



Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3

-O45-Szenarien-

Modul Industriesektor

Impressum

Langfristszenarien 3

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Dr. Frank Sensfuß, frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de

Consentec GmbH

Grüner Weg 1, 52070 Aachen

Dr. Christoph Maurer, maurer@consentec.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Dr. Tobias Fleiter (Fraunhofer ISI), Tobias.Fleiter@isi.fraunhofer.de

Dr. Matthias Rehfeldt (Fraunhofer ISI); Pia Manz (Fraunhofer ISI); Simon Bussmann (Fraunhofer ISI); Marius Neuwirth (Fraunhofer ISI); Dr. Andrea Herbst (Fraunhofer ISI); Meta Thurid Lotz (Fraunhofer ISI)

Beteiligte Institute

Consentec GmbH

Grüner Weg 1, 52070 Aachen

Dr. Christoph Maurer, maurer@consentec.de (Administrative Leitung)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Dr. Frank Sensfuß, frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de (Projektleitung)

Gerda Deac, gerda.deac@isi.fraunhofer.de (Projektmanagement)

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

Im Weiher 10, 69121 Heidelberg

Peter Mellwig, peter.mellwig@ifeu.de

Technische Universität Berlin

Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Prof. Dr. Joachim Müller-Kirchenbauer, jmk@er.tu-berlin.de

Verfasst im Auftrag von

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Scharnhorststr. 34-37, 10115 Berlin

Veröffentlicht

November 2024

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	7
1.1	Einleitung.....	7
1.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	8
2	Methodik: Das Modell FORECAST	13
2.1	Überblick	13
2.2	Regionale Auflösung	14
2.3	Die Energie- und Emissionsbilanz als Grundlage.....	15
3	Szenariodefinition.....	16
3.1	Überblick der Szenariodefinition O45-Szenarien und Sensitivitäten	16
3.2	Neuerungen in den O45-Szenarien gegenüber den T45-Szenarien.....	19
3.3	Szenariodefinition aus Branchen-Perspektive	19
3.3.1	Herstellung von Eisen und Stahl.....	19
3.3.2	Verarbeitung Steine u. Erden (Zement und Kalk)	23
3.3.3	Grundstoffchemie	25
3.4	Annahmen und techno-ökonomische Parameter.....	36
3.4.1	Wirtschaftliche Entwicklung des Industriesektors	36
3.4.2	Herstellung von Energiewendetechnologien	38
3.4.3	Kreislaufwirtschaft und Umstellung auf Sekundärrouten.....	42
3.4.4	Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette.....	43
3.4.5	Energieeffizienz.....	46
3.4.6	Prozesswechsel auf klimafreundliche Produktionsverfahren.....	46
3.4.7	Brennstoffwechsel in Öfen und Dampferzeugung.....	50
3.4.8	CO ₂ -Abscheidung, Transport und Speicherung.....	52
4	Ergebnisse O45-Orientierungsszenarien	55
4.1	Treibhausgasemissionen	55
4.1.1	Übersicht.....	55
4.1.2	CO ₂ -Abscheidung, Nutzung und Speicherung.....	56
4.1.3	Prozessbedingte Treibhausgasemissionen.....	60
4.2	Energienachfrage	62
4.2.1	Übersicht.....	62
4.2.2	Branchenbetrachtung.....	74
4.2.3	Regionale Energienachfrage.....	79
A.1	Anhang	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modellverbund im Projekt	7
Abbildung 2:	Überblick der Modellstruktur von FORECAST	14
Abbildung 3:	Entwicklung der Rohstahlproduktion nach Verfahren in den O45-Szenarien	20
Abbildung 4:	Hochlauf Produktionsmengen der Direktreduktion zur Stahlproduktion	21
Abbildung 5:	Entwicklung der Zementklinkerproduktion in den O45 Szenarien	25
Abbildung 6:	Wertschöpfungskette Kunststoffe und relevante Kohlenstoffflüsse; in Blau in der Modellierung berücksichtigte Prozesse.....	27
Abbildung 7:	Annahmen zur Produktion von Ethylen nach Verfahren in den O45 Szenarien	28
Abbildung 8:	Kunststoffverbrauch in Deutschland über die Jahre nach Branche.	30
Abbildung 9:	Kunststoffsysteem: Kunststoffverbrauch, das mechanische und chemische Recycling, Kunststoffabfall und übriger Ethylenbedarf.....	33
Abbildung 10:	Prozesskette mechanisches Recycling, basierend auf (Larrain et al. 2021)	34
Abbildung 11:	Prozesskette Gasifizierung mit anschließender Methanolsynthese und MtO-Verfahren	35
Abbildung 12:	Annahmen der Produktionsmengen energieintensiver Produkte.....	38
Abbildung 13:	Prozesskette zur Herstellung von PV-Modulen basierend auf (Fthenakis et al. 2011; Ökobaudat 2022; Hengstler et al. 2021).....	40
Abbildung 14:	Prozesskette zur Herstellung von KFZ-Batterien basierend auf (Dai et al. 2019, Degen und Schütte 2022)	41
Abbildung 15:	Prozesskette zur Herstellung von Windkraftanlagen basierend auf (Ghenai 2012).....	42
Abbildung 16:	Spezifische Investition verschiedener Dampferzeuger	52
Abbildung 17:	Entwicklung der resultierenden Treibhausgasemissionen des Industriesektors.....	55
Abbildung 18:	Schematische Darstellung des CO ₂ -Kreislaufs	57
Abbildung 19:	Entwicklung des CO ₂ -Bedarfs und des abgeschiedenen CO ₂ in O45-Strom	58
Abbildung 20:	Entwicklung des CO ₂ -Bedarfs und des abgeschiedenen CO ₂ in O45-H ₂	58
Abbildung 21:	Mögliches CO ₂ -Netz im Jahr 2045 inkl. Quellen und Senken für O45-Strom	59
Abbildung 22:	Resultierender Energieverbrauch im Industriesektor	63
Abbildung 23:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Industriesektor	64
Abbildung 24:	Entwicklung des fossilen Endenergieverbrauchs im Industriesektor.....	65
Abbildung 25:	Temperaturverteilung des Prozesswärmebedarfs im Jahr 2019	66
Abbildung 26:	Endenergiebedarf in der Prozesswärme.....	68
Abbildung 27:	Endenergiebedarf in der Dampf- und Warmwassererzeugung	68

Abbildung 28: Endenergiebedarf in Industrieöfen.....	70
Abbildung 29: Resultierender Einsatz von Wasserstoff im Industriesektor nach Anwendungen.....	71
Abbildung 30: Resultierender Einsatz von Strom im Industriesektor nach Anwendungen.....	72
Abbildung 31: Stromäquivalente im Industriesektor nach Anwendungen.....	73
Abbildung 32: Endenergiebedarf im Subsektor Metallerzeugung	75
Abbildung 33: Endenergiebedarf im Subsektor Verarbeitung von Steinen und Erden	76
Abbildung 34: Routen zur stofflichen Nutzung von Energieträgern.....	78
Abbildung 35: Stoffliche Nutzung nach Energieträger in den O45-Orientierungsszenarien	79
Abbildung 36: Wasserstoff- und Stromnachfrage in den Bundesländern im Jahr 2045	80
Abbildung 37: Stromnachfrage in den Landkreisen und kreisfreien Städten im Jahr 2045.....	81
Abbildung 38: Wasserstoffnachfrage in den Landkreisen und kreisfreien Städten im Jahr 2045	82
Abbildung 39: Vergleich von O45-H ₂ zu O45-Strom im Jahr 2045: Zusätzliche Wasserstoffnachfrage im Jahr 2045 in den Landkreisen und kreisfreien Städten	83
Abbildung 40: Wasserstoffcluster durch Standorte der Stahl- und Chemieindustrie im Jahr 2045.	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der Ergebnisse der O45-Szenarien für die Industrie im Vergleich zu den T45-Szenarien	9
Tabelle 2:	Verteilschlüssel und statistische Größen für die regionale Auflösung.....	15
Tabelle 3:	Definition der O45 Szenarien für den Industriesektor	16
Tabelle 4:	Annahmen zu Prozess- und Brennstoffwechsel im Industriesektor in den O45-Szenarien	17
Tabelle 5:	Vermeidungshebel Metallerzeugung in den O45-Szenarien	22
Tabelle 6:	Vermeidungshebel Subsektor Steine- und Erden.....	24
Tabelle 7:	Vermeidungshebel Grundstoffchemie in den O45 Szenarien.....	29
Tabelle 8:	Annahmen zur Entwicklung des Potenzials für Kunststoffherstellung und des sich daraus ergebenden verbleibenden Ethylenbedarfs.....	32
Tabelle 9:	Techno-Ökonomische Parameter des Mechanischen Recyclings	34
Tabelle 10:	Techno-Ökonomische Parameter des Prozesses zur Gasifizierung von Kunststoffabfall mit anschließender Methanolsynthese	36
Tabelle 11:	Bruttowertschöpfung und Wachstum	36
Tabelle 12:	Hauptannahmen zu berücksichtigen Energiewendetechnologien	39
Tabelle 13:	Annahmen zur Kreislaufwirtschaft in den O45 Szenarien.....	43
Tabelle 14:	Annahmen zum Fortschritt der Materialeffizienz in O45-Szenarien	45
Tabelle 15:	Übersicht der Annahmen zu klimafreundlichen Produktionsverfahren	48
Tabelle 16:	Technologieannahmen Prozessdampf- und Warmwasser	51
Tabelle 17:	Angenommene Parameter CCU/S	54
Tabelle 18:	Mengenabschätzungen CCU/S und geschätzte Länge eines möglichen CO ₂ -Netzes im Jahr 2045	60
Tabelle 19:	Prozessbedingte Treibhausgasemissionen in O45-Strom.....	61
Tabelle 20:	Entwicklung der Energieintensität im Szenario O45-Strom.....	74

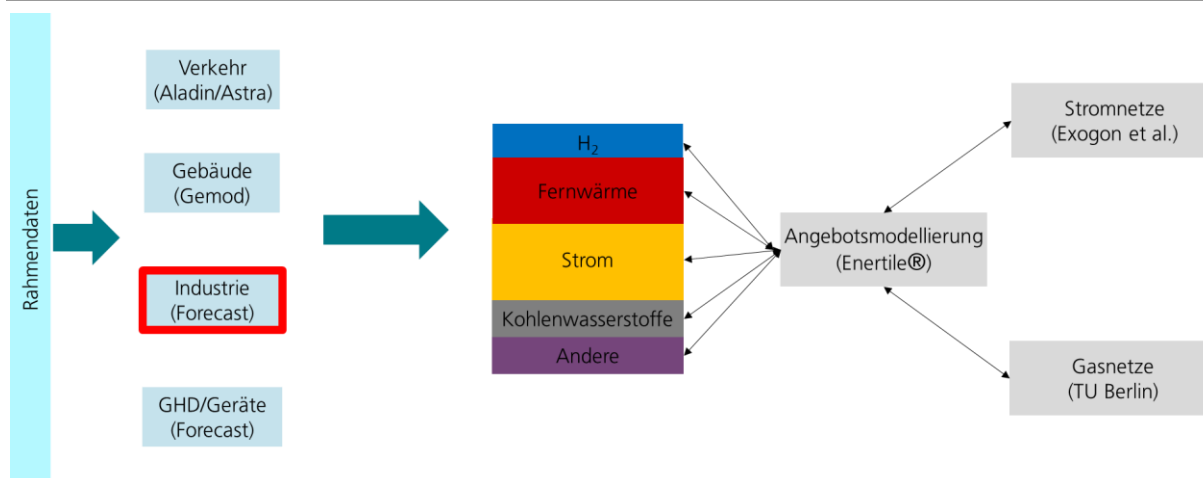
1 Zusammenfassung

1.1 Einleitung

Im Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) werden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz Szenarien für die zukünftige Entwicklung eines treibhausgasneutralen Energiesystems modelliert. Die Modellierung umfasst das gesamte Energiesystem, also übergreifend die Erzeugung von Strom, Wärme und Wasserstoff sowie die Nachfrage nach Energie in den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und Geräte. Die Energieinfrastrukturen (Strom und Gase) werden ebenfalls modelliert. Im Fokus der Analyse steht dabei nicht die Entwicklung eines einzelnen „Leitszenarios“, sondern die Untersuchung von unterschiedlichen Szenariowelten, um durch die vergleichenden Analysen Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile alternativer Pfade für die Transformation des Energiesystems zu gewinnen.

Somit können Pfadabhängigkeiten und robuste Entwicklungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität identifiziert werden. Um die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen den Sektoren adäquat zu erfassen, ist der Einsatz eines komplexen Modellverbunds nötig. Im Projekt Langfristszenarien 3 koppeln wir spezialisierte Sektormodelle für Gebäude, Industrie, Verkehr, GHD & Geräte¹, Energieangebot, Gasnetze und Stromnetze, um eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen.

Abbildung 1: Modellverbund im Projekt



Für die Nachfragesektoren wurden dabei in drei aufeinander aufbauenden Phasen jeweils mehrere Szenarien berechnet:

1. In einem ersten Schritt wurden im Jahr 2021 drei Szenarien veröffentlicht, die jeweils stark auf den Einsatz vorrangig eines Energieträgers für die Dekarbonisierung setzen (TN-Szenarien, siehe www.langfristszenarien.de).
2. Durch die T45-Szenarien wurden die TN-Szenarien aktualisiert und das Klimaschutzgesetz entsprechend der Novelle im Jahr 2021 mit den Sektorzielen für das Jahr 2030 und dem Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 berücksichtigt. Diese aktualisierten

¹ Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie Haushaltsgeräte

Grundszenarien, T45-Strom, T45-PtG/PtL, T45-H₂, orientierten sich an ähnlichen drei Szenariowelten wie bereits die TN-Szenarien.

3. Die mit diesem Bericht neuen O45-Szenarien (Orientierungsszenarien) reduzieren die Zahl der Szenariowelten auf zwei. Das Szenario O45-Strom setzt auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Das Szenario O45-H₂ setzt auf eine starke Nutzung von Wasserstoff im Energiesystem. Zusätzlich differenzieren die Szenarien bei den Transformationspfaden der chemischen Industrie, um hohe vorhandene Unsicherheiten abzubilden.

Der vorliegende Bericht enthält die Szenarien aus der dritten Phase, den O45-Szenarien und beschreibt Methodik und die Ergebnisse für den Sektor Industrie. Für die Quantifizierung der Szenarien wird das Sektormodell FORECAST eingesetzt. Der Modellansatz ermöglicht eine breite Berücksichtigung verschiedener Strategien zum Erreichen der nahezu CO₂-neutralen Industrie, wie beispielsweise der Einsatz CO₂-neutraler Energieträger, der Fortschritt bei Recycling und Materialeffizienz oder CCU/S. Die Ergebnisse werden für die zwei Grundszenarien vergleichend dargestellt. Es wird besonders auf die Entwicklungen in den Sektoren der Grundstoffindustrie, Eisen und Stahl, Grundstoffchemie sowie Zement und Kalk eingegangen, da diese mit den höchsten THG-Emissionen die Schlüsselsektoren für die Dekarbonisierung sind.

Begleitend zum Bericht ist auf www.langfristszenarien.de ein Datenexplorer mit Annahmen und Ergebnissen der Modellrechnungen verfügbar. Die Daten der Tabellen und Diagramme des Berichts sind in Form einer Excel-Datei verfügbar.

1.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Transformation zur nahezu treibhausgasneutral produzierenden Industrie in Deutschland auf beiden untersuchten Technologiepfaden möglich ist. Die Orientierungsszenarien O45-Strom und O45-H₂ erreichen eine THG-Minderung von etwa 97 % im Jahr 2045 gegenüber dem Jahr 1990 (siehe Tabelle 1). Sie bestätigen damit die Erkenntnisse der vorangegangenen T45-Szenarien und zeigen, wie beide Pfade den Industriesektor nah an die Klimaneutralität bringen können. Beide Transformationspfade verlangen eine grundlegende Umstellung von Energieversorgung, Produktionsprozessen und Wertschöpfungsketten, besonders in der energieintensiven Grundstoffindustrie sowie den Aufbau neuer Infrastrukturen für Wasserstoff und CO₂ sowie einen Ausbau der elektrischen Infrastruktur.

