen Energieeffizienz werden in den Szenarien bis zum Jahr 2050 typischerweise auf zwischen 6 und 14 % geschätzt. Eine Ausnahme von dieser Einschätzung bildet das Szenario *GreenSupreme*. Diesem Szenario zufolge sind deutschlandweit Effizienzsteigerungen in Höhe von 30 % (thermisch) und 40 % (elektrisch) möglich, was einerseits mit linearen Verbesserungen in der konventionellen Produktionstechnik, andererseits aber auch durch einen angenommenen massiven Einsatz neuer hocheffizienter Bindemittel begründet wird.

²⁵ Kaum eines der betrachteten Szenarien liefert Angaben zu den angenommenen elektrischen Effizienzgewinnen. Eine rechnerische Ableitung dieser Werte auf Basis der Angaben der Studien ist aufgrund der in den Szenarien vorgesehenen Änderungen der Produktionsprozesse (CCS sowie Elektrifizierung) nicht sinnvoll möglich.

Tabelle 13: Energieeffizienzgewinne bei der Zementproduktion

Szenario	Geografie	2050
		Effizienzgewinne thermisch (gegenüber dem jeweiligen Basisjahr)
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	6 %
Klimaneutralität (VDZ 2020)	DE	13 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	30 %
2050 roadmap (Cembureau 2020)	EU	14 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	10 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	10 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	10 %
SDS (IEA 2020)	Welt	k. A.

4.2.3 Einsatz von CO₂-Abscheidung

In diesem Abschnitt wird auf die Relevanz von CO₂-Abscheidung für eine weitgehende Reduktion der CO₂-Emissionen der Zementindustrie eingegangen. Darunter fällt sowohl die langfristige geologische Einspeicherung des CO₂ (CCS) als auch dessen Weiternutzung in Produkten (Carbon Capture and Utilization, CCU). Tabelle 14 bietet zunächst einen Überblick über die in den Szenarien abgeschiedenen CO₂-Mengen im Jahr 2050 sowie deren Anteil an der Gesamtreduktion, welcher das Verhältnis zwischen der abgeschiedenen Menge CO₂ und der absoluten Emissionsminderung in der Zementbranche vom Basisjahr bis 2050 wiedergibt. Wie hier ersichtlich ist, spielt die Abscheidung von CO₂ in fast allen Szenarien – mit Ausnahme des Szenarios *GreenSupreme* – eine entscheidende Rolle und weist Anteile an der Gesamtreduktion zwischen 20 und 83 % auf.

In den meisten der betrachteten Studien wird dabei nicht unterschieden, welche Mengen für CCS und welche für CCU vorgesehen sind. Aufgrund der dargestellten Quantitäten und der begrenzten Potenziale von CCU (insbesondere in einer klimaneutralen Zukunft) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der größte Teil geologisch eingelagert werden muss. In den folgenden Abschnitten wird kurz gesondert auf die Aspekte CCS/CCU eingegangen.

Tabelle 14: Einsatz von CO₂-Abscheidung in der Zementindustrie im Jahr 2050

Szenario	Geo- grafie	2050		
		Abgeschie- denes CO ₂ pro Jahr (in Mt)	Anteil der CO ₂ -Ab- scheidung an der CO ₂ - Gesamtreduktion in der Zementbranche	Bedeutung der Nutzung des CO ₂ aus der Zementin- dustrie (CCU)
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	13	71 %	Kein CCU
Klimaneutralität (VDZ 2020)	DE	10	48 %	Keine genauen An- gaben
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	0	0 %	Kein CCU ²⁶
2050 roadmap (Cembureau 2020)	EU	k. A. ²⁷	42 %	Keine genauen An- gaben
New Processes (Material Economics 2019)	EU	35	32 %	Keine genauen An- gaben
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	31	28 %	Keine genauen An- gaben
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	85	78 %	Keine genauen An- gaben
SDS (IEA 2020)	Welt	1450	83 %	Keine genauen An- gaben

CCS

CCS wird in allen betrachteten Szenarien – mit Ausnahme von *GreenSupreme* – als wichtige, vielfach sogar als ganz zentrale Voraussetzung für eine sehr weitgehende Minderung der CO₂-Emissionen der Zementindustrie dargestellt. Die meisten der Studien beschreiben unterschiedliche denkbare Abscheideverfahren, nicht alle legen sich jedoch auf eine oder mehrere konkrete Technologien fest. Entsprechende Festlegungen gibt es nur in den Szenarien *KN2050* (100 % Oxyfuel-Verfahren), *Carbon Capture* (10 % „Direct Separation“-Verfahren, 90 % Oxyfuel-Verfahren) und *New Processes* (100 % „Direct Separation“-Verfahren). Die beiden Szenarien *Klimaneutralität* und *KN2050* gehen zudem von der Realisierung negativer Emissionen durch die Kombination der Zufeuerung von Biomasse mit CCS (BECCS) aus.

Fast alle betrachteten Studien (mit Ausnahme von *GreenSupreme*) verweisen im Zusammenhang mit CCS auf die dringende Notwendigkeit einer CO₂-Pipeline-Infrastruktur, die von den Zementwerken bis hin zu geeigneten CO₂-Speichern verläuft.

²⁶ Die Möglichkeit der Nutzung von CO₂ aus der Zementindustrie z. B. für die Herstellung synthetischer Energieträger wird in UBA (2019) zwar grundsätzlich angesprochen, ist dort jedoch nicht weiter konkretisiert und quantifiziert. Daher wird an dieser Stelle angenommen, dass in dem Szenario keine Nutzung von CO₂ angenommen wird.

²⁷ Das Szenario *2050 roadmap* gibt lediglich die spezifische Abscheidemenge (0,28 Tonnen CO₂ pro Tonne Zement) sowie den relativen Anteil von CCS/CCU an der Gesamtreduktion an.

CCU

Die Nutzung des aus der Zementproduktion abgetrennten CO₂ wird in den meisten Studien als Option thematisiert, ist jedoch in keinem der Szenarien mit näheren Angaben versehen oder quantifiziert.

4.2.4 Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen

Neben einem Wechsel der Energieträger, einer Steigerung der Energieeffizienz und einer Abscheidung von CO₂ aus dem Produktionsprozess kann auch die Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen einen wichtigen Hebel bei der Erreichung weitgehender CO₂-Minderungen in der Grundstoffindustrie darstellen. Mit Blick auf die Zementindustrie ergeben sich viele Ansatzpunkte über die gesamte Wertschöpfungskette, die in den folgenden Abschnitten differenziert dargestellt werden.

Die folgende Tabelle 15 gibt zunächst einen Überblick über die in den betrachteten Szenarien antizipierten Produktionsvolumina von Zement. Die meisten Szenarien mit quantitativen Mengenangaben gehen davon aus, dass sich langfristig signifikante Einsparungen im Zementbedarf ergeben. Die Szenarien *Klimaneutralität*, *KN2050*, *New Processes* und *SDS* rechnen hier mit Reduktionen von 9 bis 18 % gegenüber der gegenwärtigen Nachfrage. *Circular Economy* sieht durch intensive Bestrebungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft Einsparmöglichkeiten von 38 % und *GreenSupreme* sogar von 47 %. Das Szenario *Carbon Capture*, das stark auf die CO₂-Abscheidung fokussiert, nimmt in dem Zeitraum lediglich eine marginale Reduktion des Zementbedarfs um 1 % an.

Tabelle 15: Entwicklung der Produktionsmengen von Zement

Szenario	Geografie	Produktionsvolumen		
		Basisjahr (in Mt)	2050 (in Mt)	Änderung (2050 vs. Basisjahr)
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	33	27	– 18 %
Klimaneutralität (VDZ 2020)	DE	34	29	– 15 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	31	16	– 47 %
2050 roadmap (Cembureau 2020)	EU	k. A.	k. A.	k. A.
New Processes (Material Economics 2019)	EU	167	144	– 14 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	167	103	– 38 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	167	165	– 1 %
SDS (IEA 2020)	Welt	4118	3742 ²⁸	– 9 %

²⁸ In der Studie findet sich kein Wert für 2050, daher wurde der hier angegebene Wert über eine lineare Interpolation auf Grundlage der Angaben für das Basisjahr 2019 (4118 Mt) und das Jahr 2070 (3500 Mt) abgeschätzt.

Materialeffizienz

Alle betrachteten Szenarien gehen davon aus, dass sich zukünftig insbesondere in nachgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette – v. a. in der Baubranche – hohe Potentiale für Materialeffizienz erschließen lassen werden. Die betrachteten Studien weisen jedoch bezüglich der in den Szenarien angenommenen Realisierung dieser Potentiale eine Vielzahl unterschiedlicher, nicht direkt miteinander vergleichbare Kenngrößen aus.

So wird im Szenario *KN2050* davon ausgegangen, dass sich durch einen effizienteren Umgang mit Zement und Beton rund 22 % der heutigen CO₂-Emissionen der Zementindustrie vermeiden ließen. Nach dem Szenario *Circular Economy* könnten durch Materialeffizienz – gegenüber einer Referenzentwicklung – europaweit 65 TWh Energie einsparen. Dies entspricht nahezu der Hälfte des Endenergiebedarfs der europäischen Zementindustrie im Basisjahr. In den zwei weiteren Szenarien der Studie von *Material Economics*, *New Processes* und *Carbon Capture* betragen die Einsparungen durch Materialeffizienz im Jahr 2050 35 bzw. 15 TWh. Das Szenario *2050 roadmap* antizipiert, dass sich bis 2050 durch Fortschritte in der Bautechnik gegenüber dem Basisjahr auf 10 bis 30 % des eingesetzten Zements verzichten ließe. *SDS* verweist ebenfalls auf Optimierungspotentiale im Gebäudedesign, um möglichst wenig Material einsetzen zu müssen, liefert jedoch keine Quantifizierung. Das Szenario *SDS* betont außerdem die Notwendigkeit hoher Sanierungsraten, um die Lebenszeit von Gebäuden zu verlängern und so die Neubauaktivität zu dämpfen.

Kreislaufwirtschaft/Recycling

Die meisten betrachteten Szenarien nehmen offenbar kein Recycling von Beton an. Nur die Szenarien *KN2050* und *2050 roadmap* unterstellen in begrenztem Maße ein solches Recycling bis zum Jahr 2050. Beide Szenarien verweisen auf die Möglichkeit, Teile von Abbruchbeton als Klinkersubstitut in neuem Beton zu nutzen.

Materialsstitution

Insbesondere die Substitution von Klinker stellt eine relevante CO₂-Minderungsstrategie dar, da dessen Herstellung generell für einen Großteil der Klimawirkung der Zementproduktion verantwortlich ist und hier auch die schwer vermeidbaren prozessbedingtem CO₂-Emissionen anfallen. Inwieweit der Klinkerfaktor zukünftig jedoch weiter reduziert werden kann, wird in den betrachteten Studien unterschiedlich eingeschätzt. Einen Überblick hierzu gibt zunächst Tabelle 16.