Wichtige Voraussetzungen für das Erreichen dieser Zielszenarien bzw. die Umstellung auf eine nahezu treibhausgasneutrale Produktion bis zum Jahr 2045 sind im Folgenden zusammengefasst.

Schnelle Markteinführung von klimafreundlichen Herstellungsverfahren. Bis zum Jahr 2030 müssen in allen Branchen klimafreundliche Anlagen im industrieüblichen Maßstab betrieben werden und bis zum Jahr 2045 der Anlagenbestand vollständig umgestellt sein: Das THG-Minderungspotential klassischer inkrementeller Verbesserungen im Bestand reicht zur Zielerreichung nicht aus. Wichtige Technologiebeispiele sind die Direktreduktion von Eisenerz als Ersatz der bestehenden Hochöfen in der Stahlherstellung, die Umstellung auf CO₂-neutrale Chemieprodukte durch den Ersatz fossil betriebener Steamcracker und elektrische oder mit Wasserstoff befeuerte Glasschmelzwannen.

Nahezu vollständiger Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger. Die Umstellung von Herstellungsverfahren erlaubt den kompletten Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger. Einzige Ausnahme bildet in allen Szenarien der Einsatz von Ersatzbrennstoff, wie etwa Kunststoffabfälle, in den Öfen der Zementindustrie. Da alle Zementwerke in den Szenarien mit CO₂-Abscheidung ausgestattet sind, wird ein Großteil ihrer CO₂-Emissionen abgeschieden und entweder

genutzt oder gespeichert. Direkte und indirekte Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung bilden das Rückgrat des Ausstiegs aus fossilen Energieträgern in der Industrie.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der O45-Szenarien für die Industrie im Vergleich zu den T45-Szenarien

	Einheit	O45-Strom	O45-H2	T45-Strom	T-45PtG/PtL	T45-H2
Wertschöpfung*	%/Jahr	1%	1%	1%	1%	1%
THG-Minderung 2030**	%	59%	55%	58%	56%	59%
THG-Minderung 2045	%	97%	97%	97%	97%	96%
Energieeffizienz	-	++	++	++	++	++
Materialeffizienz und Kreislauf	-	++	++	++	++	++
Erdgasbedarf (inkl. stofflich) 2030	TWh	186	218	184	222	178
Biomassebedarf 2045	TWh	26	13	23	26	16
Wasserstoffbedarf 2045	TWh	201	442	289	0	437
PtL 2045	TWh	93	39	84	182	51
PtG 2045	TWh	2	1	0	269	
Elektrifizierung Prozesswärme 2045	TWh	215	80	161	76	72
CCU/S 2045	MtCO ₂	13	12	15	16	13

* Teil der Szenariodefinition

** Das 2030-Sektorziel wurde indikativ vorgegeben, in O45-H₂ begründet knapp verfehlt

Einsatz großer Mengen von grünem Strom und Wasserstoff, andere klimaneutrale Energieträger in Nischen.

Klimafreundliche Herstellungsverfahren benötigen in den meisten Fällen große Mengen CO₂-neutraler Sekundärenergieträger. Hohe Temperaturen und Energiedichten schließen den direkten Einsatz einiger Formen Erneuerbarer Energien wie Solarthermie oder Geothermie in vielen Branchen aus. Diese sind nach derzeitigem Stand der Technik auf Anwendungen im Bereich der Prozesswärme unter 200°C beschränkt, z. B. in der Nahrungsmittel- oder der Papierindustrie. Hier spielen in den Szenarien auch Hochtemperaturwärmepumpen und Fernwärme eine wichtige Rolle.

Die Elektrifizierung der Prozesswärme ist in beiden Szenarien eine wichtige Strategie, aber unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die Elektrifizierung der Prozesswärme ist im Szenario O45-Strom stark ausgeprägt, findet aber auch im Szenario O45-H₂ statt und kann insofern als robuste Lösungsstrategie angesehen werden. Im Szenario O45-Strom ist die Elektrifizierung die zentrale Strategie zur klimafreundlichen Bereitstellung von Prozesswärme in nahezu allen Branchen. Während im Bereich der Warmwasser- und Dampfversorgung z. B. in der Papier-, Lebensmittel- und Chemieindustrie Techniken wie Elektrodenkessel und Wärmepumpen bereits industriell eingesetzt werden, so ist das Bild bei den Hochtemperaturanwendungen weniger eindeutig. In einigen Anwendungen sind elektrische Techniken bereits verfügbar, besonders in der Metallindustrie, während eine Vollelektrifizierung bei vielen Anwendungen noch Technologieentwicklung und Hochskalierung benötigt – besonders in den Branchen der Mineralindustrie (Rehfeldt et al. 2024). Auch gilt es, Hemmnisse beim nötigen Stromnetzausbau und -Anschluss zu überwinden (Siehe z. B. Fleiter et al. (2024b)).

Grüner Wasserstoff mit großem Potenzial zur CO₂-neutralen Bereitstellung von Prozesswärme.

In den meisten Branchen wird der heutige Anlagenbestand in der Prozesswärme mit Erdgas befeuert. Potenziale für eine Umstellung auf Wasserstoff sind groß und technische sowie wirtschaftliche Herausforderungen hängen hauptsächlich mit der Verfügbarkeit und den perspektivischen Kosten von Wasserstoff zusammen. Die Umstellung auf eine Beheizung mit Wasserstoff ist technisch in vielen Branchen möglich und verlangt häufig eine weniger

grundlegenden Umbau von Anlagen wie die Elektrifizierung. Gleichzeitig ist auch beim Einsatz von Wasserstoff in den meisten Anwendungen noch Erprobung und Demonstration auf industriellem Niveau erforderlich. Auch im Szenario O45-Strom spielt Wasserstoff eine wichtige Rolle in der Prozesswärme. Besonders dort, wo Energiedichten und Temperaturen sehr hoch sind, und eine reine Elektrifizierung herausfordernd ist. Ein hybrides System mit Wasserstoff ermöglicht dort die Teilelektrifizierung. Im Szenario O45-H₂ werden weite Teile der Prozesswärme über Wasserstoff versorgt, was einen Anschluss vieler „kleinerer“ Standorte aus Branchen wie Metallbearbeitung, Glas, Keramik, Ziegel, Zement, Kalk und weiteren an das Wasserstoffkernnetz voraussetzt. Elektrifizierung ist in O45-H₂ auf Hochtemperaturwärmepumpen in der Nahrungsmittel- und Papierindustrie sowie ausgewählten Hochtemperaturanwendungen (z. B. Lichtbogenöfen in der Stahlerzeugung, elektrifizierte Dampfpaltöfen in der Chemie) konzentriert.

Grüner Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe sind CO₂-neutrale Rohstoffe für die Chemieindustrie und Reduktionsmittel für die Stahlherstellung. In der Chemieindustrie besteht in konventionellen Verfahren für die Herstellung von Olefinen und Aromaten ein sehr hoher Bedarf an fossilen Energien. Alle Szenarien benötigen große Mengen Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe für die Umstellung der Chemieindustrie und die Stahlherstellung auf CO₂-arme Produktionsrouten. In den O45-Szenarien werden alle heute fossil betriebenen Steamcracker durch eine Kombination aus elektrischen Steamcrackern und MtO/MtA Routen ersetzt. Diese nutzen Methanol als Zwischenprodukt um Ethylen und weitere Olefine sowie Aromaten herzustellen. In O45-Strom verringert der Einsatz von chemischem Kunststoffrecycling die stoffliche Wasserstoffnutzung. Weitere stoffliche Energieträger (Ammoniak, grünes Naphtha und andere PtL-Produkte) werden importiert. In O45-H₂ liegt ein stärkerer Fokus auf der inländischen Nutzung von Wasserstoff, Import und Kunststoffrecycling spielen in diesem Szenario eine geringere Rolle.

Energie- und Materialeffizienz sowie Steigerung der Kreislaufwirtschaft vereinfachen eine klimaneutrale Energieversorgung. In allen O45-Szenarien sind ambitionierte Fortschritte bei Energie- und Materialeffizienz wichtige Hebel, um den Bedarf an hochwertigen klimaneutralen Energieträgern zu verringern. Fortschritte bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft sind besonders bei den energieintensiven Grundstoffen nötig, die zu einem großen Teil in der Bauwirtschaft genutzt werden. Die Szenarien fokussieren stark die Vermeidungsstrategien Effizienz und Konsistenz – Suffizienz ist nicht berücksichtigt.

CCU und CCS als wichtiger Teil der Strategie, um verbleibende prozessbedingte Emissionen in der Zement- und Kalkherstellung zu adressieren.

In allen Szenarien verbleiben in der Zement- sowie Kalkherstellung selbst nach ambitioniertem Umsetzen von primären Vermeidungsoptionen noch erhebliche prozessbedingte CO₂-Emissionen. Bis zum Jahr 2045 wird in allen Szenarien daher eine CO₂-Abscheidung in der gesamten Zementindustrie und in großen Teilen der Kalkwerke aufgebaut. Das hier abgeschiedene CO₂ wird zu einem Rohstoff und für die Herstellung von Olefinen und Aromaten in der Chemieindustrie benötigt. Restmengen werden unterirdisch gespeichert. Über den Einsatz von CO₂-Abscheidung in Müllverbrennungsanlagen wird der CO₂-Kreislauf teilweise geschlossen und der Bedarf an CO₂ für die stoffliche Verwendung in der Chemieindustrie kann gedeckt werden. Die insgesamt an Zement- und Kalkwerken abgeschiedenen CO₂-Emissionen sind in den Szenarien in ähnlicher Größenordnung (11 bis 13 Mt_{CO2}). Aufgrund unterschiedlicher Ambitionen im Recycling entstehen starke Unterschiede in an Müllverbrennungsanlagen abzuschheidenden CO₂-Mengen von 17 Mt_{CO2} in O45-Strom bis zu 27 Mt_{CO2} in O45-H₂.

Die O45-Szenarien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich des Umbaubedarfs im industriellen Anlagenpark sowie der nötigen Energieinfrastruktur.

Das Szenario **O45-H₂** erfordert besonders auf Seiten der Wasserstofftransportinfrastruktur einen grundlegenden und sehr umfassenden Ausbau – bis in die Verteilebene. Der in diesem Szenario untersuchte breite Einsatz von Wasserstoff in der Industrie erhöht den auf zur Herstellung benötigte Stromäquivalente umgerechneten Strombedarf um 209 TWh (29 %). Das Szenario **O45-Strom** weist eine noch tiefgreifendere und umfassendere Umstellung des industriellen Anlagenparks auf. Die Elektrifizierung von Öfen und Dampferzeugern ist in den meisten Fällen mit einem Austausch der Anlagen verbunden. Anforderungen an die Transportinfrastruktur bei Strom und Wasserstoff sind erheblich. Allerdings ist für die Deckung des entstehenden Wasserstoffbedarfes in O45-Strom ein Transportnetz ausreichend, welches sich auf große Nachfragezentren konzentriert. Eine Versorgung mit Wasserstoff in der Verteilnetzebene beschränkt sich auf Regionen nahe dieser Zentren. Beim Stromnetz geht es besonders darum, lokale Engpässe durch stark ansteigenden Strombedarf an einzelnen großen Industrieanlagen zu vermeiden.

Das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 kann erreicht werden, verlangt aber schnelle Fortschritte bei den Schlüsseltechniken.

2030 übererfüllt O45-Strom das Sektorziel der Industrie, welches für den Industriesektor eine Minderung von 58 % gegenüber 1990 vorgibt und ein kumuliertes Budget (2021-2030) von 1517 MtCO₂-Äq. vorsieht (O45-Strom: 1494 MtCO₂-Äq.). O45-H₂ verfehlt mit 55 % Minderung diese Zielmarke (1534 MtCO₂-Äq.). Die Abweichungen liegen im zu erwartenden Bereich der Unsicherheit. Sie zeigen aber, dass die in O45-H₂ verfolgte Strategie des massiven Einsatzes von Wasserstoff in der Breite ein Risiko für die kurzfristige Zielerreichung darstellen kann – wenn durch an die Verfügbarkeit von Wasserstoff gekoppelte Verzögerungen eintreten.

Entscheidend für die Zielerreichung sind **schnelle Fortschritte bei Schlüsseltechniken mit großen Vermeidungspotenzialen**. Diese sind im Folgenden beschrieben.

- **Der Umbau der Stahlindustrie** ermöglicht es, bereits bis zum Jahr 2030 große Mengen CO₂-intensive Kohle durch Erdgas und Wasserstoff zu ersetzen. In allen Szenarien sind bis zum Jahr 2030 bereits substanzielle Produktionskapazitäten von etwa 14 Millionen Tonnen Rohstahl pro Jahr von der Hochofenroute auf das Verfahren der Direktreduktion umgestellt. Dies entspricht mehr als die Hälfte der heute bestehenden Primärproduktionskapazität. Ein Vergleich mit Ankündigungen der Stahlhersteller sowie mit dem technischen Modernisierungsbedarf zeigt, dass diese Größenordnung grundsätzlich möglich scheint. Alle großen Stahlhersteller in Deutschland haben bereits Investitionsentscheidungen für die Umstellung erster Hochöfen getroffen bzw. Förderbescheide erhalten. In Summe machen diese bereits etwa 7 Millionen Tonnen Produktionskapazität aus während auch darüber hinaus Pläne bestehen (siehe Abschnitt 3.3.1). Die Direktreduktionsanlagen werden in einer Übergangsphase hybrid – mit Wasserstoff und Erdgas betrieben – wodurch Flexibilitätspotentiale entstehen und Unsicherheiten der Investitionen reduziert werden können.
- **Der großindustrielle Einsatz von Strom und Wasserstoff in der Prozesswärme** als Ersatz von Erdgas ist Voraussetzung für die Zielerreichung. Die O45-Szenarien zeigen bis 2030 bereits deutliche Bedarfe an Strom und Wasserstoff (in Summe 60 - 80 TWh) für die Versorgung der Prozesswärme in nahezu allen Branchen gegenüber etwa 14 TWh Strom und 232 TWh Erdgas im Jahr 2021. Dieser Ausbau verlangt nicht nur die Förderung von Investitionen, sondern insbesondere eine Reform der Energiebesteuerung sowie der Netzentgelte. Die Elektrifizierung ist in den meisten Fällen aufgrund der hohen Strompreise sowie Hemmnissen aus den Netzentgeltstrukturen aktuell nicht wettbewerbsfähig gegenüber dem Einsatz von Erdgas. In der Transformationsphase kann eine hybride Erzeugung von

Prozessdampf über Strom und Erdgas (langfristig Strom und Wasserstoff) die Transformation ermöglichen, indem der elektrische Betrieb Zeiten niedriger Strompreise nutzt und Investitionsrisiken reduziert. Eine Reform der Netzentgelte und weitere Maßnahmen wären nötig, um den breiten Einstieg in die hybride Prozesswärme zu ermöglichen (siehe für vertiefende Diskussion: Münnich, Paul, Metz, Julia, Hauser, Philipp D. et al. (2022), (Fleiter et al. 2024a)).

- **Schneller Ausbau der Erneuerbaren im Stromsektor sowie die Verfügbarkeit großer Mengen von grünem Wasserstoff** sind Voraussetzung. Diese müssen zur wettbewerbsfähigen Preisen verfügbar sein. Anders als in den Sektoren Gebäude und Verkehr ist eine Elektrifizierung der Prozesswärme in vielen Anwendungen nicht mit hohen Effizienzgewinnen verbunden. Entsprechend besteht die Gefahr, dass eine Elektrifizierung (oder der Einsatz von Wasserstoff) die Emissionen kurzfristig lediglich vom Industriesektor in den Energiesektor verlagert und so die Zielerreichung im Energiesektor gefährdet, wenn nicht zügig die erneuerbaren Energien ausgebaut werden. Wird die gesamte Lebensdauer der Industrieanlagen betrachtet, wirken aber auch frühe Investitionen in Brennstoffwechsel emissionsmindernd – und können die Modernisierungsherausforderungen entzerren. Reinvestitionen in fossile Anlagen sind jedenfalls zu vermeiden.

Eine Bewertung der Zielerreichung im Jahr 2030 ist mit großen Unsicherheiten verbunden.

Alle Szenarien enthalten Annahmen zur Produktionsentwicklung energieintensiver Branchen. Andere wirtschaftliche Dynamiken können das Bild für die Zielerreichung deutlich verändern - in beide Richtungen. Besonders entscheidend sind die energie- und emissionsintensiven Branchen Stahl und Chemie sowie die Entwicklung der Produktionsmengen aus den Krisen der frühen 2020-er Jahre heraus.

Um die nötige Transformation bis zu den Jahren 2030 und 2045 anzustoßen, ist eine grundlegende Anpassung des regulatorischen Rahmens nötig.

Mit dem heutigen Rahmen (Stand Sommer 2024) scheint eine Zielerreichung in 2030 möglich, aber unsicher (Harthan et al. 2024). Zentrale Herausforderungen sind hohe Betriebskosten CO₂-neutraler Verfahren, Infrastrukturausbau bei Strom, Wasserstoff und CO₂, effektive Umsetzung von CO₂-Preissignalen entlang von Wertschöpfungsketten und die Reduzierung von Unsicherheiten großer strategischer Investitionen in CO₂-neutrale Verfahren u.a. durch besser planbare Verfügbarkeit und Preise erneuerbarer Energieträger. Insbesondere geht es für die kommenden Jahre darum, eine klare Perspektive für den wirtschaftlichen, groß-industriellen Betrieb CO₂-neutraler Herstellungsverfahren zu schaffen, damit Unternehmen die nötigen Investitionen und strategischen Weichenstellungen anstoßen. Dabei ist die internationale Wettbewerbsfähigkeit vor dem Hintergrund von Carbon-Leakage-Gefahren zu berücksichtigen.

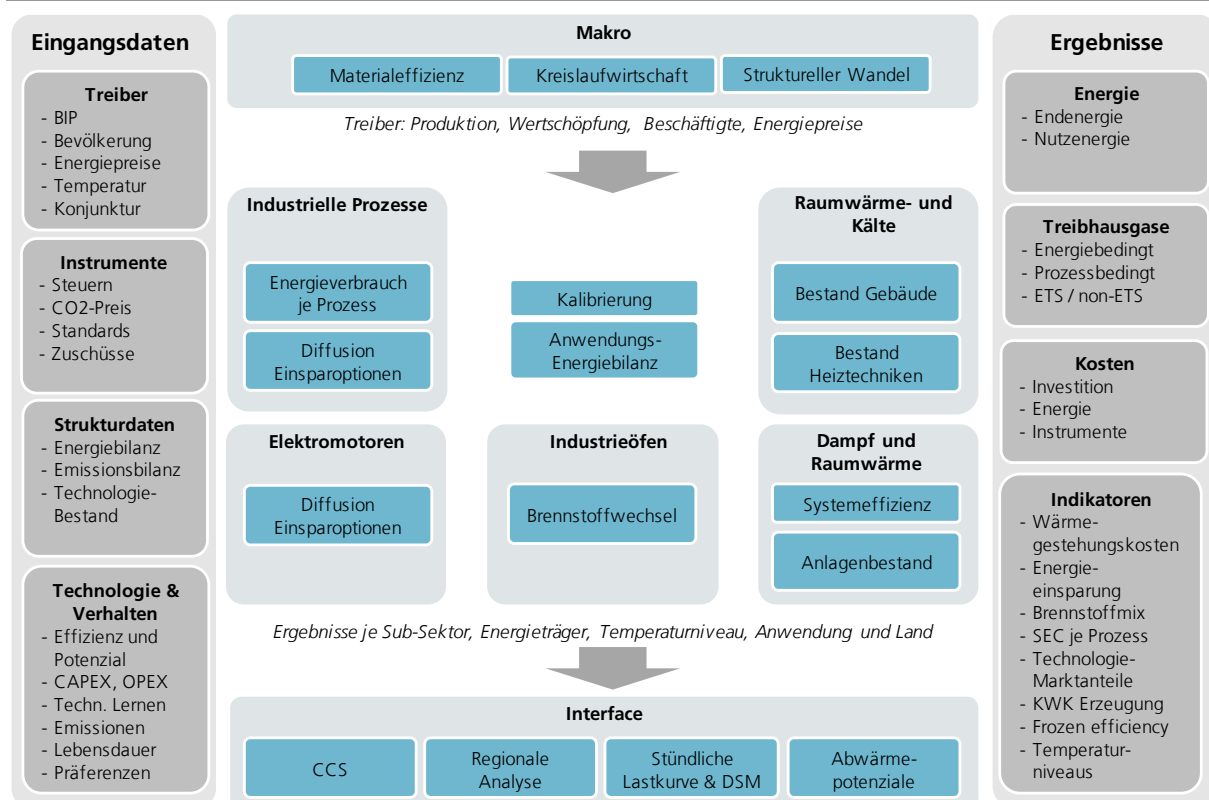
2 Methodik: Das Modell FORECAST

2.1 Überblick

Zur Berechnung der Szenarien für den Industriesektor wird das Modell FORECAST eingesetzt. Es bildet die Technologiestruktur der Industrie ab und berechnet Energieverbrauch und Emissionen sowie Kosten auf Prozess- und Branchenebene. FORECAST unterteilt die Industrie anhand der Energiebilanzen in einzelne Wirtschaftszweige bzw. Subsektoren. Diesen sind Prozesse zugeordnet, welche durch einen spezifischen Energieverbrauch und eine Aktivitätsgröße beschrieben werden. Weiterhin werden Technologiebereiche wie Elektromotoren, Industrieöfen, Raumwärme und Dampferzeugung prozessübergreifend modelliert. Eingangsdaten für die Modellierung sind übergreifende Aktivitätsgrößen wie die Wirtschaftsleistung je Branche, Energie- und CO₂-Preise, Annahmen zu Instrumenten, Strukturdaten wie Energie- und THG-Bilanzen sowie techno-ökonomische Parameter der abgebildeten Technologien (siehe Abbildung 2). Zur Parametrisierung wird auf statistische Daten, empirische Studien, Literatur und Einschätzungen von Fachleuten zurückgegriffen. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in Fleiter et al. (2018).

Für die Berechnung von Dekarbonisierungsszenarien können alle wichtigen Dekarbonisierungsstrategien berücksichtigt werden:

- Verbesserung der **Energieeffizienz durch beste verfügbare Technik (BVT)** der bestehenden Anlagen: Hohe Auflösung bei Prozessen und umfassende Datenbank zu Einspartechniken erlauben möglichst genaue Bewertung des vorhandenen Effizienz-Potenzials.
- **Prozesswechsel auf CO₂-arme bzw. CO₂-neutrale Herstellungsverfahren**: Hohe Auflösung bei Produktionsrouten und Prozessen erlaubt konkrete Annahmen zum Wechsel auf neue Herstellungsverfahren je Produktionsroute. Neue Verfahren sind ggfs. auch mit dem Wechsel auf einen anderen Energieträger verbunden (z. B. Wasserstoff oder Strom).
- **Brennstoffwechsel**: Bestandsmodell der Dampferzeuger inkl. Discrete-Choice-Modellierung der Investitionsentscheidung erlaubt endogene Simulation des Brennstoffwechsels entsprechend Wirtschaftlichkeit und Technologiebestand der verschiedenen Dampferzeuger. Ein vereinfachter Discrete-Choice-Ansatz wird für die Modellierung des Brennstoffwechsels bei Industrieöfen verwendet (Rehfeldt et al. 2018). Dabei ist ein Wechsel auf Biomasse, Strom (Elektrokessel, Wärmepumpen), Wasserstoff oder PtG (Power-to-Gas) möglich.
- **CO₂-Abscheidung, -Speicherung und Nutzung (CCS)**: Hohe Prozessauflösung erlaubt Zuordnung von CO₂-Abscheidung und Nutzung zu ausgewählten Prozessen, z. B. um verbleibende prozessbedingte Emissionen zu mindern, chemische Feedstocks herzustellen und ggf. Negativemissionen zu realisieren.
- **Recycling und Materialeffizienz** entlang der Wertschöpfungskette: Große Anzahl berücksichtigter Produkte und separate Modellierung von Primär- und Sekundärrouten erlaubt je Szenario spezifische Annahmen zum Fortschritt bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft.

Abbildung 2: Überblick der Modellstruktur von FORECAST

Quelle: Fleiter et al. (2018) und Fraunhofer ISI

2.2 Regionale Auflösung

Die Berechnungen der Energienachfrage des Industriesektors werden zunächst auf nationaler Ebene durchgeführt, die regionale Auflösung wird in einem nachgelagerten Schritt ergänzt. Die regionale Analyse der Energienachfrage wird mithilfe des Modells FORECAST-Regional (Elsland et al. 2015) durchgeführt. Dies ist ein nachgelagertes Teilmodell im Energienachfragemodell FORECAST. Die nationalen Nachfrageergebnisse werden mit hoher technologischer Auflösung (bspw. nach Subsektoren und Prozesse) über die modellinterne Schnittstelle übergeben. Zusätzlich werden szenariospezifische Annahmen übergeben, um die Entwicklung der jeweiligen Subsektoren entsprechend zu erfassen. Mithilfe von regionalen Verteilschlüsseln wird die nationale Nachfrage auf die regionalen Einheiten aufgeteilt. Um die jeweiligen regionalen technologischen und Einflussparameter der Subsektoren und Technologien zu erfassen, liegen die Verteilschlüssel entsprechend vor. Der Ergebnisdatsatz enthält die nach Subsektoren, Anwendungen, Technologien und Energieträgern aufgelöste jährliche Energienachfrage auf Ebene der Landkreise bzw. kreisfreien Städte (NUTS 3).

In Tabelle 2 sind die zentralen Verteilschlüssel dargestellt. Mithilfe dieser Verteilschlüssel wird die Energienachfrage in der gleichen technologischen Auflösung wie die nationalen Ergebnisse auf die Regionen verteilt.

Die energieintensiven Prozesse können standortscharf zugeordnet werden (Manz et al. 2021). Diese europaweite Datenbank der Industriestandorte beinhaltet für Deutschland ca. 850 Standorte der energieintensiven Produkte wie Herstellung von Zement, Stahl, Papier sowie Standorte der chemischen und petrochemischen Industrie. In der Datenbank sind Prozessinformationen (eingesetzte Technologie, jährliche Produktion) hinterlegt, welche als Verteilschlüssel genutzt werden. Zentrale Annahmen für die Regionalisierung und damit Unsicherheiten sind einerseits die

Erhaltung der existierenden Industriestandorte sowie andererseits eine Entwicklung und Transformation der einzelnen Standorte entsprechend dem nationalen Durchschnitt für den jeweiligen Prozess.

Die Energienachfrage der nicht-energieintensiven Industrie wird mithilfe der Beschäftigtenstatistiken pro Subsektor² verteilt. Die jeweilige Veränderung der regionalen Nachfrage durch Effizienzfortschritt und Wirtschaftswachstum wird konsistent der nationalen Annahmen erfasst. Strukturelle Verschiebungen zwischen den Regionen werden ausgeschlossen.

Die Energienachfrage für Batteriefabriken wurde ebenfalls über standortspezifische Produktionskapazitäten verteilt. Dafür wurde die Zellproduktionsdatenbank des Fraunhofer ISI genutzt. Diese listet alle für Deutschland angekündigten Standorte für Batteriezellenfertigung zusammen mit der geplanten jährlichen Produktion auf, die durch Pressemitteilungen o.ä. derzeit bekannt sind. Unsicherheiten ergeben sich daraus, dass die Produktionskapazität zukünftig nicht der Planung entsprechen muss und dass auch weitere Standorte entstehen könnten, die derzeit noch nicht bekannt sind.

Tabelle 2: Verteilschlüssel und statistische Größen für die regionale Auflösung

Sektor	Verteilschlüssel	Auflösung
Industrie	Produktionsmengen je Prozess	Koordinaten/NUTS 3
Industrie	Entwicklung innovativer Prozesse	National
Industrie	Beschäftigte pro Subsektor	NUTS 3
Industrie	Entwicklung Beschäftigte pro Subsektor	NUTS 3

Quelle: Fraunhofer ISI

2.3 Die Energie- und Emissionsbilanz als Grundlage

Das eingesetzte Modell FORECAST ist auf die Definition und Systemgrenze der Endenergie entsprechend der Energiebilanzen Deutschlands (AGEB) abgestimmt. Dies betrifft die Wahl der Systemgrenze³ und die Verteilung auf Energieträger und Industriesektoren. Für die Berichterstattung von Treibhausgasemissionen sind die offiziellen Angaben im Nationalen Inventarbericht (NIR) maßgeblich. Eine ausführliche Beschreibung der THG-Bilanzierung und der Verbindung mit den Energiebilanzen findet sich im Vorgängerbericht zu den T45-Szenarien. Dort wird auch beschrieben, wie die Endenergiebilanz um die Bilanzierung stofflich genutzter Energieträger ergänzt wird (nicht energetischer Bedarf).

² Statistisches Bundesamt (Destatis). Regionaldatenbank Genesis, Betriebe und Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen. Tabelle 42111-02-03-4. Aufgerufen am 14.05.2020

³ Dadurch sind z. B. Raffinerien dem Umwandlungssektor zugeordnet. Abweichend von der AGEB-Systematik sind Hoch- und Koksöfen der Stahlerzeugung zugeordnet.

3 Szenariodefinition

3.1 Überblick der Szenariodefinition O45-Szenarien und Sensitivitäten

Es werden zwei Szenarien berechnet, die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 und nach Möglichkeit die Sektorziele des Klimaschutzgesetzes (Novelle 2021) bis zum Jahr 2030 – und damit einen Beitrag zur Gesamtzieelerreichung – einhalten. Ziel der Industrieszenarien ist es u.a., eine Grundlage für Belastungsfälle des Stromnetzes und des Wasserstoffnetzes zu schaffen, welche darauf mit nachgelagerten System- und Netzmodellen geprüft werden. Die O45-Szenarien leuchten den Lösungsraum in der Dimension der Technologieschwerpunkte Elektrifizierung (O45-Strom) und Wasserstoff (O45-H₂) aus.

Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien zu erlauben, sind alle Annahmen zu Randbedingungen wie THG-Ziele, Energiepreise und wirtschaftliche Entwicklung in beiden Szenarien gleich. Auch Annahmen zu Vermeidungshebeln, die nicht im Fokus der Analyse stehen, sind gleich. So trägt Biomasse annahmebedingt nur geringfügig zur Lösung bei und der Einsatz in der Industrie verbleibt etwas unter dem heutigen Niveau. Bei den Strategien Energie- und Materialeffizienz sowie Kreislaufwirtschaft wurde in allen Szenarien ein ambitionierter Fortschritt angenommen, der von einer Beschleunigung gegenüber den vergangenen Trends ausgeht. CO₂-Abscheidung wird in der Zement- und Kalkindustrie zugelassen, da entsprechende CO₂-Emissionen ansonsten nur schwierig oder nicht vermeidbar sind. Unterschiede zwischen den Szenarien sind auf die Energieversorgung der Industrie beschränkt und ergeben sich durch die jeweils angenommene Verteilung von Subventionen auf die Technologiebereiche. Tabelle 3 gibt einen Überblick der Szenariodefinition für die O45-Grundszzenarien.