Tabelle 16: Entwicklung des Klinkerfaktors

Szenario	Geografie	Klinkerfaktor	
		Basisjahr	2050
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	73 %	68 %
Klimaneutralität (VDZ 2020)	DE	71 %	53 %
GreenSupreme (UBA 2019)	DE	77 %	90 %
2050 roadmap (Cembureau 2020)	EU	77 %	65 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	k. A.	k. A.
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	k. A.	k. A.
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	k. A.	k. A.
SDS (IEA 2020)	Welt	71 %	58 %

Einige der betrachteten Szenarien halten sehr weitgehende Substitutionen von Klinker für plausibel. Das Szenario *Klimaneutralität* geht hier von einer Reduktion um 18 Prozentpunkte aus, wodurch sich jährlich 2,2 Mt CO₂ einsparen ließen. Auch die Szenarien *SDS* und *2050 roadmap* zeigen sich ambitioniert und halten eine Reduktion um 13 bzw. 12 Prozentpunkte für möglich. Diese Szenarien benennen unter anderem kalzinierte Tone und ungebrannten Kalkstein als neue Substitute für Klinker. *KN2050* ist an dieser Stelle etwas weniger optimistisch und geht von einer Verringerung des Klinkeranteils von lediglich 5 Prozentpunkten aus. Begründet wird dies mit den im Zeitverlauf im Szenario wegfallenden konventionellen Klinkersubstituten wie Hüttensand aus der Stahlindustrie und Flugasche aus der Kohleverstromung. Dieser Wegfall ließe sich durch Fortschritte in der Entwicklung neuer Zementstoffs und im Bereich der Betontechnik nur bis zu einem gewissen Grad überkompensieren. Den Wegfall heutiger Klinkeralternativen greift auch *GreenSupreme* auf, kommt jedoch zu einem anderen Schluss. Als einziges Szenario *erhöht* sich hier der Klinkerfaktor um 13 Prozentpunkte auf insgesamt 90 %. Die drei Szenarien der Studie von Material Economics geben zur Substitution von Klinker nur qualitative Einschätzungen („mittel“ in *New Processes*, „hoch“ in *Circular Economy* und „niedrig“ in *Carbon Capture*).

Die Entwicklung alternativer Bindemittel zur teilweisen Substitution von konventionellem Zement wird in den meisten Szenarien ebenfalls diskutiert. Das Szenario *2050 roadmap* sieht die Möglichkeit, durch eine solche Substitution rund 10 % der CO₂-Emissionen einzusparen. Im Szenario *Klimaneutralität* wird der Beitrag alternativer Bindemittel zur CO₂-Reduktion gering eingeschätzt, da hier davon ausgegangen wird, dass diese Portlandzementklinker auch bis 2050 nur zu maximal 5 % werden ersetzt können. In *GreenSupreme* wird hingegen davon ausgegangen, dass alternative Bindemittel bis 2050 Marktanteile von 50 % erreichen werden. Andere Szenarien, wie *SDS*, zeigen sich hier weniger optimistisch und verweisen auf die vielfältigen Herausforderungen für deren großmaßstäbliche Anwendung.

Die Szenarien *KN2050* und *GreenSupreme* verweisen zudem auf die Möglichkeit, durch Holzbau eine Alternative zum klassischen Betonbau zu schaffen und dadurch die vorgelagerte Zementnachfrage zu reduzieren. *KN2050* sieht hierdurch bis zum Jahr 2050 Einsparmöglichkeiten in Höhe von 1 Mt CO₂. *GreenSupreme* antizipiert eine sehr starke Zunahme von Holzbau. Dieser erreicht bei Ein- und Zweifamilienhäusern bis zum Jahr 2050 einen Anteil von 80 % (gegenüber gegenwärtig 15 %) und bei Mehrfamilienhäusern von 45 % (gegenüber gegenwärtig 2 %). *GreenSupreme* sieht darüber hinaus auch die Möglichkeit, bis 2050 20 % des klassischen Stahlbetons durch Faserbeton zu substituieren und dadurch (nicht näher quantifizierte) Einsparungen beim Beton zu ermöglichen.

Nachfragereduzierung im Endverbrauch

Eine Nachfragereduzierung im Endverbrauch wird über die oben dargestellten Strategien hinaus – welche teilweise auch Entscheidungen beim Letztverbraucher tangieren, wie die Entscheidung über einen Holzbau – in den betrachteten Szenarien i. d. R. nicht adressiert. Nur in *GreenSupreme* wird bis 2050 eine Verringerung des Pro-Kopf-Wohnraums von 46 m² im Basisjahr auf 41 m² unterstellt. Eine solche Trendumkehr würde den Beton- und Zementbedarf gegenüber einer Referenzentwicklung reduzieren.

4.3 Chemische Industrie

In diesem Abschnitt wird dargestellt, in welchem Maße die für die chemische Industrie ausgewählten Szenarien jeweils auf unterschiedliche zentrale Klimaschutzstrategien setzen. Diese Analyse soll die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Szenarien verdeutlichen.

4.3.1 Einsatz klimaneutraler Energieträger bzw. Feedstocks

In diesem Abschnitt wird auf die Entwicklung der Höhe und Zusammensetzung des Gesamtenergiebedarfs (GEB) der chemischen Industrie in den ausgewählten Szenarien eingegangen, mit einem besonderen Fokus auf den Einsatz (potenziell) klimaneutraler Energieträger. Der GEB umfasst sowohl die energetische als auch die stoffliche Nutzung von Energieträgern und ist in der chemischen Industrie von hoher Relevanz, da kohlenstoffhaltige Energieträger wie z. B. Kohle, Öl oder auch Biomasse dort sowohl energetisch (für die Erzeugung von Strom und Wärme) als auch stofflich (als Kohlenstoff- oder Wasserstofflieferant) genutzt werden können. Somit können Produkte der chemischen Industrie auch als "chemische Energiespeicher" oder als (zumindest temporäre) "Kohlenstoffspeicher" angesehen werden. In den Gesamtenergiebedarf fließt in der hier verwendeten Definition der Energiebedarf für die Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern ein (d. h. nicht nur der Energiegehalt dieser Energieträger, sondern auch die Verluste, die bei ihrer Erzeugung entstehen), und zwar unabhängig davon, wo diese Energieträger nach Annahmen der Studien hergestellt werden.²⁹

Bei dem Vergleich des GEB in Tabelle 17 wie auch bei der weiteren Analyse der Szenarien der chemischen Industrie in den folgenden Abschnitten ist zu beachten, dass der betrachtete Ausschnitt der chemischen Industrie von Szenario zu Szenario variiert. In einigen Szenarien wird die gesamte chemische Industrie betrachtet, in anderen nur die Herstellung von Primärchemikalien³⁰ oder von Plastik und Ammoniak. In Tabelle 17 sind die jeweiligen GEB im Basisjahr und im Jahr 2050 gegenübergestellt.

²⁹ Sofern diese Angaben nicht bereits in den Studien enthalten sind und auch keine Angaben zu dem angenommenen Wirkungsgrad der Elektrolyse gemacht werden, wird hier für das Jahr 2050 ein entsprechender Wirkungsgrad von 65 % (bezogen auf den Heizwert des Wasserstoffs) zugrunde gelegt.

³⁰ Dabei ist zudem zu beachten, dass es keine allgemeine Definition für Primärchemikalien gibt, sodass auch hier die betrachteten Chemikalien zwischen den Studien nicht vollständig kongruent sind.

Tabelle 17: Gesamtenergiebedarf (GEB) in der chemischen Industrie (energetisch und stofflich)

Szenario	Geo- grafie	Abgrenzung der chemischen In- dustrie	Basis- jahr	Gesamtenergiebedarf		
				Basisjahr (in TWh)	2050 (in TWh)	Änderung (2050 vs. Basisjahr)
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DECHEMA 2019)	DE	Gesamte chemi- sche Industrie	2020	450	840	+ 87 %
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	Primärchemika- lien	2019	354	372	+ 5 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	Plastik und Am- moniak	2015	1630	1632	+/- 0 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	Plastik und Am- moniak	2015	1630	1341	- 18 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	Plastik und Am- moniak	2015	1630	1640	+ 1 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	Gesamte chemi- sche Industrie ³¹	2015	1159	1162	+/- 0 %
SDS (IEA 2020)	Welt	Primärchemika- lien	2019	13.340	14.549	+ 9 %

Tabelle 17 lässt unterschiedliche Entwicklungen in den Szenarien erkennen: Während der Gesamtenergiebedarf in den Szenarien *KN2050*, *Mix95*, *New Processes* und *Carbon Capture* in etwa konstant bleibt, steigt er im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* auf fast das Doppelte an.

Der starke Anstieg im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* ist im Wesentlichen auf die Feedstock-Produktion zurückzuführen: Während im Jahr 2020 fossile Energieträger den maßgeblich größten Anteil des eingesetzten Feedstocks ausmachten, ist der mengenmäßig größte Anteil im Jahr 2050 CO₂ (72 Gewichtsprozent). Um CO₂ gemeinsam mit Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse in synthetisches Naphtha (oder andere Stoffe) umzuwandeln, ist viel Energie nötig. Im Jahr 2020 wurden die Feedstocks noch fast vollständig aus fossilen Quellen entnommen und die zu deren Aufbereitung nötige Energie wird zu großen Teilen bei den Raffinerien bilanziert. Also findet im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* trotz eines angenommenen Nullwachstums der Basischemikalien (deren Produktion laut der Studie 100 % des Rohstoffbedarfs und rund 80 % des Energiebedarfs der chemischen Industrie ausmacht) eine starke Erhöhung des Gesamtenergiebedarfs der chemischen Industrie statt.

Interessanterweise bleibt dieser Bedarf in *Mix95* aber auf konstantem Niveau, obwohl auch hier einzig von Wasserstoff und CO₂ als Rohstoffbasis ausgegangen wird und ein durchschnittliches jährliches Wachstum der chemischen Industrie von 1,1 % angenommen wird – folglich auch hier viel Energie zur Feedstock-Produktion innerhalb der chemischen Industrie benötigt werden müsste. Diese Diskrepanz zwischen den beiden Studien konnte im Rahmen der vorliegenden Analyse nicht aufgeklärt werden.

Der Gesamtenergiebedarf in *KN2050* bleibt zwischen 2019 und 2050 etwa auf konstantem Niveau. Das ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass auch hier für das Basisjahr bestimmte Energiemengen bei den Raffinerien bilanziert werden (Umwandlung fossiler Feedstocks), während die im Jahr 2050

³¹ Der Endenergiebedarf wird in der Studie für die gesamte chemische Industrie angegeben, der Feedstock-Bedarf und weitere Angaben hingegen nur für die Methanol-, Ammoniak- und Olefin-Produktion.

erhebliche Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Feedstocks hier definitionsgemäß dem Gesamtenergiebedarf der chemischen Industrie zugezählt werden. Der nichtsdestotrotz relativ geringe Anstieg des Gesamtenergiebedarfs im Vergleich zum Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* ist im Wesentlichen auf die im Szenario *KN2050* angenommene beträchtliche Nutzung von (Kunststoff-)Abfällen (über Gasifizierung und Pyrolyse) als "Ersatz-Feedstock" und bis 2050 stark abnehmende Produktionsvolumina der energieintensiven Basischemikalien (HVC: – 37 %, Ammoniak: – 45 %) zurückzuführen.