Tabelle 3: Definition der O45 Szenarien für den Industriesektor

	Alle O45 Szenarien
Ziel THG Minderung 2045	Mindestens 95 % gegenüber 1990 für den Industriesektor (dabei THG-Neutralität Gesamtsystem in 2045 nach Klimaschutzgesetz vom August 2021)
Ziel THG Minderung 2030	Zielerreichung nach Budgetansatz (solange langfristige Konsistenz erhalten bleibt)
Wirtschaftliche Entwicklung	Kontinuierliches Wachstum und leichter Strukturwandel (BWS ~+1 %/Jahr, „neue Branchen“)
Biomasse	Energetischen Einsatz nicht ausweiten
Energie-, Materialeffizienz und Circular Economy	Ambitionierte Steigerung (in realistischem Rahmen)
CCS und CCU	CO ₂ -Abscheidung, wo Alternativen schwierig sind: Zement- und Kalkwerke (sowie Müllheizwerke)

Entsprechend der Szenariodefinition unterscheiden sich die beiden O45-Grundszzenarien deutlich in den Kategorien Prozess-, Rohstoff- und Brennstoffwechsel. Tabelle 4 fasst die Annahmen je Branche und Technologiefeld zusammen.

Tabelle 4: Annahmen zu Prozess- und Brennstoffwechsel im Industriesektor in den O45-Szenarien

	Ggf. Sektor (Zustand 2045)	O45-Strom	O45-H ₂
Prozesswechsel	Neue Verfahren Ethylen/ Olefine	40 % Methanol-to-Olefins/Aromates (MTO/ MTA) mit Rohstoff H ₂ 40 % El. Steamcracker (Importiertes PtL)	75 % Methanol-to-Olefins/Aromates (MTO/MTA) mit Rohstoff H ₂ 25 % El. Steamcracker (Importiertes PtL)
	Kreislaufwirtschaft Ethylen/ Olefine	Chemisches Recycling bis 20 % Marktanteil Mechanisches Recycling ersetzt etwa 13 % des Olefinbedarfs	Chemisches Recycling ohne Bedeutung Mechanisches Recycling ersetzt etwa 6 % des Olefinbedarfs
	Ammoniak	Import von grünem Ammoniak (ersetzt CH ₄ -Dampfreformierung)	Inländische grüne Produktion: H ₂ für Synthesegas (ersetzt CH ₄ -Dampfreformierung)
	Stahl	100 % Primärproduktion über H ₂ -DRI ersetzt Hochofenroute (+ Erdgas im Übergang)	100 % Primärproduktion über H ₂ -DRI ersetzt Hochofenroute (+ Erdgas im Übergang)
Brennstoffwechsel Prozesswärme	Zement u. Kalk	Teil-Elektrifizierung Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCUS	H ₂ Brennstoff Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCUS
	Glas	Hybride Systeme: Elektrische Schmelzwannen und Zufeuerung H ₂	H ₂ -Beheizung (geringfügige Teilelektrifizierung)
	Öfen	Elektrifizierung dort, wo Technologiereife mindestens auf TRL 6; Andere Prozesse Wechsel auf H ₂	Umrüstung auf H ₂ -Brenner und Teilelektrifizierung wo vorteilhaft
	Dampf	Elektrische Kessel, Wärmepumpen und geringfügig H ₂ -Brenner	H ₂ -Kessel + Teilelektrifizierung
	Niedertemperatur	Wärmepumpe, Fernwärme, elektr. Kessel	Wärmepumpe, Fernwärme, H ₂ -Kessel
CCU/S	CCU/S	CCU/S: CO ₂ aus Zement- u. Kalkherstellung als Rohstoff für Methanol + Speicherung offshore	

Der Wechsel auf einen CO₂-neutralen Energieträger erfordert in vielen Fällen einen umfangreichen Neu- oder Umbau von Anlagen sowie neue Prozessketten. Im Folgenden sind die hinterlegten Technologieoptionen kurz beschrieben. Eine tiefergehende Beschreibung und Diskussion der Annahmen findet sich im Abschnitt 3.3.

Im **Szenario O45-Strom** werden direktelektrische Lösungen bevorzugt, was sich vorwiegend auf die Umstellung der Prozesswärme bezieht. Dort, wo direkte Elektrifizierung nicht möglich ist, weil z. B. eine stoffliche Nutzung der Energieträger stattfindet, wird Wasserstoff eingesetzt. Etwa als Rohstoff in der Chemieindustrie zur Herstellung von Olefinen/Aromaten, Methanol oder weiterer chemischer Produkte. Auch in der Stahlherstellung wird das Verfahren der Eisenerz-Direktreduktion mittels Wasserstoff eingesetzt, da direktelektrische Alternativen noch eine höhere technologische

Unsicherheit aufweisen. Im Übergang ermöglicht ein flexibler Betrieb mit Erdgas die Transformation und reduziert Unsicherheiten hinsichtlich der Verfügbarkeit von Wasserstoff. In der Versorgung mit Prozesswärme hat die Elektrifizierung Priorität. In Bereichen, wo elektrische Technologien erst eine geringe Reife haben, spielt Wasserstoff eine wichtige Rolle. Dies ist vorwiegend bei Prozessen der Fall, die sehr hohe Temperaturniveaus und Energiedichten verlangen. In vielen Anwendungen ermöglicht eine Zufeuerung von Wasserstoff die Teilelektrifizierung (z. B. Glaswannen). In den meisten Branchen sind elektrifizierte Ofentechniken heute noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar und verlangen weitere F&E sowie Demonstration (Fleiter et al. 2023a). Im Bereich der Dampferzeugung sind Elektrodenkessel und Hochtemperaturwärmepumpen am Markt verfügbar und stellen zentrale Lösungen zur Dampferzeugung im Szenario O45-Strom dar.

Im **Szenario O45-H₂** wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff bis zum Jahr 2045 über eine großflächige Infrastruktur an allen Industriestandorten verfügbar ist. Wasserstoff ist in diesem Szenario der bevorzugte Energieträger für energetische sowie stoffliche Nutzung. Entsprechend werden rohstoffliche Nutzung in der Grundstoffchemie, die Stahlherstellung sowie die Prozesswärme durch alle Branchen hinweg auf Wasserstoff umgestellt. In vielen Bereichen ist die technologische Reife von Ofentechnologien für den Einsatz von Wasserstoff noch auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau, was allerdings weniger auf große technische Hürden zurückzuführen ist, sondern auf die Tatsache, dass bisher kaum Wasserstoff für den großindustriellen Einsatz in Demoanlagen verfügbar war bzw. diese aus wirtschaftlichen Gründen nicht gebaut wurden (Fleiter et al. 2023a). Dennoch ist es in vielen Anwendungen noch nötig, Betriebserfahrung mit Wasserstoff zu sammeln, bevor der großindustrielle Betrieb möglich ist, da Wasserstoff andere Brenneigenschaften als Methan aufweist und dies sich z. B. auf die Produktqualität auswirken kann (Neuwirth et al. 2022b). In vielen Bereichen findet auch im Szenario T45-H₂ eine Teilelektrifizierung statt –besonders dort, wo Prozesse geringere Temperaturen und Energiedichten verlangen und Elektrifizierung mit Effizienzvorteilen einhergeht

Die **Abscheidung und Speicherung bzw. Nutzung von CO₂** wird in beiden Szenarien genutzt, um nach Bemühungen der primären Vermeidung (Materialeffizienz, neue Zementsorten) verbleibende, schwierig zu mindernde Emissionen der Zement- und Kalkherstellung zu adressieren. In beiden Szenarien wird zusätzlich CO₂ für die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie zur Herstellung von Methanol/Olefinen benötigt. Entsprechend wird in beiden Szenarien eine Nutzung von CO₂ unterstellt (CCU) in Kombination mit einer (offshore) Speicherung von überschüssigen Mengen (CCS). Relevante Unterschiede entstehen durch unterschiedliche Annahmen zum Anteil inländischer Wasserstoffnutzung (die für wichtige chemische Produkte Kohlenstoffbedarf erzeugt) und der Bedeutung von chemischem und mechanischem Kunststoffrecycling (vgl. Kapitel 3.3.3).

Die Szenarien zeigen damit bei der Energieversorgung eine starke Ausprägung des jeweiligen Schwerpunkts, berücksichtigen aber die Technologiereife und Umsetzbarkeit der unterschiedlichen Vermeidungsstrategien. Vorteilhafte Kombinationen von Versorgungslösungen wie eine hybride Befuerung mit Wasserstoff und Strom oder Erdgas im Übergang spielen in den Szenarien eine wichtige Rolle.

3.2 Neuerungen in den O45-Szenarien gegenüber den T45-Szenarien

Die Definition der O45-Szenarien baut auf den bereits veröffentlichten T45-Szenarien und den TN-Szenarien auf (Fleiter et al. 2023b, 2022). Die TN-Szenarien folgen einer sehr starken Ausprägung der jeweiligen Technologiepfade (unter Berücksichtigung technischer Hürden). Die darauf aufbauenden T45-Szenarien hingegen sind weniger stark in die jeweiligen Richtungen ausgeprägt und nähern sich gegenseitig an. Entsprechend wurde der Lösungsraum eingeengt. Dennoch unterscheiden sich die Szenarien deutlich, besonders bei der Bereitstellung von Prozesswärme, was dadurch bedingt ist, dass der Technologiepfad im Industriesektor bisher noch sehr offen ist und die großflächige Diffusion von Technologien gerade erst beginnt. Die in diesem Bericht beschriebenen O45 Szenarien folgen einer ähnlichen Philosophie, wie die T45 Szenarien, mit den folgenden Überarbeitungen und Aktualisierungen.

Die **Datengrundlage** wurde auf neueste Statistiken gestellt und aktuelle Trends wurden aufgenommen, z. B. der wirtschaftlichen Entwicklung. Das Basisjahr der Modellierung ist nun 2021 (anstatt 2019 in den T45-Szenarien). D.h. die Szenarien zum Energiebedarf kalibrieren auf die Energiebilanz im Jahr 2021. Diese weicht deutlich von der Bilanz im Jahr 2019 ab, was sich als erhöhte Endenergienachfrage (60 TWh, insbesondere Erdgas, 40 TWh) im Startjahr und in den Szenarien durch langfristig höhere Endenergienachfrage auswirkt. Darüber hinaus wurden aktuelle Daten zu Produktionsmengen und wirtschaftlicher Entwicklung (Bruttowertschöpfung der Branchen) aufgenommen. Diese sind je nach Verfügbarkeit auch aktueller als das Jahr 2021. Darüber hinaus wurden teilweise Annahmen zur techno-ökonomischen Beschreibung der Technologien aktualisiert, wenn neuere Erkenntnisse verfügbar waren.

Darüber hinaus wurden die Annahmen zur **Transformation der Grundstoffchemie** grundlegend überarbeitet, um neue Erkenntnisse aufzunehmen, aber auch um die bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der Positionierung von globalen Wertschöpfungsketten und der Technologiewahl abzubilden. Dies betrifft die Annahmen zum stofflichen und chemischen Recycling und dem Import einzelner energieintensiver Vorprodukte wie grünes Ammoniak und grüne Rohstoffe für Ethylen. Bei beiden Themen unterscheiden sich die Szenarien O45-Strom und O45-H₂, um die noch sehr hohen Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung abzubilden (siehe Abschnitte 3.3.3 und 3.4.3). Die Variation zwischen den Szenarien ist entsprechend so ausgelegt, dass sie zu einer höheren Wasserstoffnachfrage im Szenario O45-H₂ im Vergleich zum Szenario O45-Strom führt.

Zusätzlich wurde der Energiebedarf durch zukünftig wachsende **Energietechnologie-Branchen** aufgenommen. Dazu zählen die Herstellung von PV-Modulen, Windkraftanlagen, Dämmmaterial und KfZ-Batterien (Siehe Abschnitt 3.4.2). Um den Energiebedarf für die Fertigung sogenannter Energiewendetechnologien abzubilden, wurden die Prozesse zur Produktion von PV-Modulen, Dämmstoffen und Windkraftanlagen (WKA) in der Modellierung neu eingeführt. Außerdem wurde der Prozess zur Herstellung von KfZ-Batterien um den Schritt der Kathodenproduktion ergänzt. Die Produktion von Elektrolyseuren und Wärmepumpen wurde ebenfalls geprüft, wird aufgrund des relativ geringen Energiebedarfs jedoch nicht explizit abgebildet.

3.3 Szenariodefinition aus Branchen-Perspektive

3.3.1 Herstellung von Eisen und Stahl

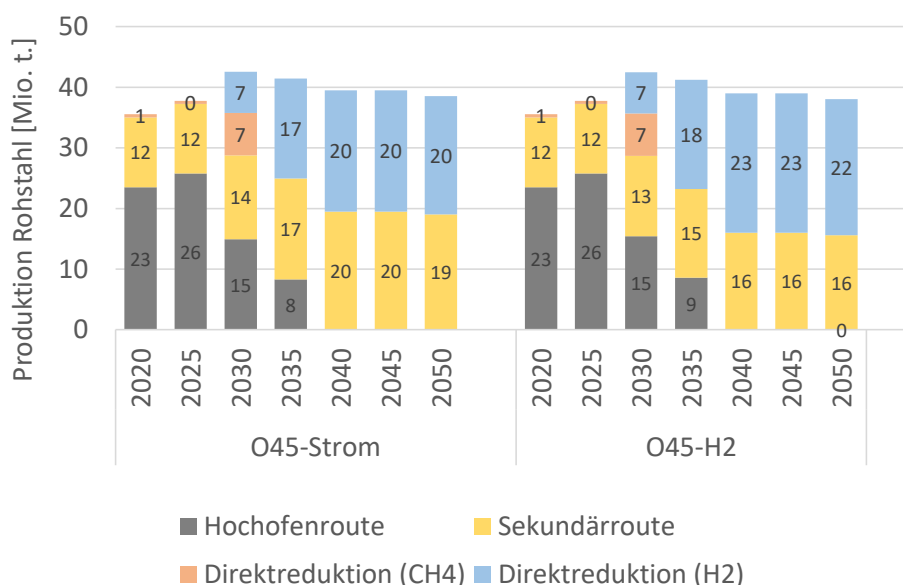
Die Herstellung von Eisen und Stahl gehört zu den energie- und CO₂-intensivsten Branchen in Deutschland. Unter dem Aggregat „Rohstahl“ können die verschiedenen Stahlqualitäten und Legierungen zusammengefasst werden, die sich in der Weiterverarbeitung zwar noch in unterschiedliche Produkte aufspalten, der Großteil des Energiebedarfs und der THG-Emissionen

entsteht jedoch bis zur Produktstufe Rohstahl. Daher fokussiert sich die Untersuchung auf die Herstellungsrouten des Rohstahls: die Primärrouten (Herstellung aus Eisenerz unter Stahlschrottzugabe) *Hochofen-Konverter* und *Erdgas-Direktreduktion-Lichtbogenofen* sowie die *Sekundärroute* (Einschmelzen von Stahlschrott) im Lichtbogenofen.

Der Subsektor Eisen und Stahl weist die höchste Energieintensität aller Branchen auf. Dies ist auf die energieintensive Erzeugung von Roheisen aus Eisenerz zurückzuführen, mit spezifischen Energiebedarfen um $18 \text{ GJ/t}_{\text{Roheisen}}$ ⁴. Die Stahlindustrie ist 2015 fossil geprägt. Mit etwa 70 % der Rohstahlproduktion (Worldsteel Association 2019) dominiert die Hochofenroute den Sektor, ergänzt durch geringe Mengen (~1 %) aus Erdgas-Direktreduktion. Diese Routen verwenden Kohle und Koks bzw. Erdgas als Energieträger und Reduktionsmittel. Auf die Sekundärroute entfallen etwa 30 % der Rohstahlproduktion. Hier ist Strom der wichtigste Energieträger.

Aufgrund der Abhängigkeit des konventionellen Hochofenverfahrens zur Reduktion von Eisenerz von Koks und Kohle, können inkrementelle Verbesserungen der Material- und Energieeffizienz langfristig keine hinreichende Dekarbonisierung erreichen. Folglich liegt der Fokus beider Transformationspfade der O45-Grundszenarien auf dessen Substitution. Dazu werden zwei komplementäre Strategien verfolgt (Abbildung 3): Der Anteil der Sekundärroute wird – im Rahmen der angenommenen Potentiale, die sich aus Schrottverfügbarkeit und -qualität zusammensetzen – maximiert. Demnach steigt der Anteil der Sekundärroute von etwa 34 % im Jahr 2020 auf 49 % (O45-Strom) bzw. 41 % (O45-H₂) bis zum Jahr 2045. Entsprechend wird die besonders energieintensive Roheisenerzeugung reduziert. Die weiterhin benötigte Primärerzeugung wird graduell durch Direktreduktion (mit Wasserstoff oder Erdgas) ersetzt. Bis 2030 werden 14 Mt/a (O45-Strom)⁵ bzw. 13 Mt/a (O45-H₂) Rohstahl über diese Route produziert und bis 2040 ist die Primärerzeugung im Hochofen vollständig ersetzt.

Abbildung 3: Entwicklung der Rohstahlproduktion nach Verfahren in den O45-Szenarien



⁴ Entspricht 5 MWh/t. Höhere Energieintensitäten – aber mit deutlich geringeren Produktionsmengen – sind nur in der Chemie (z. B. Industrieruß, TDI) und den Nicht-Eisen-Metallen (Aluminium) zu finden.

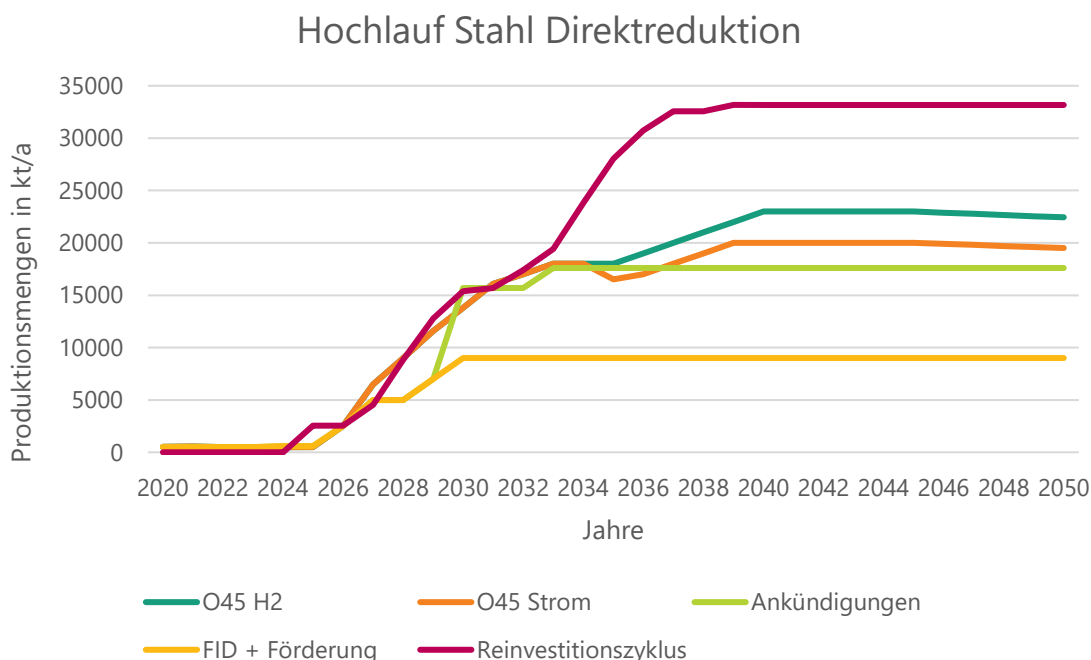
⁵ Verglichen mit den T45-Hauptszenarien steigt damit das Ambitionsniveau der Stahltransformation deutlich. Diese Szenarioannahme scheint aufgrund der gewährten Förderung und damit einhergehender Projektumsetzungen zumindest möglich – und entlastet andere Handlungsfelder von starken Technologiediffusionspfaden. In O45-Strom werden Potentiale der Sekundärroute stärker gehoben als in O45-H₂, da Wasserstoff weniger breit verfügbar ist.

Eine Neuzustellung bestehender Hochöfen ist eine relativ große Investition, die bei Umstellung auf die Direktreduktion vermieden werden kann. Entsprechend sind Modernisierungszeiträume Möglichkeitsfenster für die Umstellung. Bei einem Modernisierungszyklus von 20 Jahren ergibt sich bei der derzeitigen Altersstruktur der Hochöfen in Deutschland der in Abbildung 4 gezeigte Pfad für den Zubau von Direktreduktionskapazitäten. Hier wird unterstellt, dass ein Hochofen zum Zeitpunkt der nötigen Modernisierung durch eine Direktreduktionsanlage gleicher Kapazität ersetzt wird. Der theoretische resultierende Markthochlauf liegt nah an den hinterlegten Szenarioannahmen, besonders, wenn berücksichtigt wird, dass eine Modernisierung auch einige Jahre aufgeschoben werden kann bzw. ein Parallelbetrieb in einer Übergangsphase möglich ist.

Auch der Vergleich mit Investitionsankündigungen der Hersteller zeigt, dass der in den Szenarien angenommene Markthochlauf umsetzbar ist. Insgesamt wurden Projekte mit etwa 7-9 Mt DRI Produktionskapazität bis zum Jahr 2030 mit Investitionsentscheidungen oder Förderbescheiden versehen. Ankündigungen von möglichen weiteren 6-8 Mt zu insgesamt 16 Mt bis 2030 bestehen. Die bereits mit Investitionsentscheidungen oder Förderbescheid versehenen Projekte weisen somit eine ähnliche Größenordnung wie die Szenarioannahme von 12 Mt im Jahr 2030 auf. Berücksichtigte Ankündigungen:

- Duisburg: ThyssenKrupp: FID: 2,5 Mt (2027); Ankündigung: +1,2 Mt (2030)
- Bremen: ArcelorMittal: Ankündigung: 3,8 Mt (2030); Investitionsentscheidung 2025
- Salzgitter: Salzgitter: FID: 1,9 Mt (2026); Ankündigung: 1,9 Mt (2030) + 1,9 Mt (2033)
- Hamburg: ArcelorMittal: FID: 0,1 Mt (2025); Ankündigung: +0,8 Mt (2030)
- Dillingen: Saarstahl: FID: 2 Mt (2029)

Abbildung 4: Hochlauf Produktionsmengen der Direktreduktion zur Stahlproduktion



Auch die Erweiterung der Sekundärroute bedarf trotz leicht rückläufiger Produktionsmengen nicht nur großer Anstrengungen und Fortschritte bei der Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von Stahlschrott, sondern ebenso einer Umlenkung von Materialflüssen. Derzeit werden schätzungsweise 85 % des entstehenden Altschrotts gesammelt, sortiert, aufbereitet und stehen für die weitere Verwendung zur Verfügung. Neben dissipativen Verlusten ist insbesondere das

Vorkommen von Begleitelementen in Schrotten bspw. aufgrund von Legierungen für die Sammlung, Sortierung und Aufbereitung hinderlich. Während Verluste aufgrund der unklaren Senken nur geringfügig beeinflusst werden können, können Verunreinigungen durch das Mischen mit Eisenschwamm verbessert werden⁶. Folglich kann Sekundärstahl auch im industriellen Maßstab im Hochleistungsstahlsegment z. B. Luftfahrt und Automobil) eingesetzt werden. Derartige Anlagen sind zum aktuellen Zeitpunkt in Entwicklung (z. B. Voestalpine) und sollen zukünftig flexible Kombinationen der Rohmaterialzuführung (Roheisen, Schrott, Eisenschwamm) ermöglichen. Jedoch reicht eine Verbesserung der Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von Schrotten nicht aus, um bis 2045 einen Sekundärrouutenanteil von 41 - 49 % (16 - 18 Mt) zu erreichen. Auch der Schrottexport müsste reduziert werden⁷. Derzeit werden rund 18 % des inländischen Altschrottaufkommens exportiert (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2021).

Tabelle 5: Vermeidungshebel Metallerzeugung in den O45-Szenarien

	O45-Strom	O45-H₂
Materialeffizienz	Reduktion Nachfrage nach Rohstahl und Walzstahl: 10 % ggü. Ref	
Kreislauf	Anteil Sekundärstahl steigt von 30 % (2015) auf 49 % in 2045	Anteil Sekundärstahl steigt von 30 % (2015) auf 41 % in 2045
Prozesswechsel	H ₂ -DRI (Übergang CH ₄ -DRI) 2030: 14 Mt DRI	H ₂ -DRI (Übergang CH ₄ -DRI) 2030: 13 Mt DRI

Mit der Knappheit von Stahlschrott gehen Zielkonflikte einher und es sind Auswirkungen auf andere Branchen zu erwarten, da dieser sowohl in der Stahlherstellung als auch in Gießereien eingesetzt wird. Dem gegenüber steht eine Reduktion der Schrottexporte. Derzeit werden im Wesentlichen minderwertige Schrotte exportiert, da die nationale Nachfrage hierfür nicht ausreicht. So werden in Deutschland viele Flachprodukte aus Stahl hergestellt, an die i.d.R. höhere Qualitätsanforderungen gestellt werden. Mit der ohnehin notwendigen verbesserten Sortierung und Aufbereitung der Schrotte kann daher auch eine Verringerung der Exporte einhergehen. Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass eine Reduktion der Exporte zwar einen inländisch höheren Sekundärrouutenanteil ermöglicht, der globale (bzw. europäische) Anteil jedoch nicht notwendigerweise steigt – die Gesamtschrottmenge ist begrenzt und wird genutzt. Für Deutschland und Europa kann die verstärkte Nutzung von im heimischen Markt verfügbaren Stahlschrott aber eine verglichen mit einer wasserstoffbasierten Primärroute günstigere Rohstoffbasis darstellen.

⁶ Die klassische Unterteilung in sekundäre und primäre Produktion (die auch heute aufgrund von Querströmen von Schrott nicht ganz exakt ist), wird daher weiter verschwimmen. Präziser wird die ebenfalls gängige Unterteilung in Verfahren anhand der verwendeten Anlagen sein.

⁷ Bereits heute besteht Konkurrenz von Gießereien und Stahlproduzenten um Stahlschrott. Vorrangig ist aus Stoffstromsicht die Abstufung nach Qualität zu beachten – dies ist aber bereits ein maßgebliches Kriterium. Global gesehen ist eine erhöhte Schrottnutzung kaum möglich, da die entsprechenden Märkte (z.B. Preissignale aus der auf die Sekundärroute fokussierte Türkei) funktionieren und keine relevanten Restmengen ungenutzt bleiben. Für Europa und Deutschland kann eine stärkere heimische Schrottnutzung vor dem Hintergrund von Wettbewerbsnachteilen CO₂-armer Primärrouten besonders wertvoll sein.

3.3.2 Verarbeitung Steine u. Erden (Zement und Kalk)

In der Energiebilanz wird unter dem Sektor „Verarbeitung von Steinen und Erden“ die Herstellung von Zement, Kalk, Ziegeln und weiteren Produkten zusammengefasst. In diesem Kapitel wird exemplarisch auf die wichtigsten Produkte Zement und Kalk eingegangen. Unter den Aggregaten „Zement“ und „Kalk“ können die verschiedenen Mischungen (z. B. CEM-Typen) und auf die Verwendung abgestimmte Produkte zusammengefasst werden. Ein Großteil des Energiebedarfs und der THG-Emissionen entfällt auf die Kalzinierung von Kalkstein (weit überwiegend) im Schachtofen zu Branntkalk und die Kalzinierung und anschließende Sinterung von Kalkstein und anderen Rohstoffen (weit überwiegend) im Drehrohrofen zu Zementklinker⁸.

Die Energieversorgung der Zement- und Kalkindustrie ist derzeit fossil geprägt. Der Energiebedarf basiert auf einer Prozesswärmeerzeugung durch Braun- und Steinkohle und nicht-erneuerbaren Ersatzbrennstoffen mit einem geringen biogenen Anteil. Zu den energiebedingten CO₂-Emissionen aus dem Verbrennen fossiler Energieträger kommen prozessbedingte Emissionen, die durch die notwendige Entsäuerung des Kalksteins entstehen. Insgesamt erzeugt die Herstellung einer Tonne Zements etwa 0,6 t CO₂, von denen etwa zwei Drittel prozessbedingt sind. Ähnliches gilt für die Kalkherstellung (mit einem höheren Anteil prozessbedingter Emissionen). Die Industrie steht damit vor klar umrissenen Herausforderungen: Dekarbonisierung der Prozesswärmebereitstellung und Vermeidung prozessbedingter Emissionen.

Für die Dekarbonisierung der Prozesswärme steht eine Vielzahl von Optionen zur Verfügung. Der Prozessschritt der Entsäuerung des Kalksteins ist einer direkten Elektrifizierung absehbar zugänglich. Für die Sinterung auf deutlich höherem Temperaturniveau ist ein breit gefächertes Brennstoffmix möglich, von Wasserstoff über Biomasse zu Ersatzbrennstoffen (Siedlungs- und Gewerbeabfall). Elektrifizierung und die Wasserstoffnutzung erfordern größere Eingriffe in bestehende Strukturen, während Biomasse und Ersatzbrennstoffe sehr strukturkonservative Pfade repräsentieren.

Um diese Aktivitäten dennoch mit einer nahezu treibhausgasneutralen Industrie 2045 kompatibel zu gestalten, ist eine Kombination verschiedener Strategien notwendig. Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette, Energieträgerwechsel, neue Verfahren und Produkte, und CO₂-Abscheidung. Tabelle 6 fasst diesbezügliche Annahmen zusammen.

Die Zementproduktion sinkt per Annahme bis 2045 durch Materialeffizienz und Substitution durch Holz in der Bauwirtschaft um knapp 20 % gegenüber dem Jahr 2018. Die verstärkte Nutzung von Zementsorten mit geringem Klinkeranteil führt dazu, dass der Rückgang bei der Klinkerproduktion mit 33 % höher als bei der Zementproduktion ausfällt. Die Reduktion des Klinkeranteils wird hierbei durch die Verfügbarkeit von Substituten⁹ limitiert. Da das Brennen von Klinker der mit Abstand emissionsintensivste Prozessschritt ist, wird hierdurch bereits eine substantielle CO₂-Minderung erreicht. Allerdings ist der Sektor so noch weit von der CO₂-Neutralität entfernt.

Bedingt durch die Verringerung der Nutzung fossilen Energien im Allgemeinen und dem Ausstieg aus der Kohleverstromung sowie geringerem Bedarf in der Stahlerzeugung sinkt die Produktion

⁸ Das verwendete Modell berücksichtigt das Mahlen der Produkte als Stromnachfrager. In Relation zur eingesetzten Brennstoffenergie ist die resultierende Stromnachfrage beim Mahlen aber gering, weshalb hier nicht im Detail darauf eingegangen wird.

⁹ Bisher werden als Ersatz für Klinker bei der Zementherstellung Nebenprodukte eingesetzt, wie bspw. Flugasche (aus Kohlekraftwerken) und Schlacke (aus Hochöfen). Dadurch konnte in der Vergangenheit eine Reduktion des Klinkeranteils erreicht werden. Zukünftig ist die Verfügbarkeit dieser Nebenprodukte jedoch aufgrund der Dekarbonisierung limitiert. Dementsprechend müssen alternative Substitute eingesetzt werden, welche noch nicht im gleichen Maße erprobt sind.

von Kalk (zur Rauchgasreinigung) bis 2045 um etwa 40 % ggü. 2018¹⁰. Über die Nutzung in der Stahlindustrie bestehen Unsicherheiten, da sie von den eingesetzten Rohstoffen abhängt.