Auch im Szenario *SDS* steigt der Gesamtenergiebedarf nur leicht an. In diesem Szenario ändert sich relativ wenig an der Zusammensetzung der Energieträger (s. Tabelle 18), stattdessen wird zu großen Teilen auf CCS gesetzt, um CO₂-Emissionen zu verringern. Es wird ein durchschnittliches jährliches Wachstum der Produktionsvolumina der Basischemikalien von 0,4 % zugrunde gelegt.

Tabelle 18: Verwendung klimaneutraler Energieträger in der chemischen Industrie

Szenario	Geo- grafie	Jahr	Gesamtenergieverbrauch (in TWh) ³²						
			Ge- samt	Strom	Davon für Wasser- stoff	Syn- fuels	Bio- masse ³³	Abfall (fossil)	Fossile (außer Abfall)
Treibhausgas- neutralität 2050 (FutureCamp/DE- CHEMA 2019)	DE	2020	450	54	0 ³⁴	0	11	0	385
		2050	840	685	353	k. A.	57	19	k. A.
KN2050 (Agora Energie- wende u. a. 2020)	DE	2016	354	46	0	0	1	0	307
		2050	372	238*	52	0	49	85	0
New Processes (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	1630	83	0	0	0	56	1491
		2050	1632	783*	430	0	330	519	0
Circular Economy (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	1630	83	0	0	0	56	1491
		2050	1341	607*	336	0	276	485	0
Carbon Capture (Material Econo- mics 2019)	EU	2015	1630	83	0	0	0	56	1491
		2050	1640	579*	213	0	280	257	524
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	2015	1159	181	0	0	4	6	968
		2050	1162	1043*	738	53	17	0	49
SDS (IEA 2020)	Welt	2019	13.340	1349	0	0	58	0	11.933
		2050	14.549	2687	k. A.	k. A.	1023		k. A.

* In den Studien dieser Szenarien ist der Strombedarf für die Wasserstoffherzeugung nicht in den dort angegebenen Werten für den Strombedarf enthalten. Zur besseren Vergleichbarkeit der Szenarien wurde dieser Strombedarf in dieser Tabelle unter „Strom“ hinzuaddiert. (Wenn in den Studien nicht anders angegeben, wurde dabei ein Wirkungsgrad für die Elektrolyse von 65 % – bezogen auf den Heizwert – unterstellt.)

³² Inklusive Strom zur Wasserstoff- und Synfuel-Produktion, inklusive des im Ausland anfallenden Strombedarfs.

³³ Inklusive biogenem Abfall.

³⁴ Es werden 10 TWh Strom für die Chloralkali-Elektrolyse verwendet. Diese sind hier nicht berücksichtigt, da Wasserstoff bei diesem Prozess de facto nur als Nebenprodukt anfällt.

Die drei Szenarien von Material Economics (*New Processes*, *Circular Economy*, *Carbon Capture*) betrachten die Plastik- und Ammoniakproduktion stellvertretend für die gesamte Chemieindustrie. Die Szenarien *New Processes* und *Carbon Capture* unterstellen leicht zurückgehende Produktionsvolumina für Plastik und Ammoniak (– 3 % bzw. – 12 %), während das Szenario *Circular Economy* stärkere Reduktionen annimmt (– 19 % bzw. – 29 %). Bei *New Processes* und *Carbon Capture* ist kein Anstieg des Gesamtenergiebedarfs zu verzeichnen, während der Gesamtenergiebedarf im Szenario *Circular Economy* um 18 % zurückgeht.

Strom/Direktelektrifizierung

Besonders deutlich steigt der Anteil von (direkt genutztem) Strom am Gesamtenergiebedarf bis Mitte des Jahrhunderts im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* (von 12 % im Basisjahr auf 54 %, wobei der Anstieg des direkt genutzten Strom 744 % beträgt). In den drei Material-Economics-Szenarien steigt dieser Anteil bis Mitte des Jahrhunderts von 5 % im Basisjahr auf 20 bis 22 %, der absolute Bedarf an direkt genutztem Strom steigt in diesen Szenarien um 225 % bis 339 %. Im Szenario *Mix95* steigt der Anteil von 16 % auf 26 %, im Szenario *KN2050* ist der Anstieg hingegen vergleichsweise moderat, von 13 % im Basisjahr auf 18 % im Jahr 2050. Für das Szenario *SDS* liegen keine separaten Angaben zum direkten Stromverbrauch vor.

Tabelle 19: Strombedarf (ohne Bedarf für die Wasserstoffherstellung) in der chemischen Industrie

Szenario	Geografie	Strombedarf im Basisjahr	Anteil am GEB	Strombedarf im Jahr 2050	Anteil am GEB	Änderung (2050 vs. Basisjahr)
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DECHEMA 2019)	DE	54	12 %	685	54 %	744 %
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	46	13 %	68	18 %	48 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	83	5 %	353	22 %	324 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	83	5 %	271	20 %	225 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	83	5 %	366	22 %	339 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	181	16 %	305	26 %	69 %
SDS (IEA 2020)	Welt	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Der starke Anstieg des direkten Stromverbrauchs im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* ist vor allem auf den Einsatz elektrifizierter Cracker zurückzuführen. In geringerem Maße wird in dem Szenario auch Strom für die Methanpyrolyse zur Produktion von Methanol und Ammoniak benötigt.

In den Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* wird ebenfalls von einer Elektrifizierung der Steamcracker ausgegangen und daneben viel Strom für die Pyrolyse, Dampfbereitstellung, Methanolsynthese sowie andere Prozesse (wie z. B. die Methanol-to-Olefines/MtO-Route) benötigt. Feedstocks stellen in diesen Szenarien ausschließlich Biomasse, Abfallkunststoffe und CO₂ dar, die dann z. B. über die MtO-Route zu Kunststoffen weiterverarbeitet werden.

Das Szenario *SDS* beschreibt für die Produktion von Primärchemikalien eine Verdopplung des Stromverbrauchs bis 2050. Diese Angaben beinhalten aber den Strombedarf für die Produktion von Feedstocks, d. h. der in diesem Abschnitt relevante Strombedarf ausschließlich für die Direktelektrifizierung ist nicht bekannt. Selbst unter Berücksichtigung des Strombedarfs für die Feedstock-Produktion macht Strom 2050 in diesem Szenario – im Vergleich zu den anderen betrachteten Szenarien – einen geringen Anteil des Gesamtenergiebedarfs aus (ca. 18 %). Strom wird in dem Szenario offensichtlich primär zur Wasserelektrolyse und zur Bereitstellung von Wärme eingesetzt. Obwohl die Elektrifizierung als wichtiges Mittel zur Emissionsminderung beschrieben wird, wird in der Studie auch auf die Schwierigkeit industrieller Produktionsanlagen verwiesen, auf die Variabilität erneuerbaren Stroms zu reagieren.

Im Szenario *KN2050* wird im Jahr 2050 circa die 1,5-fache Strommenge im Vergleich zu 2019 verwendet, der Anteil von Strom am gesamten Endenergiebedarf steigt hier auf 18 %. Im Gegensatz zu einigen der anderen betrachteten Szenarien wird in *KN2050* stärker die begrenzte Verfügbarkeit von grünem Strom betont. Der verfügbare Strom wird hier Mitte des Jahrhunderts in der Grundstoffchemie zur Dampfbereitstellung (Elektrodenkessel, Hochtemperaturwärmepumpen) und als Prozessenergie z. B. für die MtO-Route benötigt. Eine Steamcracker-Elektrifizierung wird in *KN2050* aus ökonomischen Gründen explizit nicht angenommen.

Obwohl das Szenario *Carbon Capture* im Jahr 2050 noch zu großen Teilen von der Nutzung fossiler Energieträger ausgeht, wird dennoch auch eine signifikante Menge an direkt genutztem Strom benötigt (366 TWh bzw. 22 % am Gesamtenergiebedarf). Auch in diesem Szenario wird der hohe Stromverbrauch auf Dampferstellung, elektrifizierte Cracker und generell auf elektrische Wärmebereitstellung zurückgeführt.

Die Steigerung des Strombedarfs der chemischen Industrie im Szenario *Mix95* liegt im unteren Bereich (+ 69 %) der betrachteten Szenarien, während der Anteil von Strom am Gesamtenergiebedarf bis 2050 auf einen relativ hohen Wert von 26 % steigt. Die vergleichsweise geringe Zunahme des absoluten Strombedarfs – trotz einer angenommenen Erhöhung der Produktionskapazitäten³⁵ um mehr als 100 % im betrachteten Zeitraum – ist offenbar primär auf Innovationen und Effizienzgewinne (unter anderem durch Sauerstoffverzehrkathoden, katalytisches Naphtha-Cracking, selektive Membranen) zurückzuführen. Ab 2035 wird in dem Szenario der Einsatz von Elektrodenkesseln zur elektrischen Dampfbereitstellung ausgegangen.

Wasserstoff und Synfuels

Die Szenarien *Treibhausgasneutralität 2050* und *Mix95* betonen den Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff als zentrale Strategie für die Realisierung weitgehender Treibhausgasreduzierungen in der chemischen Industrie. Dem Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* liegt dabei explizit die Annahme zugrunde, dass die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom für die chemische Industrie im Jahr 2050 nicht begrenzt sein wird. Der in dem Szenario über Elektrolyse erzeugte Wasserstoff wird fast ausschließlich mit CO₂ über das Fischer-Tropsch-Verfahren (FT) zu synthetischem Naphtha verarbeitet. Die Produktion dieses FT-Naphthas inklusive der vorgelagerten Wasserstoff-Produktion benötigt im Jahr 2050 fast 80 % des gesamten Stromverbrauchs der chemischen Industrie. Als Brennstoff wird Wasserstoff in dem Szenario im Jahr 2050 nur in einem begrenzten Umfang von 1,4 TWh verwendet.

³⁵ Produktionskapazitäten sind in der Studie angegeben für Ethylen, Ammoniak und Methanol.

Tabelle 20: Strombedarf zur Wasserstoffherstellung in der chemischen Industrie

Szenario	Geo- grafie	Strombedarf für Wasserstoff im Basisjahr	Anteil am GEB	Strombedarf für Wasserstoff im Jahr 2050	Anteil am GEB
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DECHEMA 2019)	DE	0	0 %	353	42 %
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	0	0 %	52	14 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	430	26 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	336	25 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	213	13 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	0	0 %	738	64 %
SDS (IEA 2020)	Welt	0	0 %	k. A.	k. A.

Der gesamte Strombedarf inklusive des Strombedarfs für Wasserstoff steigt im Szenario *Mix95* bis 2050 um fast 500 % auf 1.043 TWh (siehe Tabelle 18). Der größte Teil davon (rund 740 TWh) wird für die Erzeugung von Wasserstoff benötigt. Das Szenario verwendet im Jahr 2050 fast ausschließlich Wasserstoff-basierte Prozesse: Die Plattformchemikalien Ammoniak, Methanol, Ethen und der Energieträger synthetisches Methan werden zu 100 % aus grünem Wasserstoff hergestellt.