Neue Bindemittel ersetzen bis 2045 etwa 10 % der Klinkerproduktion. Darüber hinaus wird der Anteil von Klinker im Zement – trotz Wegfall der zuvor eingesetzten und nun nicht mehr zur Verfügung stehenden Hochofenschlacke und anderer Hauptbestandteile – durch den Wechsel auf *andere Zementsorten* (z. B. Kalksteinzement, Puzzolanzemente) und den erweiterten Einsatz neuer/anderer Bestandteile (Klärschlammasche, Rückstände aus Müllverbrennungsanlagen) leicht reduziert. Grundsätzlich sind aber sowohl das Potential als auch die Geschwindigkeit der Materialsubstitution durch Qualitätsansprüche an das Produkt und die Verfügbarkeit von Rohstoffen begrenzt. In den O45 Szenarien genügen diese Maßnahmen allein nicht zu einer weitgehenden Dekarbonisierung des Subsektors.

Die Gesamtheit dieser Maßnahmen (Brennstoffwechsel, Materialeffizienz und Substitution von Klinker) vermeiden die Entstehung von Treibhausgasen direkt – sie werden im Folgenden zusammenfassend als Primärmaßnahmen bezeichnet. Als Sekundärmaßnahme – die eine Klimawirksamkeit der entstandenen Treibhausgase vermeidet – wird darüber hinaus die Abscheidung und Speicherung oder Nutzung von CO₂ angenommen.

Tabelle 6: Vermeidungshebel Subsektor Steine- und Erden

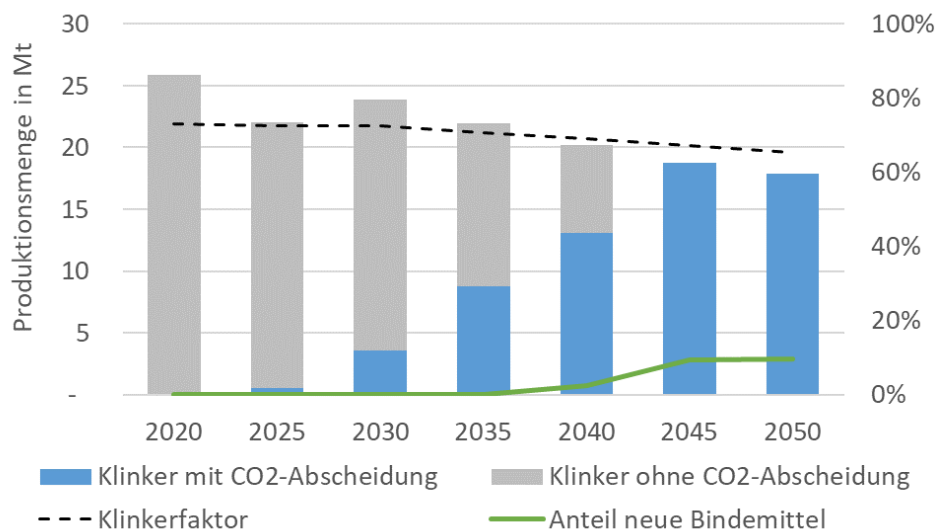
	O45-Strom	O45-H ₂
Materialeffizienz	Produktion Zement: -20 % ggü. 2018 (bis 2045) Produktion konventioneller Klinker: -33 % ggü. 2018 (bis 2045) Produktion Kalk: -40 % ggü. 2018 (bis 2045)	
Kreislauf	-	
Materialeinsatz / neue Produkte	Geringe Anteile neue Bindemittel (~10 %) Reduktion des Klinkerfaktors von 73 % in 2015 auf 65 % in 2045	
Brennstoffwechsel	Teilelektrifizierung, Ersatzbrennstoffe, Biomasse	Wasserstoff, Ersatzbrennstoffe
CCU/S	Bis 2045 CO ₂ -Abscheidung an allen Zementwerken und den meisten Kalkwerken	

Denn obgleich diese Annahmen die energiebedingten Emissionen hinreichend adressieren, verbleibt ein großer Block prozessbedingter Treibhausgasemissionen. Kernthema hierbei ist der Einsatz von Kalkstein als Rohstoff. Daher wird als wichtiges Element die Abscheidung von CO₂ (CCU/S) in allen Szenarien benötigt. In den Szenarien O45-Strom und O45-H₂ wird das abgeschiedene CO₂ zum Teil in der Chemieindustrie für die Herstellung von Olefinen verwendet und die verbleibende Menge langfristig gespeichert. In allen Szenarien werden etwa 90 % (technische Machbarkeitsgrenze) der nach den Primärmaßnahmen verbleibenden Emissionen abgeschieden. Die Untersuchung der sehr ambitionierten Primärvermeidung zeigt robust, dass eine tiefe Minderung in dem Sektor ohne CO₂-Abscheidung und mit den bekannten/berücksichtigten

¹⁰ Die Verwendung von Kalk im Umweltschutz (u.a. Rauchgasreinigung) und in der Stahlindustrie macht etwa 55% des Absatzes aus.

Maßnahmen¹¹ nicht möglich ist. Lediglich die abzuscheidende Menge und die mögliche Verwendung variieren.

Abbildung 5: Entwicklung der Zementklinkerproduktion in den O45 Szenarien



3.3.3 Grundstoffchemie

Während die Chemieindustrie insgesamt durch eine hohe Heterogenität und eine Vielzahl an Produkten gekennzeichnet ist, entsteht der größte Teil des Energiebedarfes und der direkten Emissionen der Grundstoffchemie in wenigen energieintensiven Massenprodukten. Die wichtigsten sind Ammoniak, Methanol und High Value Chemicals (HVCs) (Ethylen)¹². Die Herstellung dieser Produkte ist sowohl mit energie- als auch prozessbedingten Emissionen verbunden und benötigt Energieträger nicht nur zur Bereitstellung von Prozesswärme, sondern auch als stoffliche Bausteine der Endprodukte.

Ammoniak wird heute mithilfe der Haber-Bosch-Synthese aus mittels Erdgas-Dampfreformierung gewonnenem Wasserstoff und Stickstoff synthetisiert. Auch Methanol wird heute aus Wasserstoff und Kohlenstoff synthetisiert, die durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen werden. In Zukunft könnte Methanol aus grünem Wasserstoff und zuvor abgetrenntem CO₂ synthetisiert werden.

Für die Herstellung von HVCs zur Kunststoffproduktion werden mehrere mögliche Routen berücksichtigt. Heute werden HVCs in Raffinerien, oder in eng an Raffinerien angebunden Chemiestandorten bei der Produktion von Treibstoffen wie Benzin und Diesel als Nebenprodukt aus Rohöl hergestellt. Das Hauptverfahren ist dabei das Cracking im Steamcracker, bei welchem Naphtha unter hohen Temperaturen zu HVCs wie Ethylen verarbeitet wird.

¹¹ Deutlich stärkere Ambitionen bezüglich Kreislaufwirtschaft, klinkerreduzierter Zemente und Suffizienz könnten in der Lage sein, jedenfalls große Teile des hier festgestellten CCU/S-Bedarfs zu ersetzen. Deren Umsetzung ist aber mit besonders hohen Unsicherheiten verbunden und scheint deutlich weniger wahrscheinlich als der Einsatz von CO₂-Abscheidung.

¹² HVCs ist ein Sammelbegriff für petrochemische Kohlenwasserstoff-Erzeugnisse unterschiedlicher Kettenlänge. Dazu gehören die Olefine Ethylen (2 Kohlenstoffatome), Propylen (3 Kohlenstoffatome) sowie Butadien (4 Kohlenstoffatome). Weitere Kettenlängen kommen vor, spielen aber in der Weiterverarbeitung eine weitaus geringere Rolle. Ethylen und Propylen sind die Basis der meisten Kunststoffe und damit von übergeordneter Bedeutung. Co-Produkt der Olefine sind Aromaten (Benzen, Toluol, Xylole) welche ebenfalls für die Produktion von Kunststoffen, aber auch z. B. als Lösemittel eingesetzt werden. Die Modellierung nutzt Ethylen als Vergleichsgröße (Proxy) zur Abbildung des Energiebedarfs und der Emissionen.

Der Einsatz elektrischer Steamcracker anstelle konventioneller Cracker ermöglicht die Vermeidung energiebedingter Emissionen im Prozess, während die Integration in bestehende Wertschöpfungsketten erhalten bleibt. Der stoffliche Bedarf wird in Deutschland heute zum größten Teil aus Erdöl gedeckt.

Für die Entwicklung des nicht-energetischen (=stofflichen) Bedarfs ist die zukünftige Entwicklung der Produktionsmengen in der Chemieindustrie der wichtigste Treiber. Für den Ersatz des stofflichen Bedarfs durch klimafreundliche Alternativen zu fossilen Feedstock, wie vor allem fossiles Naphtha, aber auch Erdgas, kommt der Einsatz von grünem Naphtha oder von Methanol in Betracht. Während beim Einsatz von grünem Naphtha die bestehenden (auf fossilem Naphtha beruhenden) Prozesse weitestgehend erhalten bleiben, sind die Prozesse zur Herstellung von Olefinen und Aromaten aus Methanol in Europa bisher nicht weit verbreitet.

Der Prozess zur Herstellung von Olefinen aus Methanol wird Methanol-to-Olefins, bzw. MtO-Verfahren und der für Aromaten Methanol-to-Aromatics, bzw. MTA-Verfahren genannt. Der Vorteil der Methanol basierten Route ist ein potenziell geringerer Energiebedarf und eine hohe Selektivität. Es eignet sich jedoch nicht um heute aus Erdöl hergestellte Schmierstoffe und Bitumen zu produzieren.

Bisher besteht kein Konsens darüber, welche dieser Routen zu bevorzugen ist (Ylva Kloo, Alexander Scholz, Svenja Theisen 2023). Um der wachsenden Bedeutung des Kunststoffrecyclings gerecht zu werden, werden das mechanische Recycling und das chemische Recycling, in Form der Gasifizierung, explizit durch Prozesse abgebildet. Beim Mechanischen Recycling wird Kunststoffabfall gereinigt, getrennt, zerkleinert und wieder zu neuen Kunststoffen verarbeitet. Da die saubere Trennung und Aufreinigung von Kunststoffen oft nicht möglich ist, ist dieses Verfahren nicht für alle Kunststoffabfälle anwendbar. Bei der Gasifizierung wird Kunststoffabfall bei hohen Temperaturen zersetzt. Dabei entstehende Gase können zur Herstellung von Methanol verwendet werden. Dieses Verfahren ist auch für verunreinigte Kunststoffe nutzbar, hat jedoch einen sehr hohen Energiebedarf. Da das Potenzial der Verfahren stark von der Verfügbarkeit von geeignetem Abfall abhängt, wurde dieses gesondert untersucht. Annahmen und Prozesse sind in den folgenden Kapiteln dargestellt. Abbildung 6 ordnet die in der Modellierung berücksichtigten Prozesse in die Wertschöpfungskette der Kunststoffe ein.

Abbildung 6 Wertschöpfungskette Kunststoffe und relevante Kohlenstoffflüsse; in Blau in der Modellierung berücksichtigte Prozesse

FT – Fischer-Tropsch Synthese; MTO/MTA – Methanol to Olefins/Aromatics Prozess; HVCs – High Value Chemicals wie Ethylen und Aromaten; Mech. Recycling – Mechanisches Recycling; Chem. Recycling – Chemisches Recycling;

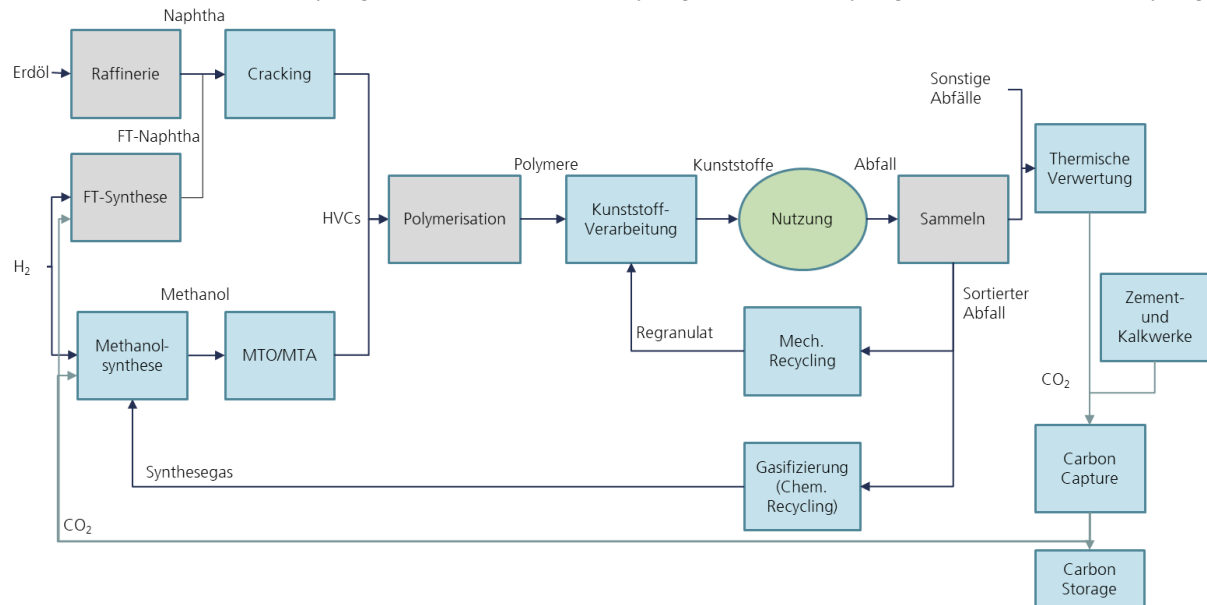


Abbildung 7 zeigt den angenommenen zeitlichen Verlauf der Ethylenproduktion und die Anteile der jeweiligen Technologie stellvertretend für alle HVCs der zwei O45-Szenarien. Unterschiede ergeben sich in den Szenarien in den Anteilen der alternativen Herstellungsverfahren über elektrische Dampfspaltöfen (Steamcracker) und die MtO/MtA-Route, deren Markthochlauf ab 2030 beginnt.

Im O45-Strom wird ein ambitionierter Einsatz vom mechanischen und chemischen Recycling angenommen. So werden 2050 13 % des Ethylenbedarfs durch mechanisches Recycling substituiert und weitere 18 % durch chemisches Recycling gedeckt. Der verbleibende Ethylen- bzw. HVC-Bedarf wird durch importiertes grünes Naphtha im elektrischen Cracker (31 %) und aus Wasserstoff mittels Methanolsynthese und MtO/MtA-Verfahren (39 %) hergestellt.

Im O45-H₂ erfolgt eine geringere Nutzung des mechanischen Recyclings und keine Nutzung des chemischen Recyclings. Durch mechanisches Recycling werden 2050 6 % des Ethylenbedarfs substituiert. Der Großteil (74 %) des Ethylen- bzw. HVC-Bedarfs wird aus Wasserstoff mittels Methanolsynthese und MtO/MtA-Verfahren hergestellt. Die restlichen 19 % werden durch importiertes grünes Naphtha im elektrischen Cracker hergestellt.

Aufgrund hoher Kosten für die Umstellung, erfolgt der Hochlauf von der Nutzung von grünem Naphtha mit elektrischem Steamcracker und dem MtO/MtA-Verfahren zunächst im geringen Maße ab 2035. Der Hochlauf erfolgt in beiden Szenarien zunächst in der Nutzung von grünem Naphtha mit elektrischem Steamcracker, da diese eine geringere Umstellung des Systems erfordert.