Die Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* verwenden ebenfalls einen erheblichen Anteil des Stroms zur Wasserstoff-Produktion: Über 50 % des Stroms werden hier im Jahr 2050 zur Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff verwendet. Im Allgemeinen setzen die Szenarien *New Processes*, *Circular Economy* und *KN2050* aber weniger auf Wasserstoff als *Mix95*: Wasserstoff dient hier nicht als alleiniger Ausgangspunkt für Feedstocks.

Im Szenario *KN2050* wird Mitte des Jahrhunderts ein Wasserstoff-Bedarf in Höhe von 42 TWh beschrieben, von denen 9 TWh als Energieträger und 33 TWh als Feedstock genutzt werden. In dem Szenario wird dabei davon ausgegangen, dass 2050 – aufgrund eines Mangels an genügend heimischen erneuerbaren Energien – 23 TWh Wasserstoff importiert werden. Synthetische Kraftstoffe (Synfuels) werden in diesem Szenario in der chemischen Industrie ausschließlich als Feedstocks eingesetzt. Neben inländisch hergestelltem Gasöl und Naphtha aus der Pyrolyse wird grünes Naphtha im Jahr 2050 ausschließlich importiert (41 TWh), sodass der Strombedarf zur Herstellung des grünen Naphthas (117 TWh) im Ausland anfällt. Selbst wenn diese Strommenge berücksichtigt wird, liegt der gesamte Strombedarf (siehe Tabelle 18) deutlich unter dem des Szenarios *Treibhausgasneutralität 2050* (in der eine vollständige inländische Produktion der Feedstocks angenommen wird). Dies liegt insbesondere daran, dass im Szenario *KN2050* keine elektrischen Steamcracker eingesetzt werden und dass hier eine deutlich höhere Ausnutzung der Potenziale für chemisches Recycling angenommen werden.

Für 2050 geht *Carbon Capture* von einem Wasserstoffbedarf aus, der deutlich unterhalb des Bedarfs der Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* liegt. Die Wasserstoff-Herstellung benötigt 2050 37 % des gesamten Strombedarfs der betrachteten chemischen Industrie, obwohl die Bereitstellung

von Wasserstoff in diesem Szenario dann immer noch zu 50 % über die Dampfreformierung (erdgasbasiert, mit CCS) läuft. Die genaue anteilige Verwendung des Wasserstoffs wird nicht beschrieben.

Biomasse

Der zukünftige Einsatz von Biomasse in der chemischen Industrie wird in den betrachteten Szenarien unterschiedlich eingeschätzt. Die Verwendung von Biomasse als Energieträger steht aufgrund des zumindest mit der Anbaubiomasse einhergehenden Flächenbedarfs und der damit verbundenen Konkurrenz mit der Produktion von Lebensmitteln schon lange in der Diskussion. Einige der betrachteten Szenarien sehen den Einsatz von Anbaubiomasse dennoch als sinnvolle Option zur Emissionsminderung, während andere Szenarien zukünftig nur die Nutzung organischer Reststoffe vorsehen.

Tabelle 21: Biomassebedarf in der chemischen Industrie

Szenario	Geografie	Biomassebedarf im Basisjahr	Anteil am GEB im Basisjahr	Biomassebedarf im Jahr 2050	Anteil am GEB im Jahr 2050
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DECHEMA 2019)	DE	11	2 %	57	7 %
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	1	< 1 %	49	13 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	330	20 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	276	21 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	280	18 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	4	< 1 %	17	1 %
SDS (IEA 2020)	Welt	58 ¹⁹	< 1 %	1023 ³⁶	7 %

Die Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* setzen verhältnismäßig viel Biomasse ein, diese aber ausschließlich als Feedstock: 2050 wird die Plastikproduktion hier vollständig aus Biomasse (38 %) und recycelten Materialien (s. u.) gestemmt. Das Szenario *Carbon Capture* nutzt auch 2050 noch fossile Feedstocks, nimmt aber an, dass dann die Kunststoffproduktion zu 32 % auf Biomasse-Feedstock basiert. Biomasse wird in der Studie von Material Economics für die drei Szenarien nicht weiter in Primär- und Abfallbiomasse aufgeschlüsselt. Die Autorinnen und Autoren der Studie weisen darauf hin, dass die aufzuwendende Energie bei der Nutzung von Biomasse als Feedstock deutlich geringer sei als bei der Anwendung von Power-to-X-Methoden (19 MWh gegenüber 27 MWh pro t HVC³⁷). Das Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* nimmt eine ausschließliche Nutzung verfügbarer organischer Reststoffe (Sekundärbiomasse) als Feedstock-Input für die chemische Industrie (ca. 21 Gewichtsprozent) an, keinen Einsatz von Anbaubiomasse. Größtenteils wird auf Power-to-X-Methoden wie FT-Naphtha gesetzt. Auch in diesem Szenario wird Biomasse ausschließlich rohstofflich verwendet, nicht energetisch.

³⁶ Diese Zahl ist in der Studie vermerkt für "Bioenergy and Waste".

³⁷ Die "High Value Chemicals" sind Ethylen, Propylen, Butadien, Benzol, Toluol und Xylol.

Relativ moderat ist die Nutzung von Biomasse im Szenario *SDS* der IEA: Im Jahr 2050 werden nur rund 7 % des gesamten für die Produktion von Primärchemikalien benötigten Energiebedarfs (energetisch und rohstofflich) durch Biomasse gedeckt. Zu welchen Anteilen und für welche Prozesse die Biomasse eingesetzt wird, ist der Studie nicht zu entnehmen.

Einzig die Szenarien *KN2050* und *Mix95* beschreiben die ausschließliche Nutzung von Biomasse als energetischen Energieträger. Im Szenario *KN2050* wird Biomasse langfristig für die Dampfbereitstellung eingesetzt. Im Jahr 2050 werden 36 % des reinen Energiebedarfs (exklusive Feedstock) über Biomasse gedeckt. Der Biomasseeinsatz geht hier einher mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS), sodass dadurch negative Emissionen erzielt werden (siehe auch Abschnitt 00 unten). Im Szenario *Mix95* dagegen beläuft sich dieser Anteil auf nur 4 %. Die genaue energetische Verwendung dieser Biomasse wird allerdings nicht beschrieben.

Exkurs: Die Rolle fossiler Energieträger in der chemischen Industrie in den betrachteten Szenarien

In den meisten betrachteten Szenarien wird der Einsatz fossiler Energieträger in der chemischen Industrie bis 2050 weitgehend vermieden. Das Szenario *KN2050* setzt im Jahr 2050 keine fossilen Energieträger mehr ein, weder zur energetischen noch zur stofflichen Verwertung. Auch die Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* vermeiden fossile Energieträger im Jahr 2050 komplett, während im Basisjahr 2015 noch knapp 90 % des Energie- und Feedstockbedarfs über fossile Energieträger gedeckt wurden. Das Szenario *Carbon Capture* hingegen deckt auch im Jahr 2050 noch circa 35 % seines Energiebedarfs in der chemischen Industrie (exklusive des Strombedarfs für Wasserstoff) aus fossilen Energieträgern, da hier stark auf CCS als CO₂-Vermeidungsstrategie gesetzt wird.

Im Szenario *Mix95* machen fossile Energieträger 2050 nur noch knapp 2 % des EEV (exklusive des Feedstockbedarfs) aus. Der Anteil am GEV (siehe Tabelle 18), liegt sogar bei unter 1 %. Während im Szenario Treibhausgasneutralität fossile Energieträger 2020 noch knapp 80 % des gesamten Energiebedarfs (energetisch und stofflich) ausmachen, tragen sie 2050 nur noch zu knapp 7 % bei.

Stark auf fossile Rohstoffe setzt auch im Jahr 2050 hingegen noch das Szenario *SDS*: Ungefähr 70 % des energetischen und rohstofflichen Energiebedarfs werden in dem Szenario auch Mitte des Jahrhunderts noch durch Kohle, Öl und Gas gedeckt. Um die CO₂-Emissionen dennoch signifikant zu mindern, werden erhebliche Mengen CO₂ abgeschieden und gespeichert (s. Abschnitt 4.3.3 unten).

4.3.2 Energie-/Ressourceneffizienz

Das Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* geht für die Basischemie von einer schrittweise sinkenden Energieeffizienzsteigerung von 0,5 % p. a. im Jahr 2020 bis 0,0 % p. a. im Jahr 2050 aus. Das Szenario *KN2050* gibt eine generelle Steigerung der Energieeffizienz durch effizientere Querschnittstechnologien (z. B für die Bereitstellung von Prozesswärme, Ventilatoren und Pumpen) in allen Bereichen der Industrie an, quantifiziert die Effizienzsteigerungen allerdings nicht für die chemische Industrie.

Energieeffizienzsteigerungen werden in den Szenarien *New Processes*, *Circular Economy* und *Carbon Capture* ebenfalls nicht mit konkreten Zahlen benannt, allerdings wird darauf hingewiesen, dass eine Steigerung der Energieeffizienz ein wichtiges Mittel sei, um Produkte auch mit "Status-quo"-Prozessen deutlich CO₂-ärmer herzustellen. So würden beispielsweise Steamcracker ein enormes Energieeffizienzsteigerungspotential bergen: Die direkten Emissionen der Steamcracker könnten durch Effizienzsteigerungen um 20 bis 40 % gesenkt werden.

Das Szenario *Mix95* gibt explizit Energieeffizienzsteigerungen im Chemiesektor für Prozesse mit einem Technology Readiness Level (TRL) größer 4 an. Katalytisches Naphtha-Cracking, selektive Membranen (CO₂) und Sauerstoffverzehrkathoden sollen die Energieeffizienz erheblich steigern. Das katalytische Cracken von Kohlenwasserstoffen soll ein Energieeinsparpotential von 20 % im Vergleich zu herkömmlichen Cracking-Prozessen mit sich bringen (ICF, Fraunhofer ISI 2019b). Energieeffizienzgewinne der Sauerstoffverzehrkathode im Vergleich zur herkömmlichen Chlor-Alkali-Elektrolyse werden mit bis zu 30 % beziffert (Covestro 2021). Eine allgemeine Angabe der durch diese Prozesse eingesparten Energie oder eine prozentuale Steigerung der Energieeffizienz führt die Studie allerdings nicht auf. In *SDS* werden Energieeffizienzsteigerungen für den Industriesektor erwähnt, allerdings nicht quantifiziert.

4.3.3 Einsatz von CO₂-Abscheidung

Die folgende Tabelle 22 liefert einen Überblick über die Bedeutung des Einsatzes von CO₂-Abscheidung in der chemischen Industrie in den sieben betrachteten Szenarien. In den beiden folgenden Abschnitten wird anschließend separat auf die Rolle von CCS bzw. CCU eingegangen.

Tabelle 22: Rolle der CO₂-Abscheidung in der chemischen Industrie

Szenario	Geografie	2050		
		Abgeschiedenes CO ₂ (in Mt)	Anteil der CO ₂ -Abscheidung an der CO ₂ -THG-Gesamtreduktion in der chemischen Industrie	Bedeutung der Nutzung von CO ₂
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DECHEMA 2019)	DE	k. A.	k. A.	Nutzung von CO ₂ bei der wasserstoffbasierten Feedstock-Produktion
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	24	39 %	Nutzung von CO ₂ in Form von importiertem „grünen“ Naphtha
New Processes (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	Kein CCU
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	0	0 %	Kein CCU
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	76	35 %	Keine genauen Angaben
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	0	0 %	Nutzung von CO ₂ bei der wasserstoffbasierten Feedstock-Produktion
SDS (IEA 2020)	Welt	450	57 %	Keine genauen Angaben

CCS

CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) ist als Minderungsstrategie umstritten. Die Szenarien *Treibhausgasneutralität 2050*, *New Processes* und *Circular Economy* schließen CCS von vornherein aus, wobei sie diesen Ausschluss nicht explizit begründen. Das Szenario *Mix95* verwendet zwar grundsätzlich CCS, allerdings nicht für die chemische Industrie.

Das hohe Potential sogenannter „Negativemissionen“ durch CCS betont hingegen das Szenario *KN2050*: Die Nutzung von Biomasse für die Dampfbereitstellung in der chemischen Industrie und die zusätzliche Anwendung von CCS (BECCS) führt zur Einlagerung biogenen Kohlenstoffs. Dieses eingelagerte CO₂ wird in dem Szenario als Negativemissionen bilanziert. Diese Negativemissionen belaufen sich im Szenario *KN2050* im Jahr 2050 auf 19 Mio. t CO₂. Insgesamt (inklusive des CO₂ fossilen Ursprungs) werden in der chemischen Industrie im Jahr 2050 in diesem Szenario 24 Mio. t CO₂³⁸ einer geologischen Speicherung zugeführt. Dies entspricht 39 % der Emissionsminderungen in der chemischen Industrie im Jahr 2050 (gegenüber dem Basisjahr 2016).

Im Szenario *Carbon Capture* werden im Jahr 2050 59 Mio. t CO₂ aus der Plastikproduktion und 17 Mio. t CO₂ aus der Ammoniak-Produktion abgeschieden. Dies entspricht in der Summe 35 % der in dem Szenario im Jahr 2050 gegenüber dem Basisjahr eingesparten Menge CO₂. Genaue Angaben, wie viel von diesem CO₂ geologisch gespeichert wird und wie viel durch CCU genutzt werden, finden sich in der Studie zwar nicht, es wird allerdings überwiegend CCS angenommen.

Als besonders wichtig wird CCUS (keine getrennte Ausweisung nach CCS und CCU) im Szenario *SDS* erachtet: Dadurch, dass auch 2050 noch zu großen Teilen fossile Energien genutzt werden, wird hier stark auf eine CO₂-Reduktion durch CO₂-Abscheidung gesetzt. Im Jahr 2050 werden in *SDS* global ca. 450 Mio. t CO₂ aus der chemischen Industrie abgeschieden und entweder geologisch gespeichert oder in neuen Produkten gebunden. Die abgeschiedene CO₂-Menge entspricht 57 % der Emissionseinsparungen, die in der chemischen Industrie im Jahr 2050 (gegenüber dem Basisjahr) realisiert werden.

CCU

Das Szenario *Mix95* gibt an, CCU nicht in großem Stil in der chemischen Industrie zu nutzen, da kurze Produktlebenszeiten (ohne Einsatz von CCS am Ende des Produktlebenszyklus) langfristig nicht zu Emissionsminderungen führen würden. Allerdings wird Wasserstoff im Jahr 2050 als einziger „energiehaltiger“ Feedstock angegeben, was zur *Herstellung* chemischer Produkte große Mengen des „energielosen“ Kohlenstoffdioxids erfordert. CCU wird als vielversprechend für die Produktion synthetischen Methans (53 TWh in 2050) aus Wasserstoff beschrieben. Die Herkunft dieses Kohlenstoffdioxids wird in der Studie nicht genauer beleuchtet, es soll allerdings aus nicht-fossilen Quellen wie Luftabscheidung oder Biomasse kommen.³⁹

Das Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* setzt zu großen Teilen CCU ein – auch wenn der Begriff in der gesamten Studie nicht fällt: 72 Gewichtsprozent des Feedstock-Bedarfs der chemischen Industrie werden 2050 durch CO₂ gedeckt. Dieses CO₂ wird zum Beispiel über das Fischer-Tropsch-Verfahren zusammen mit Wasserstoff zu synthetischem Naphtha umgesetzt. Als CO₂-Quellen werden industrielle Quellen angenommen, genauere Angaben zur Herkunft des CO₂ werden in der Studie aber nicht gemacht.

Im Szenario *Carbon Capture* wird CCU ebenfalls eingesetzt, der – nicht genauer quantifizierte – Großteil des eingefangenen CO₂ wird allerdings einer langfristigen Speicherung (CCS) zugeführt. Auch das Szenario *SDS* weist keine separaten Zahlen für CCU und CCS aus.

Das Szenario *KN2050* geht von einer Kohlenstoffspeicherung in Produkten durch die Verwendung grünen Naphthas aus, obwohl der Begriff CCU auch hier nicht explizit verwendet wird („Bindung von CO₂

³⁸ Die in der Studie für die gesamte Chemieindustrie beschriebenen – 26 Mio. t negative CO₂-Emissionen im Jahr 2050 kommen durch CCS (– 24 Mio. t), CCU (– 8 Mio. t, s. u.) und unvermeidbare positive Emissionen zu Stande.

³⁹ Persönliche Korrespondenz mit dem Studienautor Dr. Tobias Fleiter im Mai 2021.

in Produkten der chemischen Industrie“). Es wird allerdings angenommen, dass dieses grüne Naphtha im Ausland produziert und nach Deutschland importiert wird – und somit kein CCU in Deutschland zum Einsatz kommt. Im Jahr 2050 werden durch das CCU im Ausland 8 Mio. t CO₂ „Brutto-Negativ-Emissionen“⁴⁰ bilanziert.

Die Szenarien *New Processes* und *Circular Economy* gehen nicht von einer Nutzung von CCU aus.

4.3.4 Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen

Eine Reduktion der Nachfrage nach Primärgrundstoffen der chemischen Industrie kann durch Materialeffizienz, höhere Recyclingquote, Materialsubstitution oder durch eine Minderung der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen im Endverbrauch erreicht werden. In den folgenden Abschnitten werden die Annahmen der untersuchten Szenarien zu diesen vier Bereichen dargestellt.

Materialeffizienz

Das Szenario *SDS* der IEA beschreibt Materialeffizienz, die zu einer Entkopplung von Primärproduktion und Bruttoinlandsprodukt führt, branchenübergreifend als die Hauptmethode um Produktionswachstum langfristig zu begrenzen. Die globalen Produktionsvolumina der verschiedenen Grundstoffe wachsen bis 2050 allerdings stetig weiter. Tiefergehende Materialeffizienz-Details in Bezug auf die Angebotsseite der chemischen Industrie liefert das Szenario nicht.

Die im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* angenommenen Materialeffizienzsteigerungen in der Spezialchemie führen – aufgrund des angenommenen Wachstums der Spezialchemie von 2,0 % p. a. – zu einer stagnierenden Nachfrage in der Basischemie.

Gerade die Entwicklung und die Bedarfe der Landwirtschaft haben erhebliche Auswirkungen auf die Nachfrage nach der Grundchemikalie Ammoniak. Das Szenario *SDS* beschreibt einen Höchststand der Ammoniak-Nachfrage in den 2040er Jahren und einen darauffolgenden Rückgang verursacht durch eine geringere Kunstdüngernachfrage. Dieser Rückgang ist zu großen Teilen auf erhöhte Materialeffizienz des Kunstdüngers durch Präzisionsapplikation, gesteigertes Monitoring, Bodentestungen und allgemein auf „nachhaltige Landwirtschaft“ zurückzuführen.

Dieselben Argumente führen auch die Szenarien von Material Economics (*New Processes, Circular Economy, Carbon Capture*) auf: Effizienterer Düngemittleinsatz durch Digitalisierung und Automation sowie neue materialeffiziente oder zirkuläre Geschäftsmodelle senken den Kunstdüngerbedarf bis 2050 erheblich. Gemeinsam mit reduzierten Lebensmittelabfällen wirkt sich dies stark auf die Ammoniak-Nachfrage aus: Das Szenario *Circular Economy* geht dabei von den drei Szenarien am ambitioniertesten vor und erreicht 2050 eine Minderung um 29 % im Vergleich zum Produktionsvolumen von 2015.

Mehr „Re-Use“ und längere Lebenszeiten von Produkten werden im Szenario *Mix95* unterstellt und werden in der vorliegenden Arbeit als Strategien zur Steigerung der Materialeffizienz definiert. Durch diese Strategien können unter anderem in der Produktion von Basischemikalien Nachfragerückgänge erreicht werden, die in der Studie jedoch nicht quantifiziert werden.

⁴⁰ In Produkten aus grünem Feedstock wird atmosphärisches CO₂ quasi auf absehbare Zeit – bis zu ihrer thermischen Verwertung/Weiterverwendung – „zwischengespeichert“ (CCU). In der Studie wird darauf hingewiesen, dass (zwecks Vermeidung einer unsachgemäßen Doppelbilanzierung) Emissionen aus Abfall im Szenario *KN2050* grundsätzlich wie Emissionen aus fossilen Brennstoffen bewertet werden, auch wenn der Kunststoff aus grünem Feedstock hergestellt worden ist.

Im Szenario *KN2050* sorgt ebenfalls ein reduzierter Stickstoff-Düngemittleinsatz (durch den Ausbau des Ökolandbaus, effizientere GÜllennutzung und einen reduzierten Tierbestand) für eine im Jahr 2050 um ca. 45 % reduzierte Ammoniak-Produktion im Vergleich zum Produktionsvolumen von 2015. Auch das Szenario *Mix95* geht von einem reduzierten Kunstdüngerbedarf aus, der zu einer Reduktion der Ammoniak-Nachfrage um 20 % im Jahr 2050 im Vergleich zu 2015 führt. Des Weiteren hebt *Mix95* – genau wie das Szenario *SDS* – die Relevanz von 3D-Druck in Bezug auf eine erhöhte Materialeffizienz hervor.

Genauere Angaben zu Materialeffizienzmaßnahmen in Bezug auf Plastik werden in den drei Szenarien von Material Economics gemacht: Hier wird von einem reduzierten Verbrauch von Verpackungsmaterialien unter anderem durch eine Nutzung von „High-Performance“-Polymeren ausgegangen. Außerdem wird der Kunststoffbedarf durch eine erhöhte Nutzung von Car-Sharing-Modellen sowie höhere Lebensdauern bestimmter Produkte verringert. Vor allem das Szenario *Circular Economy* ist bezüglich dieser Materialeffizienzmaßnahmen sehr ambitioniert und führt auf diese eine Einsparung von 28 % der CO₂-Emissionen der chemischen Industrie im Jahr 2050 (im Vergleich zu einer Referenzentwicklung) zurück.