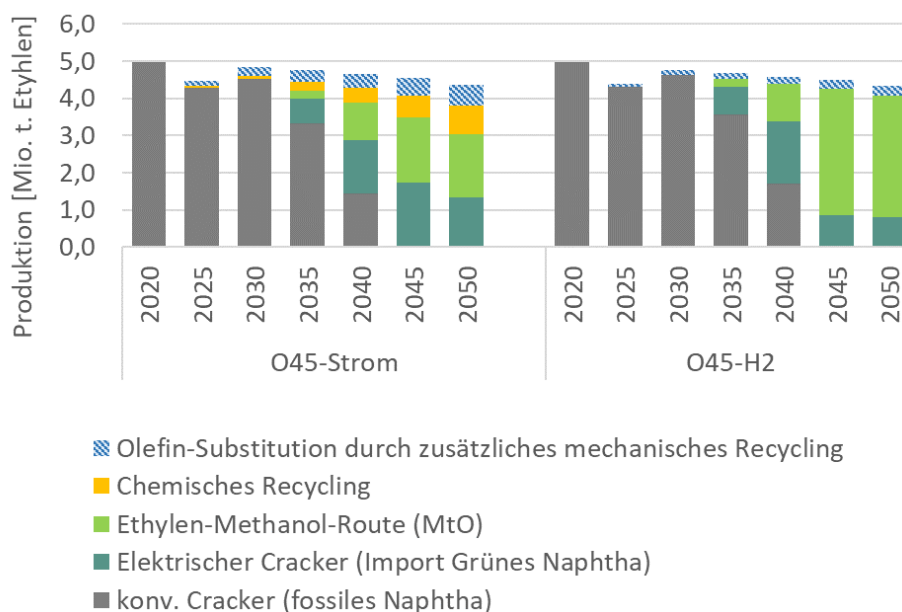
Abbildung 7: Annahmen zur Produktion von Ethylen nach Verfahren in den O45 Szenarien

Tabelle 7 fasst die Annahmen zu wichtigen Vermeidungshebeln in der Grundstoffchemie zusammen. Flankierend zur oben beschriebenen Umstellung zentraler Produktionsrouten erleichtern Bemühungen zur Energie- und Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft die Umstellung, da sie die zu ersetzende Produktionskapazität und den Bedarf an hochwertigen CO₂-neutralen Sekundärenergieträgern (Strom, Wasserstoff, PtL) reduzieren. Annahmen zur Reduktion des Kunststoffverbrauchs sind in Kapitel 3.3.3.1 zusammengefasst. Bei Ammoniak wird aufgrund der Bemühungen, die Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft durch eine gezieltere Düngung zu reduzieren, von einem Rückgang des Bedarfs um 12 % ausgegangen. In der Dampferzeugung liegt der Schwerpunkt der Energieversorgung auf den entsprechenden Prioritäten der zwei O45-Grundszenarien.

Tabelle 7: Vermeidungshebel Grundstoffchemie in den O45 Szenarien

	Ggfs. Sektor	O45-Strom	O45-H ₂
Materialeffizienz		Reduktion und Ersatz Kunststoffverbrauch: 8 % (Ethylen), Reduktion Düngerbedarf: 12 % (Ammoniak)	
Kreislauf	High Value Chemicals	Mechanisches Recycling (+13 %) Chemisches Recycling (20 %)	Mechanisches Recycling (+6 %) Chemisches Recycling (0 %)
Prozesswechsel	High Value Chemicals (Olefine + Aromaten)	H ₂ ->MtO/MtA (45 %) El. Steamcracker + PtL (35 %)	H ₂ ->MtO/MtA (80 %) El. Steamcracker + PtL (20 %)
	Ammoniak	Import grüner Ammoniak	EE-H ₂ Hochlauf (2035: 6 %, 2040: 18 %, 2045: 100 %)
Brennstoffwechsel	Dampf	Direktelektrifizierung	Wasserstoffeinsatz

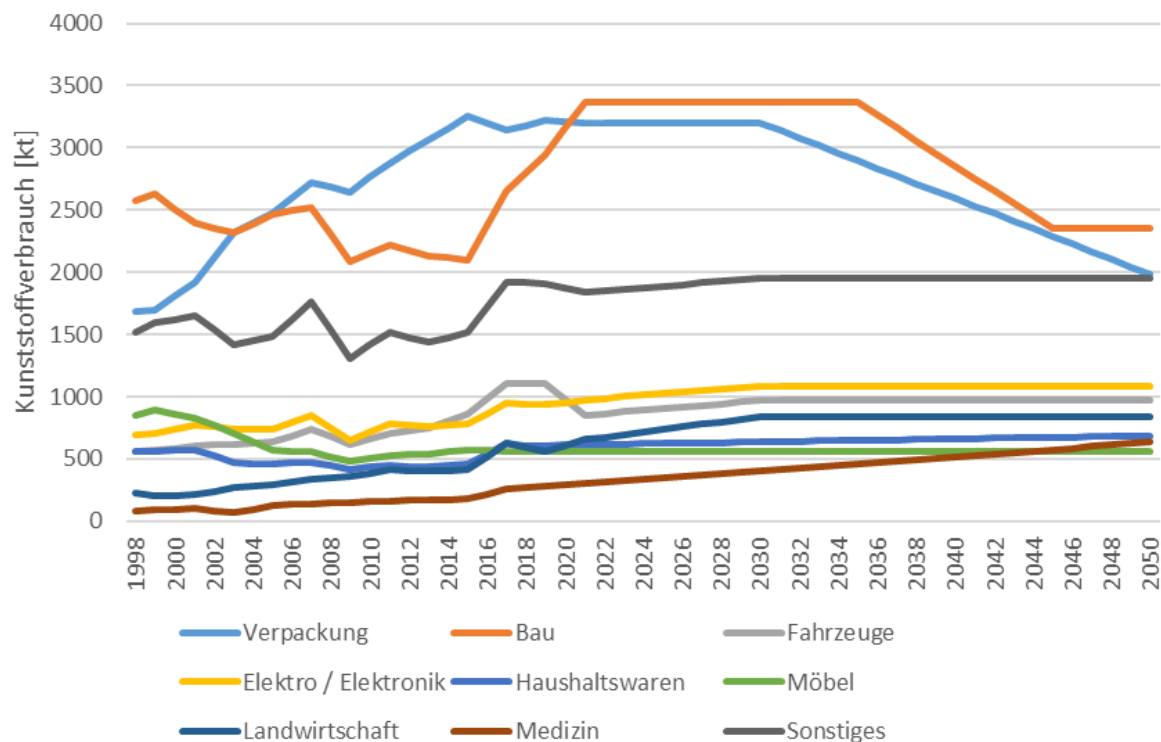
3.3.3.1 Entwicklung des Potenzials für Kunststoffrecycling

Das Potenzial für das mechanische und das chemische Recycling von Kunststoffen, hängt stark von der Verfügbarkeit von Kunststoffabfall und damit mit dessen Verbrauch zusammen.

Anhand historischer Verbrauchs- und Abfalldaten wurden branchenspezifisch durchschnittliche Lebenszeiten für Kunststoffprodukte und Sammelquoten abgeschätzt und die Entwicklung des zukünftigen Potenzials für das Recycling abgeleitet. Der zukünftige Kunststoffverbrauch ergibt sich aus branchenspezifischen Annahmen, welche zum Teil ambitionierte Verbrauchsreduktionen voraussetzen. In der Verpackungsbranche wird erwartet, dass der Verbrauch bis zum Jahr 2030 stabil bleibt und dann bis 2050 um 38 % zurückgeht. Dies beruht auf Circular Economy Maßnahmen wie die verstärkte Nutzung von Mehrwegverpackungen. Im Bauwesen wird angenommen, dass der Verbrauch bis 2035 auf konstant hohem Niveau bleibt und anschließend bis 2045 um 30 % abnimmt. Diese Annahme basiert auf einem erwarteten Rückgang der Bauaktivität nach 2035 um 45 %, der auf stagnierende oder rückläufige Bevölkerungszahlen zurückzuführen ist. Für die Bereiche Elektro, Fahrzeuge und Landwirtschaft wird eine kontinuierliche Steigerung des Kunststoffverbrauchs bis 2030 erwartet, danach wird ein stabiler Verbrauch angenommen. Im Möbelsektor wird davon ausgegangen, dass der Verbrauch auf einem konstanten Niveau bleibt. Bei Haushaltswaren wird eine leichte Steigerung des Verbrauchs bis 2050 angenommen. Bis 2030 entspricht dies insgesamt einem Verbrauchsanstieg von ca. 5 % gegenüber 2021 und bis 2050 einem Rückgang von 11 % gegenüber 2021.

Abbildung 8 Kunststoffverbrauch in Deutschland über die Jahre nach Branche.

Historische Entwicklung bis 2021, basierend auf (Lindner et al. 2022) und angenommene Entwicklung bis 2050



Während der Höhepunkt des Kunststoffverbrauchs in Deutschland in diesem Szenario also im Jahr 2030 erreicht wird, fallen große Teile des Abfalls aufgrund der zum Teil langen Nutzungsdauern erst zeitverzögert an. Die Sammelquote wird durch den Export von genutzten Gütern (z. B. Export von Gebrauchtwagen), langfristig gebundene Stoffe (z. B. Infrastruktur) und Verluste an die Umwelt limitiert. Annahmen zum Verbrauch in Kombination mit Branchenspezifischen Nutzungsdauern (siehe Tabelle 8) und Sammelquoten, ergeben die Entwicklung der Kunststoffabfälle. Bis 2050 ergibt sich eine Steigerung der Kunststoffabfälle von über 40 %. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Kunststoffabfällen als Rohstoff und der Nachhaltigkeitsbestrebungen, wird angenommen, dass die Nettoexporte von Kunststoffabfällen und Kunststoffzyklaten bis 2050 auf 0 sinken werden.

Für das mechanische Recycling werden branchenspezifisch steigende Recyclingquoten angenommen (z. B. bei Verpackungen von 45 % auf 75 % bis 2050 in O45-Strom), daraus ergibt sich eine Gesamtrecyclingquote für das mechanische Recycling von Post-Consumer-Abfällen von 44 % in O45-Strom (heute 33 %). Der Prozess mechanisches Recycling ist im Detail in Kapitel 3.3.3.2 beschrieben. In O45-H₂ wird angenommen, dass das mechanische Recycling halb so schnell zunimmt wie in O45-Strom. Aus der steigenden Abfallmenge, sinkenden Export und steigender Recyclingquote ergibt sich eine Verdopplung des absoluten Potenzials für mechanisches Recycling bis 2050.

Für das chemische Recycling kommen Abfälle in Frage, welche heute energetisch verwertet werden. Der Prozess ist im Detail in Kapitel 3.3.3.3 beschrieben. Trotz steigenden mechanischen Recyclings kann aufgrund des steigenden Abfallaufkommens auch hier ein steigendes Potenzial erwartet werden. In O45-Strom wird angenommen, dass bis 2050 80 % des gesammelten Kunststoffabfalls,

welcher nicht mechanisch recycelt wird, chemisch recycelt wird. In O45-H₂ wird kein chemisches Recycling angenommen.

Die Herstellung von Primärkunststoff ist die Hauptanwendung für Ethylen und andere HVCs (High Value Chemicals). Der potenzielle Einfluss steigender Recyclingmengen auf die Ethylenproduktion wurde unter der vereinfachenden Annahme berücksichtigt, dass die Produktion von Ethylen sich relativ zum Verbrauch von Primärkunststoffen entwickelt¹³.

Während chemisches Recycling direkt zur Ethylenproduktion beitragen kann, wirkt mechanisches Recycling indirekt, indem es die für den deutschen Verbrauch nötige Produktion von neuen Kunststoffen verringert. Dabei muss beachtet werden, dass heute etwa die Hälfte des Rezyklats eingesetzt wird, um Holz oder Beton zu substituieren (Lindner et al. 2022) und so nicht die Kunststoffprimärproduktion reduziert. Es wird angenommen, dass sich durch eine Verbesserung der Prozesse die Substitutionsquote (Anteil des recycelten Kunststoffs, welcher Primärkunststoff ersetzt) auf 80 % bis 2050 steigen lässt. So trägt verstärktes mechanisches Recycling in O45-Strom zu einer Reduktion des Ethylenbedarfs bis 2045 um 23 % bei. Die Annahmen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

¹³ Es wird angenommen, dass der Verbrauch von 1 t Kunststoff, mit der Produktion von 0,4 t Ethylen einhergeht.

Tabelle 8: Annahmen zur Entwicklung des Potenzials für Kunststoffherstellung und des sich daraus ergebenden verbleibenden Ethylenbedarfs

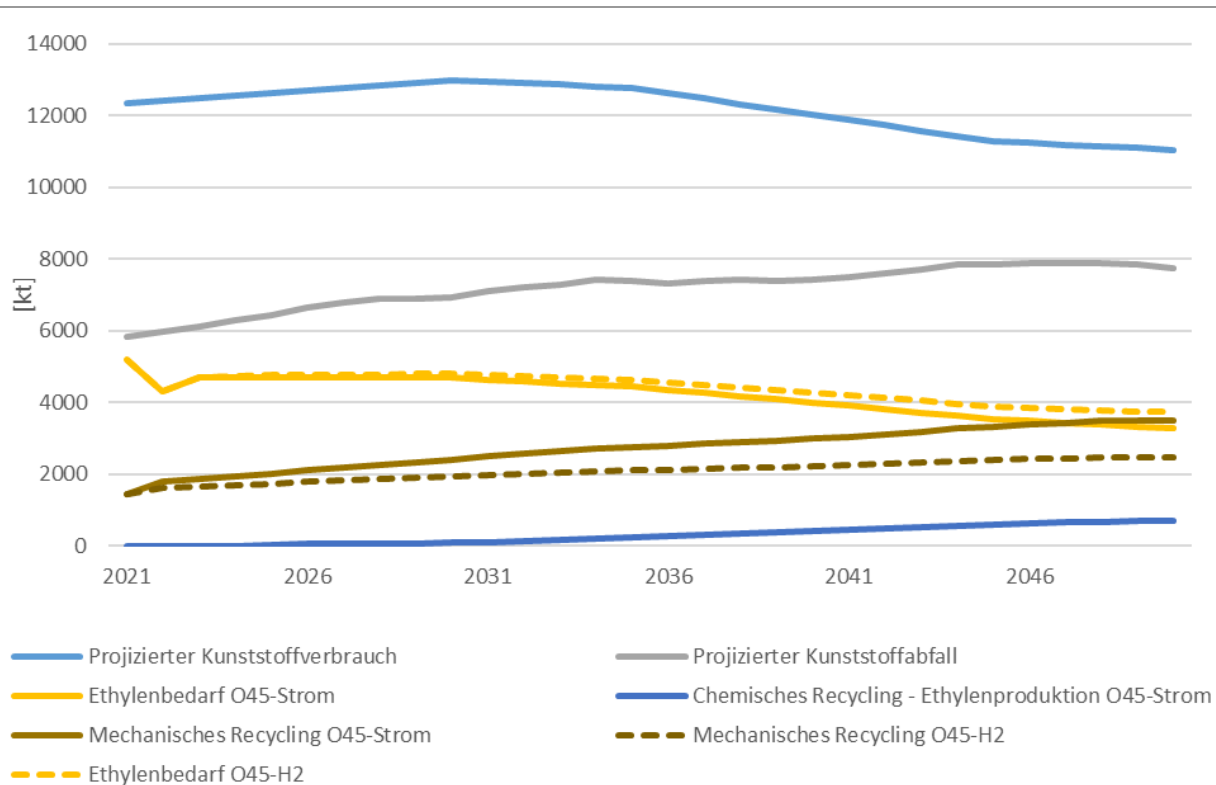
Verbrauch				
Verpackung	Gleichbleibend bis 2030, Rückgang um 38 % bis 2050			
Bau	Gleichbleibend bis 2035, Rückgang um 30 % bis 2045			
Elektro/Elektronik, Fahrzeuge, Landwirtschaft	Gleichbleibende Steigerung bis 2030, dann gleichbleibender Verbrauch			
Möbel	Gleichbleibender Verbrauch			
Haushaltswaren	Leichte Steigerung bis 2050			
Medizin	Gleichbleibende Steigerung			
Sonstiges	Gleichbleibende Steigerung bis 2030, dann gleichbleibender Verbrauch			
Abfall	Nutzungsdauer [Jahre]	Sammelquote	Recyclingquote O-45 Strom 2020 PC ca. 23 %	Recyclingquote O-45 Strom 2050 PC ca. 44 %
Verpackung	1	95 %	41 %	75 %
Bau	61	80 %	19 %	40 %
Fahrzeuge,	18	35 %	18 %	50 %
Elektro / Elektronik	25	50 %	14 %	40 %
Haushaltswaren	55	70 %	4 %	20 %
Möbel	50	70 %	5 %	30 % Sonstiges
Landwirtschaft	10	80 %	28 %	40 %
Medizin	5	90 %	0 %	30 % Sonstiges
Sonstiges	27	60 %	8 %	30 %
Sonstige	In O45-H ₂ ist die Steigerung des Mechanischen Recyclings halbiert im Vergleich zu O45-H ₂ .			
Ethylenfaktor	0,4 t Ethylen / t Kunststoff			
Substitutionsquote	Steigerung von 50 % auf 80 %			
Netto-Export	Rückgang ab 2025 linear bis 2050 auf 0 t/a			
Hochlauf chemisches Recycling	2030 - 10 % des verfügbaren Kunststoffabfalls in O45-Strom, kein chemisches Recycling in O45-H ₂		2050 - 80 % des verfügbaren Kunststoffabfalls in O45-Strom, kein chemisches Recycling in O45-H ₂	