Kreislaufwirtschaft/Recycling-Quoten

Das Recycling von (Kunststoff-)Abfällen für die chemische Industrie kann grob in mechanisches (werkstoffliches) und chemisches (rohstoffliches) Recycling aufgeteilt werden: Während die kovalenten Bindungen beim mechanischen Recycling größtenteils intakt gelassen werden und das Material als solches leicht verändert wiederverwendet wird, werden beim chemischen Recycling die Bindungen aufgebrochen und anschließend komplett neu geformt (UBA 2020). Heutzutage angewendete Recycling-Verfahren sind überwiegend mechanische Recycling-Verfahren, chemisches Recycling machte in Deutschland im Jahr 2019 weit unter 1 % der insgesamt wiederverwerteten Mengen aus (Conversio Market and Strategy 2020). Dadurch, dass die molekularen Bindungen beim mechanischen Recycling weitgehend erhalten bleiben, sind diese Methoden technisch weit weniger aufwendig und verlangen einen deutlich niedrigeren Energieeinsatz.

Tabelle 23: Bedarf an Abfall (energetisch und stofflich) in der chemischen Industrie

Szenario	Geografie	Abfallbedarf Basisjahr	Anteil am GEB	Abfallbedarf 2050	Anteil am GEB
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DECHEMA 2019)	DE	0	0 %	19	2 %
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	DE	0	0 %	76	20 %
New Processes (Material Economics 2019)	EU	56	3 %	519	32 %
Circular Economy (Material Economics 2019)	EU	56	3 %	485	36 %
Carbon Capture (Material Economics 2019)	EU	56	3 %	257	16 %
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	EU	6	< 1 %	17	1 %
SDS (IEA 2020)	Welt	0	0 %	1.023	0 %

Beide Recycling-Varianten werden im Jahr 2050 in den ausgewählten Szenarien zu unterschiedlichen Anteilen angewendet. In den drei Szenarien von Material Economics (*New Processes, Circular Economy, Carbon Capture*) werden grundsätzlich vergleichsweise hohe Recyclingquoten angenommen: Am ambitioniertesten ist das Szenario *Circular Economy*, in welchem im Jahr 2050 62 % der Plastikproduktion auf chemischem (37 %) bzw. mechanischem (25 %) Recycling beruhen. Das Szenario *New Processes* (Szenario *Carbon Capture*) nimmt eine Kunststoffproduktion zu 15 % (14 %) basierend auf chemischem und zu 47 % (15 %) basierend auf mechanischem Recycling an.

Die Studie im Auftrag des VCI ist bezüglich des chemischen Recyclings weniger optimistisch und gibt im Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* an, dass 2050 nur rund 5 % des Rohstoffbedarfs der chemischen Industrie durch Kunststoffabfälle gedeckt werden (chemisches Recycling). Es wird allerdings eine starke Zunahme des mechanischen Recyclings (Steigerung der Rezyklatmenge um 1,8 % p. a.) durch erhöhtes Müllaufkommen und eine gesteigerte Rezyklatausbeute (Anstieg von 68 % auf 75 %) angenommen: Die Rezyklatmenge steigt zwischen 2020 und 2050 um 62 %. Post-consumer-Verpackungen zum Beispiel werden in dem Szenario ab 2035 zu 70 % recycelt, Kunststoffproduktionsabfälle ab 2030 sogar zu 90 %. Die Produktion von neuen Kunststoffen („virgin plastics“) bleibt in dem Szenario allerdings konstant, sodass die Kunststoffversorgung insgesamt um 0,2 % p. a. wächst.

Mix95 nimmt ausschließlich mechanisches Recycling an und spricht von „ambitioniertem Plastikrecycling“ und „signifikanten Verbesserungen“, ohne konkrete Zahlen zu nennen.

Im Gegensatz zu den zuvor benannten Studien werden in den Szenarien *SDS* und *KN2050* nur Primärchemikalien⁴¹ bzw. chemische Grundstoffe⁴² betrachtet, sodass werkstoffliches Recycling nicht explizit als Feedstock-Input aufgeführt wird, sondern zu einem Nachfragerückgang nach diesen Grundstoffen führt. Im *SDS*-Szenario der IEA wird gegenüber dem Basisjahr mehr als eine zweifache Steigerung des Ersatzes von Primär- durch Sekundärkunststoffe bis 2070 beschrieben, wofür eine starke Unterstützung durch die Politik für Sammlung und Sortierung von Abfällen gefordert wird. Es werden allerdings keine spezifischen Anteile für werk- und rohstoffliches Recycling ausgewiesen.

Im Szenario *KN2050* macht chemisches Recycling im Jahr 2050 68 % der HVC-Produktion aus, während ein gegenüber dem Basisjahr verstärktes mechanisches Recycling zusammen mit einer Verschiebung der Produktionsstandorte innerhalb Europas zu einem stark sinkenden HVC-Produktionsvolumen in Deutschland führt: Im Jahr 2050 wird in dem Szenario für Deutschland von etwa 63 % des HVC-Produktionsvolumens von 2015 bei gleichbleibender Plastikproduktion ausgegangen.

Materialsubstitution

Einen erheblichen Effekt auf die Produktionsmengen und CO₂-Emissionen der chemischen Industrie hat die Nutzung von Kunstdünger: Derzeit werden Material Economics (2019) zufolge 90 % des hergestellten Ammoniaks zur Kunstdüngerproduktion verwendet, wobei Ammoniak gegenwärtig fast ausschließlich aus Erdgas hergestellt wird. Alle drei Szenarien von Material Economics setzen stark auf den Ersatz von Kunstdünger durch organische Düngemittel, was die Ammoniak-Produktion gemeinsam mit Materialeffizienz und einer effizienteren Nutzung von Lebensmitteln (Reduktion von Lebensmittelabfällen) im Vergleich zu einem Referenzszenario stark verringert (je nach Szenario um 14 bis 31 %). In organischen Düngemitteln ist kein fossiler Kohlenstoff enthalten und der biogene Kohlenstoff kann durch die Kompostierung von Abfällen (häuslicher Bioabfall, Gülle) im Kreislauf gehalten werden.

⁴¹ Ethylen, Propylen, BTX, Methanol, Ammoniak (nach IEA 2020).

⁴² HVCs (Ethylen, Propylen, Butadien, BTX), Methanol, Ammoniak (nach Agora Energiewende u. a. 2020).

Das Szenario *SDS* beschreibt stattdessen eine teilweise Umstellung von Harnstoff-basierten auf Nitrat-basierte Düngemittel, da der Einsatz letzterer zu deutlich weniger CO₂-Emissionen führt.

Eine weitere in den Szenarien der Studie von Material Economics angenommene Substitution ist der teilweise Ersatz von Kunststoffen durch Materialien mit geringem CO₂-Fußabdruck, wie zum Beispiel Faser-Alternativen im Verpackungsbereich.⁴³ Über solche Substitutionen könnten nach Schätzungen der Studie 25 % der Kunststoffe ersetzt werden. Der funktionserhaltende Ersatz von Plastik durch biobasierte Produkte in anderen Branchen, wie zum Beispiel der Automobil- oder Elektronikbranche wird in der Studie hingegen als sehr schwierig beschrieben und daher nur zu geringen Anteilen angenommen (insgesamt 5 %). Den Ersatz von Plastik durch andere Materialien wie zum Beispiel Holzfasern beschreibt auch das *Mix95*-Szenario, nennt allerdings keine genauen Zahlen.

In *Treibhausgasneutralität 2050* und *KN2050* wird keine Substitution von Materialien der chemischen Industrie (wie z. B. Harnstoff-basiertem Dünger oder Kunststoffen) durch andere Materialien erwähnt.

Nachfragereduzierung im Endverbrauch

Im Szenario *KN2050* wird ein im Zeitverlauf reduzierter Stickstoff-Düngemittleinsatz unter anderem infolge eines reduzierten Tierbestands angenommen. Der reduzierte Tierbestand ist wiederum durch eine Konsumverhaltensänderung der Endkonsumenten bedingt, die – so die Annahme – weniger Rindfleisch und Milchprodukte konsumieren werden.

Das Szenario *SDS* beschreibt ebenfalls eine Reduzierung der Lebensmittelabfälle als einen der Gründe für eine reduzierte Ammoniak-Nachfrage, was mit veränderten Konsummustern der Endverbraucherinnen und Endverbraucher einhergehen müsste.

In den Szenarien *Treibhausgasneutralität 2050* sowie *Mix95* werden keine Angaben zur Reduktion von Endverbrauchsnachfrage gemacht.

⁴³ Alternativen stellen z. B. Papier-Faserguss oder recycelbare Faserverpackungen mit biobasierten Beschichtungen (mit Barriere-Eigenschaften) dar.

5 Übersicht über zentrale Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Szenarien

Die folgenden Abschnitte fassen für die drei Branchen Stahl, Zement und Chemie jeweils die wesentlichen Erkenntnisse der Metaanalyse des vorangegangenen Kapitels zusammen. Dabei wird insbesondere diskutiert, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede die betrachteten Szenarien hinsichtlich ihrer hauptsächlich verfolgten Klimaschutzstrategien aufweisen.⁴⁴ Für jede der drei Branchen fasst dabei eine tabellarische Übersicht die Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien für jedes Szenario zusammen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass diese vergleichende Einordnung teilweise auf (mit Unsicherheiten verbundenen) Einschätzungen der Autorinnen und Autoren der vorliegenden Arbeit beruht, da aufgrund fehlender bzw. uneinheitlicher Dokumentation der Szenarien ein präziser Vergleich der Szenarien nicht immer möglich ist.

5.1 Stahl

Die Metaanalyse der Szenarien zur Entwicklung der Stahlbranche verdeutlicht, dass dem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen – entweder direkt genutzt oder indirekt in der Form von grünem Wasserstoff – für eine (nahezu) klimaneutrale Stahlerzeugung eine Schlüsselrolle zukommt. Unter anderem unterstellen alle sieben untersuchten Szenarien einen signifikanten Anstieg der Sekundärstahlproduktion mit Hilfe des stromintensiven Elektrolichtbogenofens (EAF). In der Primärstahlproduktion setzen alle betrachteten Szenarien zudem verstärkt auf die wasserstoffbasierte DRI-EAF/SAF-Route, insbesondere aber die Szenarien *KN2050*, *GreenSupreme* und *New Processes*.

⁴⁴ Aufgrund der Schwierigkeit in allen drei Sektoren, Fortschritte im Bereich der Energieeffizienz über die betrachteten Szenarien hinweg zu vergleichen, wird diese Klimaschutzstrategie in den folgenden Abschnitten nicht diskutiert.

Tabelle 24: Übersicht über die Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien nach Szenarien (Stahl)

Szenario	Einsatz klimaneutraler Energieträger			CO ₂ -Abscheidung		Minderung der Nachfrage nach Primärmaterialien			
	direkte Elektrifizierung	Wasserstoff oder synthetische Brennstoffe	Biomasse	CCS	CCU	Materialeffizienz	Kreislaufwirtschaft	Materi-alsubstitution	Minderung der Endnachfrage
DEUTSCHLAND									
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	+	++	+++	++	o	o	++	+	o
GreenSupreme (UBA 2019)	++	+++	o	o	o	++	+++	+	++
EUROPA									
New Processes (Material Economics 2019)	++	++	++	+	k. A.	+	+++	o	o
Circular Economy (Material Economics 2019)	++	++	++	+	k. A.	++	+++	o	o
Carbon Capture (Material Economics 2019)	+	+	++	+++	k. A.	+	++	o	o
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	++	++	+	o	o	+	+++	o	o
WELT									
SDS (IEA 2020)	+	+	+	+++	k. A.	+	++	o	o

o = Strategie wird nicht oder nur marginal verfolgt

+ / ++ / +++ = Strategie wird in mäßigem/starkem/sehr starkem Maße verfolgt

Ebenfalls wird in allen betrachteten Szenarien eine Erhöhung der Recyclingrate von Stahl angestrebt und für möglich gehalten, wobei sich die Einschätzungen zu der bis Mitte des Jahrhunderts realisierbaren Recyclingrate unterscheiden.

Die Rolle der CO₂-Abscheidung (CCUS) für Emissionsminderungen in der Stahlindustrie wird in den betrachteten Szenarien sehr unterschiedlich eingeschätzt. Die Szenarien *GreenSupreme* sowie *Mix95* verzichten komplett auf CCS und CCU. In den Szenarien *Circular Economy* und *New Processes* wird zwar CO₂-Abscheidung eingesetzt, diese Minderungsstrategie spielt in beiden Szenarien aber eine eher kleine Rolle bei der CO₂-Reduktion. Eine wichtige Rolle spielt CCUS in der Stahlbranche hingegen in dem Szenario *KN2050* sowie v. a. in den Szenarien *SDS* und *Carbon Capture*, in denen rund ein Drittel des Rückgangs der jährlichen Emissionen der Branche bis 2050 (gegenüber dem jeweiligen Basisjahr)

auf die Abscheidung und Speicherung von CO₂ zurückgeht. Keine der Studien, die den Einsatz von CO₂-Abscheidung in der Stahlindustrie beschreiben, machen dabei konkrete Angaben zu Infrastrukturen oder der Verortung der geologischen Speicherstätten.

Zudem gibt es zwischen den Szenarien unterschiedliche Einschätzungen, ob bzw. in welchem Umfang Biomasse in der Stahlerzeugung eingesetzt werden sollte und ob auch die Substitution von Stahl durch andere Materialien oder aber eine Anpassung von Verhaltensweisen und Konsummustern zu einer zukünftigen Minderung des Stahlbedarfs beitragen werden.

5.2 Zement

Nahezu alle Szenarien betonen die besonders hohe Relevanz von CCS für eine vollständige bzw. weitgehende Reduktion der CO₂-Emissionen der Zementindustrie, denn die rohstoffbedingten Prozessemissionen der Zementherstellung lassen sich durch anderweitige Maßnahmen nicht vollständig vermeiden. Das Szenario *GreenSupreme* bildet hier die einzige Ausnahme, daher verbleiben in diesem Szenario – trotz sehr optimistischer Annahmen bezüglich verschiedener sonstiger Reduktionsstrategien (wie dem Einsatz von synthetischen Energieträgern und der Verwendung alternativer Bindemittel und neuer Baustoffe) – auch langfristig relevante Restemissionen aus der Zementproduktion.

Tabelle 25: Übersicht über die Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien nach Szenarien (Zement)

Szenario	Einsatz klimaneutraler Energieträger			CO ₂ -Abscheidung		Minderung der Nachfrage nach Primärmaterialien			
	direkte Elektrifizierung	Wasserstoff oder synthetische Brennstoffe	Bio-masse	CCS	CCU	Materialeffizienz	Kreislaufwirtschaft	Materi-alsubstitution	Minde-rung der End-nachfrage
DEUTSCHLAND									
KN2050 (Agora Energie-wende u. a. 2020)	+	o	++	+++	o	++	+	++	o
Klimaneutralität (VDZ 2020)	k. A.	+	++	++	k. A.	k. A.	o	++	o
GreenSupreme (UBA 2019)	+	+++	o	o	o	k. A.	o	+++	++
EUROPA									
2050 roadmap (Cembureau 2020)	+	+	+++	++	k. A.	++	+	++	o
New Processes (Material Econo-mics 2019)	+++	o	o	++	k. A.	++	o	+	o
Circular Economy (Material Econo-mics 2019)	++	o	o	++	k. A.	+++	o	++	o
Carbon Capture (Material Econo-mics 2019)	+	o	o	+++	k. A.	+	o	+	o
WELT									
SDS (IEA 2020)	o	o	+	+++	k. A.	k. A.	o	+	o

o = Strategie wird nicht oder nur marginal verfolgt

+ / ++ / +++ = Strategie wird in mäßigem/starkem/sehr starkem Maße verfolgt

Ebenfalls sehen die meisten Szenarien eine deutliche Steigerung der Relevanz von Strom als Endenergieträger, was sich sowohl in absoluten Mehrbedarfen als auch in höheren Anteilen am Endenergieverbrauch widerspiegelt. Gleichwohl hängt die Höhe dieser Steigerung maßgeblich davon ab, ob eine Elektrifizierung der Zementöfen angenommen wird und welche CO₂-Abscheidetechnologie zum Einsatz kommt. Ausnahmen bilden an dieser Stelle lediglich das Szenario *SDS*, das auf globaler Ebene auch aufgrund der vorhandenen Effizienzpotenziale einen konstanten Strombedarf sieht, und das Szenario *GreenSupreme*, das wegen sehr hoher Effizienzfortschritte und dem Verzicht auf CCS sogar einen rückläufigen Einsatz von Strom antizipiert – wenn auch einen dennoch steigenden Anteil am

Endenergieverbrauch. Wie bereits oben dargelegt, kommt im Szenario *GreenSupreme* jedoch durch den hohen Einsatz von synthetischen Energieträgern eine umfassende indirekte Elektrifizierung zum Einsatz, deren Einbezug in die Bilanzgrenze der Zementindustrie auch hier einen erheblichen Mehrbedarf ergäbe.

Weitgehender Konsens besteht außerdem in der Einschätzung, dass es noch bedeutende Potentiale beim effizienteren Einsatz von Klinker, Zement und Beton über die gesamte Wertschöpfungskette der Braubranche gibt. Insbesondere mit Blick auf die wichtige Substitution von Klinker wird jedoch klar, dass die Zementindustrie eng verwoben ist mit der Transformation anderer Industrien, insbesondere im Bereich der Primärstahlerzeugung und der Kohleverstromung.

Mit Ausnahme der Szenarien *KN2050* und *2050 roadmap* nimmt keines der betrachteten Szenarien an, dass das derzeit in Forschung befindliche Recycling von Beton bis 2050 eine nennenswerte Rolle zur Emissionsminderung spielen wird. Und mit Ausnahme des Szenarios *GreenSupreme* wird auch nicht angenommen, dass Lebensstiländerungen zukünftig zu bedeutenden Rückgängen des Zementbedarfs führen werden.

Sehr unterschiedlich bewerten die verschiedenen Szenarien hingegen die zukünftige Rolle alternativer Brennstoffe und den Einsatz von Biomasse. Die Hälfte der Szenarien sehen hier langfristig eine rückläufige oder überhaupt keine Relevanz im Brennstoffportfolio, die andere Hälfte sieht eine Fortsetzung des bisherigen Trends hin zu mehr abfallstämmigen Brennstoffen mit immer höheren biogenen Anteilen. Die tatsächliche weitere Entwicklung in diesem Bereich dürfte sowohl von der zukünftigen Verfügbarkeit geeigneter Ersatzbrennstoffe und nachhaltiger Biomassepotenziale als auch von der ungewissen Technologieentwicklung von Elektrifizierungsstrategien abhängig sein.

5.3 Chemie

Grüner Strom spielt in allen betrachteten Szenarien eine zentrale Rolle zur Minderung der Emissionen der chemischen Industrie: Der Strombedarf – ob im Inland oder im Ausland gedeckt – wird in den Szenarien durch einen hohen Bedarf an (grünem) Wasserstoff und teilweise auch synthetischem Feedstock sowie durch eine angenommene (Teil-) Elektrifizierung von Prozesswärme nach oben getrieben. Selbst im Szenario *Carbon Capture* mit seinem starken Einsatz von CO₂-Abscheidung und Speicherung benötigt die chemische Industrie bis 2050 in nicht unerheblichem Maße zusätzlichen Mengen an Strom. Ein starker weiterer bzw. ein beschleunigter Ausbau erneuerbarer Energien scheint somit eine Grundvoraussetzung für erfolgreichen Klimaschutz (auch) in der chemischen Industrie zu sein.

Tabelle 26: Übersicht über die Relevanz einzelner Klimaschutzstrategien nach Szenarien (Chemie)

Szenario	Einsatz klimaneutraler Energieträger			CO ₂ -Abscheidung		Minderung der Nachfrage nach Primärmaterialien			
	direkte Elektrifizierung	Wasserstoff oder synthetische Brennstoffe	Bio-masse	CCS	CCU	Materialeffizienz	Kreislaufwirtschaft	Materi-alsubstitution	Minderung der Endnachfrage
DEUTSCHLAND									
KN2050 (Agora Energiewende u. a. 2020)	+	+	++	++	++	++	+++	o	+
Treibhausgasneutralität 2050 (FutureCamp/DE-CHEMA 2019)	+++	++	+	o	++	+	++	o	o
EUROPA									
New Processes (Material Economics 2019)	++	+	++	o	o	++	+++	+	o
Circular Economy (Material Economics 2019)	++	+	++	o	o	+++	+++	++	o
Carbon Capture (Material Economics 2019)	++	+	++	++	k. A.	++	++	+	o
Mix95 (ICF/Fraunhofer ISI 2019a)	++	+++	o	o	++	+	+	+	o
WELT									
SDS (IEA 2020)	k. A.	k. A.	+	+++		+	++	+	+

o = Strategie wird nicht oder nur marginal verfolgt

+ / ++ / +++ = Strategie wird in mäßigem / starkem / sehr starkem Maße verfolgt

Ein verstärktes Recycling von Plastik spielt ebenfalls in allen betrachteten Szenarien eine wichtige Rolle, allerdings gibt es Unterschiede hinsichtlich der angenommenen Art des Recyclings: Während die Szenarien *Treibhausgasneutralität 2050* und *Mix95* von einer starken Zunahme des mechanischen Recyclings ausgehen, wird chemisches Recycling entweder nur zu geringen Teilen angenommen oder gar nicht quantifiziert. In den Szenarien *SDS* und *KN2050* ist chemisches Recycling im Jahr 2050 hingegen weit verbreitet. Die drei Szenarien von Material Economics beschreiben sowohl einen Bedeutungszuwachs für die Nutzung von chemischem als auch von mechanischem Recycling – Kunststoffabfälle stellen hier die wichtigste Rohstoffquelle für die zukünftige Plastikproduktion dar.

Zwei der betrachteten Szenarien beschreiben eine Verhaltensänderung der Endkonsumenten im Bereich Lebensmittel: Hier soll es bis 2050 zu starken Abfallreduktionen kommen, die wiederum eine reduzierte Lebensmittelproduktion und somit einen geringeren Düngemittleinsatz (Ammoniak) bedingen. Auch der Wechsel von Kunst- zu Biodünger (Strategie „Materialsubstitution“) ist in einigen Szenarien für eine Minderung der Treibhausgasemissionen verantwortlich.

Die zukünftige Verwendung von Biomasse wird in den Szenarien sehr unterschiedlich eingeschätzt. Die drei Szenarien von Material Economics verwenden zum Beispiel Biomasse in relevantem Maße als „Plastik-Feedstocks“. Das Szenario *Treibhausgasneutralität 2050* deckt hingegen nur einen geringen Teil seines Feedstock-Bedarfs aus organischen Reststoffen. Energetisch findet Biomasse in keinem der vier genannten Szenarien Verwendung, in den Szenarien *KN2050* und *Mix95* hingegen wird Biomasse ausschließlich energetisch verwendet. Im Szenario *KN2050* wird die Nutzung von Biomasse zudem kombiniert mit dem Einsatz von CCS, um „negative“ Emissionen zu realisieren und damit Treibhausgasemissionen aus anderen Quellen (v. a. aus der Landwirtschaft) zu kompensieren. Im Szenario *Mix95* hingegen spielt die Nutzung von Biomasse in der chemischen Industrie im Jahr 2050 keine bedeutende Rolle.

Auch die Nutzung von CCS in der chemischen Industrie unterscheidet sich zwischen den betrachteten Szenarien stark. Die Szenarien *SDS*, *Carbon Capture* und *KN2050* sehen hierin eine wichtige Strategie zur Emissionsreduktion. Die anderen vier betrachteten Szenarien verwenden in der chemischen Industrie hingegen explizit kein CCS.

Die Nutzung von CO₂ zur Herstellung synthetischer Feedstocks spielt in vielen der betrachteten Szenarien eine wichtige Rolle, eine genaue Quantifizierung des benötigten CO₂ sowie genaue Angaben zu seiner Herkunft finden sich in den Studien allerdings nicht. Ebenfalls bleibt in vielen der Szenarien unklar, ob und in welchem Maße auch die in der chemischen Industrie entstehenden CO₂-Emissionen in eine Nutzung überführt werden. Drei der sieben betrachteten Szenarien schließen eine solche Nutzung (CCU) explizit aus.

6 Fazit

Die durchgeführte Metaanalyse verschiedener Klimaschutzszenarien für die Industriebranchen Stahl, Zement und Chemie verdeutlicht zum einen, dass es verschiedene vorliegende Studien grundsätzlich als möglich erachten, die Emissionen der Branchen Stahl, Zement und Chemie bis Mitte des Jahrhunderts vollständig oder zumindest sehr weitgehend zu reduzieren. Die Metaanalyse zeigt zum anderen, dass in den drei Branchen verschiedene Strategien zur Minderung der Treibhausgasemissionen verfolgt werden können und dass aus heutiger Sicht mehrere Entwicklungen – mit unterschiedlichen Strategieschwerpunktsetzungen – denkbar sind, die eine (weitgehende) Treibhausgasneutralität in diesen Branchen der Grundstoffindustrie erreichen können.

Die teilweise erheblichen Unterschiede in den gewählten Strategien bzw. Technologien zwischen den Szenarien deuten darauf hin, dass es derzeit für diese drei Branchen noch keinen weitverbreiteten Konsens hinsichtlich der wahrscheinlichsten oder vorteilhaftesten Transformationspfade gibt. Allerdings lassen sich für alle drei untersuchten Branchen durchaus spezifische Emissionsreduktionsstrategien identifizieren, die in allen oder fast allen betrachteten Szenarien eine wichtige Rolle spielen und folglich aus heutiger Sicht als besonders wichtig für die jeweiligen Branchen angesehen werden können.

Für die Stahlbranche wird allgemein erwartet, dass die miteinander zusammenhängenden Strategien der Direktelektrifizierung (unter anderem Bedeutungsgewinn des Elektrolichtbogenofens auch in der Primärstahlerzeugung), des Wasserstoff-Einsatzes (in Direktreduktionsanlagen) und der Kreislaufwirtschaft (Erhöhung des Sekundärstahlanteils) von hoher Relevanz für eine erfolgreiche Transformation sein werden. Bedeutende Unterschiede zwischen den Szenarien gibt es hingegen hinsichtlich der zukünftigen Bedeutung von Biomasse und CCS.

Für die Zementindustrie sehen fast alle betrachteten Szenarien die CCS-Strategie sowie auch die Strategien der Materialeffizienz (insbesondere in der Baubranche) und der Materialsubstitution (unter anderem hinsichtlich der Substitution des Klinker-Bestandteils) als besonders relevant an. Stark unterschiedliche Einschätzungen finden sich hingegen bezüglich der Strategie der Direktelektrifizierung (d. h. insbesondere der zukünftigen Relevanz von elektrifizierten Zementöfen) und der möglichen zukünftigen Rolle von Wasserstoff oder synthetischen Energieträgern zur potenziell klimaneutralen Bereitstellung von Brennstoffen.

Der Großteil der betrachteten Szenarien erachtet für die chemische Industrie die Strategien der direkten Elektrifizierung (unter anderem zur Bereitstellung von Prozesswärme und zum Teil auch für den Einsatz elektrischer Steamcracker), der Kreislaufwirtschaft (v. a. Erhöhung des Anteils des mechanisch und chemisch recycelten Kunststoffes) und der Materialeffizienz als besonders wichtig. Wie auch für die Stahlbranche gibt es insbesondere hinsichtlich der zukünftigen Rolle der Biomasse und des CCS-Einsatzes divergierende Einschätzungen.

Angesichts der teilweise sehr unterschiedlichen Einschätzungen der Szenarien hinsichtlich der wahrscheinlichen bzw. vorteilhaften Strategien erscheinen genauere Analysen der sozio-ökonomischen und ökologischen Vor- und Nachteile verschiedener Klimaschutzstrategien sinnvoll. Solche Analysen sollten dabei auch das Wechselspiel sowohl zwischen verschiedenen Strategien als auch zwischen unterschiedlichen Branchen der Grundstoffindustrie (sowie dem restlichen Industrie- und Energiesystem) in den Blick nehmen.

Während die vorliegende Metaanalyse auf die in den Szenarien beschriebenen Ausprägungen der Branchen im Jahr 2050 fokussiert – mit dem Ziel einer Gegenüberstellung unterschiedlicher Zielvorstellungen für eine (weitgehend) transformierte Grundstoffindustrie – könnten zukünftige Studien verstärkt auch die Unterschiede verschiedener Szenarien hinsichtlich der in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren notwendigen Änderungen in den Blick nehmen. Solche Analysen würden Aussagen über den – je nach Szenario – kurz- bis mittelfristig anstehenden Änderungsbedarf erlauben und könnten dadurch z. B. präzisere Anhaltspunkte für die Identifikation von robusten (d. h. unter vielen denkbaren Entwicklungsrichtungen sinnvollen) politischen Maßnahmen liefern.

Wünschenswert sind zukünftig zudem genauere quantitative Dokumentationen der im Bereich der Industrietransformation erstellten Szenarien bzw. Roadmaps. Durch ausreichend detaillierte und transparente Dokumentationen können die Unterschiede und Gemeinsamkeiten verschiedener Visionen besser nachvollzogen werden. Eine solche Nachvollziehbarkeit ermöglicht weitergehende Analysen dieser Szenarien mit dem Ziel, Wissen hinsichtlich der notwendigen Rahmenbedingungen und Maßnahmen für eine Realisierung dieser Visionen zu generieren. So konnten relevante Studien der letzten Jahre (z. B. ETC 2019, BDI 2018, EUROFER 2019) zu weitgehenden Emissionsreduktionen in den Branchen Stahl, Zement und Chemie aufgrund einer jeweils unzureichenden Datenbasis leider nicht in der vorliegenden Metaanalyse berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende; Agora Verkehrswende; Stiftung Klimaneutralität (2020): Klimaneutrales Deutschland – In drei Schritten zu null Treibhausgasemissionen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals, https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf (13.08.2021).
- BDI (2018): Klimapfade für Deutschland, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf (13.08.2021).
- BMWi (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 – Kurzbericht: 3 Hauptszenarien, https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorerer-wAs-sets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf (13.08.2021).
- Cembureau (2013): The Role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy, https://cembureau.eu/media/cpvoin5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneconomy_2013-09-01.pdf (13.08.2021).
- Cembureau (2020): Cementing the European Green Deal – Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050, https://www.cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf (13.08.2021).
- Conversio Market and Strategy (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, https://www.plasticseurope.org/download_file/force/4020/319 (13.08.2021).
- Covestro (2021): Oxygen depolarized cathode – Energy-saving chlorine production, <https://www.covestro.com/en/sustainability/lighthouse-projects/sauerstoffverzehrkatode> (13.08.2021).
- ETC (2019): Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors, https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2020/08/ETC_MissionPossible_FullReport.pdf (13.08.2021).
- ETH (2018): A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry – Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050, https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/301843/AB_SP_Decarbonisation_report_Final_v2.pdf?sequence=14&isAllowed=y (13.08.2021).
- EUROFER (2019): Low Carbon Roadmap – Pathways to a CO₂-Neutral European Steel Industry, <https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf> (13.08.2021).
- FutureCamp; DECHEMA (2019): Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> (13.08.2021).
- ICF; Fraunhofer ISI (2019a): Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonization, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial_innovation_part_2_en.pdf (13.08.2021).

- ICF; Fraunhofer ISI (2019b): Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 1: Technology Analysis, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial_innovation_part_1_en.pdf (13.08.2021).
- IEA (2018a): Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf> (13.08.2021).
- IEA (2018b): The Future of Petrochemicals – Towards more sustainable plastics and fertilizers, https://iea.blob.core.windows.net/assets/bee4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The_Future_of_Petrochemicals.pdf (13.08.2021).
- IEA (2020): Energy Technology Perspectives 2020, Paris.
- IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector, Paris.
- IPCC (2018): Summary for Policymakers, in: Masson-Delmotte, Valérie u. a. (Hrsg.): Global Warming of 1.5°C, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf (13.08.2021).
- Material Economics (2019): Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry, https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf?cms_fileid=303ee49891120acc9ea3d13bbd498d13 (13.08.2021).
- Samadi, Sascha; Barthel, Claus (2020a): Meta-analysis of industry sector transformation strategies in German, European and global deep decarbonisation scenarios, in: eceee Industrial Summer Study 2020 Proceedings, S. 445-455. <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Rahmenbedingungen/sci4climatenrw-eceee-2020-meta-analysis.pdf> (13.08.2021).
- Samadi, Sascha; Barthel, Claus (2020b): Vergleich der Strategien für weitgehenden Klimaschutz in der Industrie in deutschen, europäischen und globalen Szenarien, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 70, H. 10, S. 32-36. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7611/file/7611_Samadi.pdf (13.08.2021).
- UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE - Studie, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auf_lage2_juni-2021.pdf (13.08.2021).
- UBA (2020): Chemisches Recycling, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf (13.08.2021).
- VDZ (2020): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien, https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf (13.08.2021).