PC – Post-Consumer – Kunststoffe die nach der Nutzung der Abfallsammlung zugeführt werden;

Substitutionsquote – Anteil des Rezyklats welcher zur Substitution von Kunststoffen basierend auf fossilen Rohstoffen genutzt wird

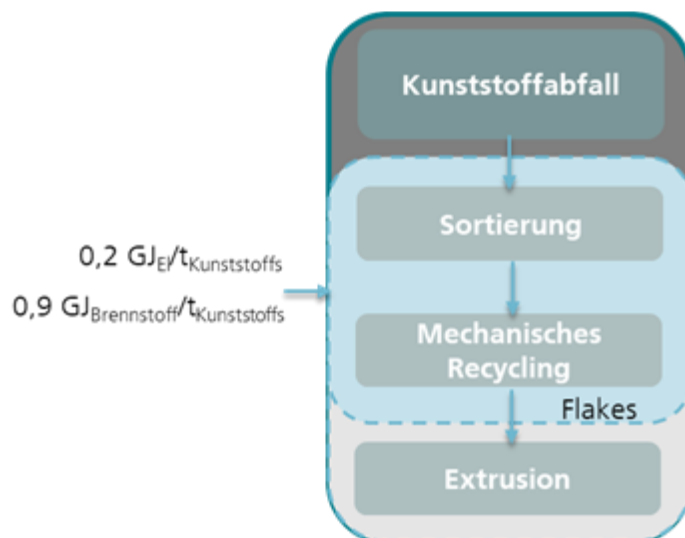
Die daraus abgeleiteten Mengen für das mechanische und chemische Recycling, Kunststoffabfall und übriger Ethylenbedarf sind für O45-Strom in Abbildung 9 dargestellt.

Abbildung 9: Kunststoffsystem: Kunststoffverbrauch, das mechanische und chemische Recycling, Kunststoffabfall und übriger Ethylenbedarf



3.3.3.2 Neuer Prozess – Mechanisches Recycling

Mechanisches Recycling spielt in Deutschland eine wichtige Rolle. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland etwa 1460 Kilotonnen Kunststoffrezyklat aus Post-Consumer-Abfällen hergestellt. Von dieser Menge wurden 640 Kilotonnen Rezyklat aus mechanischem Recycling von Post-Consumer-Abfällen zur Substitution von Primärkunststoff verwendet. Weitere 630 Kilotonnen dienten der Substitution von Werkstoffen wie Beton, Holz und Stahl durch den Einsatz von Rezyklat, und 190 Kilotonnen wurden exportiert (Abbildung 10).

Abbildung 10: Prozesskette mechanisches Recycling, basierend auf (Larrain et al. 2021)

Das mechanische Recycling ist ein etabliertes Verfahren, welches durch einen geringeren Energiebedarf im Vergleich zu anderen Recyclingmethoden oder der Primärproduktion charakterisiert ist. Der aktuell genutzte Prozess zur Aufbereitung von Kunststoffabfällen umfasst Waschen, Zerkleinern, Trocknen und Sortieren der Materialien. Die Endprodukte dieses Prozesses sind meist Pellets oder Flakes. Allerdings ist mechanisches Recycling in der Praxis nur effektiv bei sauberen homogenen Kunststoffen, was die Anwendbarkeit limitiert. Verschmutzung führen zu Qualitätsverlusten nur ein Teil der mechanisch recycelten Kunststoffe erreicht die Qualität von Primärkunststoffen, weshalb recycelte Kunststoffe oft nicht die Primärproduktion reduzieren, sondern andere Materialien wie Beton oder Holz ersetzen. Reststoffe, die nicht recycelt werden, werden zum Beispiel in Müllverbrennungsanlagen oder zum chemischen Recycling genutzt. Angesichts der voraussichtlich steigenden Abfallmengen steigt auch das Potenzial für mechanisches Recycling. Die wichtigsten Prozessparameter sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Techno-Ökonomische Parameter des Mechanischen Recyclings

Basierend auf (Volk et al. 2021). Der Feedstockbedarf entspricht hier einer Tonne Kunststoffabfall mit einem Heizwert von 43 GJ/t (Afzal et al. 2023).

	Wert
Feedstockbedarf	43 GJ/t
Strombedarf	0,86 GJ/t
Brennstoffbedarf	0,22 GJ/t
Spez. Investitionen	211 Euro/t Kapazität
Spez. Betriebskosten	47 Euro/t Kapazität

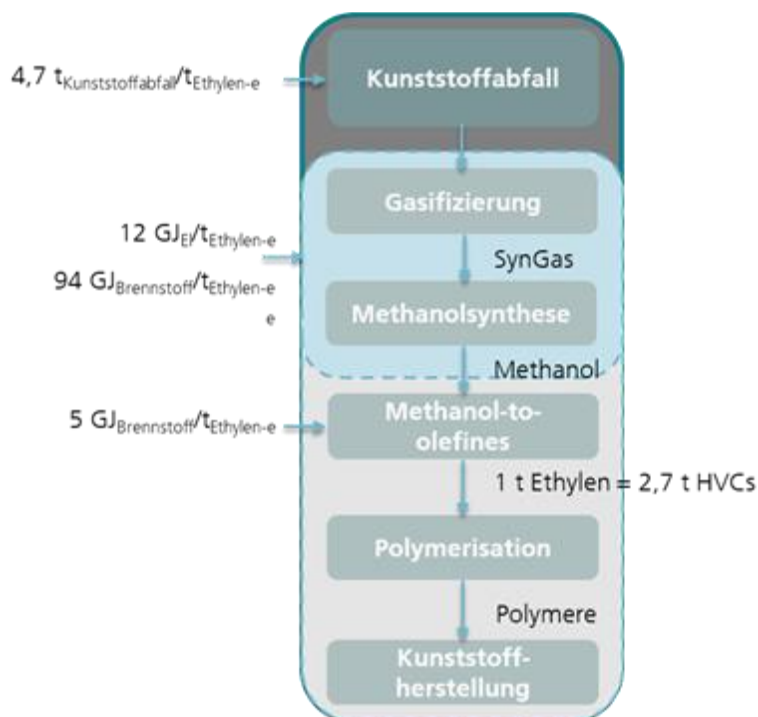
3.3.3.3 Neuer Prozess – Chemisches Recycling

Um der steigenden Relevanz von Recyclingprozessen gerecht zu werden, wird das chemische Recycling explizit im O45-Strom abgebildet. Chemisches Recycling findet heute nur in sehr kleine Mengen statt, bietet jedoch die Möglichkeit Abfälle welche mechanisch nicht verwertet werden können für die Herstellung von neuwertigen Kunststoffen zu nutzen.

Als neuer, potenziell relevanter Prozess wurde die Gasifizierung von Abfall zur Methanolsynthese auf der Grundlage von (Afzal et al. 2023) und anschließender Olefinsynthese auf Basis des bereits in den Langfristszenarien berücksichtigten Prozesses eingefügt.

Abbildung 11: Prozesskette Gasifizierung mit anschließender Methanolsynthese und MtO-Verfahren

Eine Tonne Ethylenequivalent (Ethylen-e) entspricht 2,7 t Olefinen und Aromaten (High Value Chemicals – HVCs). Basierend auf (Afzal et al. 2023; Bazzanella und Ausfelder 2017)



Die Gasifizierung von Abfall zur Methanolsynthese stellt nur einen von vielen möglichen Recyclingprozessen dar. Alternativen sind unter anderem die Pyrolyse oder die Solvolyse von Kunststoffen. Der Abfall wird bei hohen Temperaturen zu Synthesegas gasifiziert, das Gas wird aufgereinigt und Methanol daraus synthetisiert, welches anschließend mittels Destillation aufgereinigt wird. Die Gasifizierung zeichnet sich durch geringe Anforderungen an die Abfallqualität aus, was eine hohe Anwendbarkeit für unterschiedliche Abfallströme ermöglicht, und bietet die Möglichkeit zur Herstellung von Olefinen und Aromaten durch nachgeschaltete Methanol-to-Olefins (MtO) bzw. Methanol-to-Aromatics (MtA) Prozesse. Für die Gasifizierung mit anschließender Methanolsynthese werden neben dem Abfall, viel Energie, Wasser und geeignete Katalysatoren benötigt. Die gesamte vereinfachte Prozesskette ist in Abbildung 11 dargestellt. Alternativ könnte das Methanol für die Herstellung von Kraftstoffen genutzt werden. Bei der Gasifizierung kommt es weiterhin zu CO₂-Emissionen, da nicht der gesamte Kunststoff umgesetzt wird. Gleichzeitig vermeidet die Gasifizierung jedoch Emissionen, die durch die Abfallverbrennung und konventionelle, erdgasbasierte Prozesse sowie deren vorgelagerte Emissionen, wie z. B. bei der Erdgasgewinnung und dem Transport, entstehen würden.¹⁴ Außerdem ist denkbar einen Teil der Emissionen aus dem Abgas abzuscheiden. Welche Prozesse für das chemische Recycling sich großflächig durchsetzen, ist zurzeit unklar.

¹⁴ Bei der Gasifizierung kommt es zu 0,8 kg Emissionen pro Tonne Methanol (Afzal et al. 2023). Dem gegenüber stehen etwa 0,4 kg CO₂-Emissionen beim konventionellen Prozess, weitere 0,37 kg bei dessen Vorkette (Methanol Institute 2022) und etwa 1,8 kg vermiedene CO₂-Emissionen, welche bei der Verbrennung des Abfalls frei würden.

Die Prozessparameter für die Gasifizierung mit anschließender Methanolsynthese sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Daten sind als Größenordnung zu verstehen, da es große Unsicherheiten und gleichzeitig wenig empirische Daten gibt.

Tabelle 10: Techno-Ökonomische Parameter des Prozesses zur Gasifizierung von Kunststoffabfall mit anschließender Methanolsynthese

Basierend auf (Afzal et al. 2023) mit 0,90 USD/EUR (2016)

	Wert
Feedstockbedarf	29 GJ/t Methanol
Strombedarf	14 GJ/t Methanol
Brennstoffbedarf	1,7 GJ/t Methanol
Spez. Investitionen	990 Euro/t Kapazität
Spez. Betriebskosten	71 Euro/t Kapazität

3.4 Annahmen und techno-ökonomische Parameter

3.4.1 Wirtschaftliche Entwicklung des Industriesektors

Grundlegende Rahmendaten für die Industrie sind die Entwicklung der Wertschöpfung und der Produktionsmengen wichtiger energieintensiver Produkte der Grundstoffindustrie. Die Gesamtwertschöpfung der Industrie wächst im Modellierungszeitraum (2021 bis 2045) per Annahmedurchschnittlich um 1,4 % pro Jahr, was vorwiegend durch die nicht-energieintensiven Subsektoren Fahrzeug- und Maschinenbau und sonstigen Wirtschaftszweigen getrieben wird. In der energieintensiven Grundstoffindustrie wächst die Wertschöpfung etwas langsamer zwischen 0,8 % und 0,9 % pro Jahr¹⁵.

Tabelle 11: Bruttowertschöpfung und Wachstum

Je Subsektor in allen O45-Szenarien [Mrd. €₂₀₂₁].

Mrd. € 2018	2021	2025	2030	2040	2045	CAGR ¹ 2021-2045
Bergbau	1,8	1,9	1,9	1,7	1,7	-0,3 %
Ernährung und Tabak	48,6	55,8	58,4	64,2	67,3	1,4 %
Fahrzeugbau	116,2	134,3	142,4	161,4	171,8	1,6 %
Glas u. Keramik	5,9	6,6	6,7	7,0	7,2	0,8 %
Grundstoffchemie	26,1	29,1	29,6	31,7	32,9	1,0 %
Gummi- u. Kunststoffwaren	25,4	28,7	29,5	31,9	33,2	1,1 %
Maschinenbau	88,2	102,1	108,5	123,3	131,4	1,7 %
Metallbearbeitung	45,0	50,4	51,4	54,5	56,3	0,9 %
Metallerzeugung	6,1	6,8	6,9	7,2	7,5	0,9 %

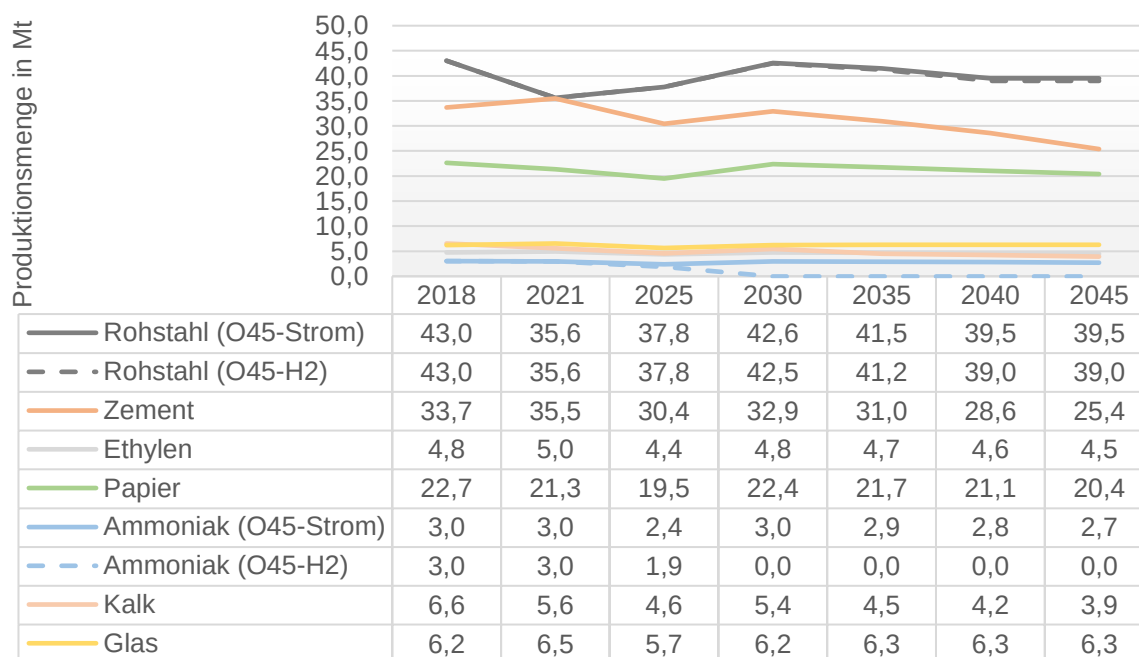
¹⁵ Siehe dazu auch 4.2.1.4.

NE-Metalle, -gießereien	9,7	10,9	11,1	11,7	12,1	0,9 %
Papiergewerbe	10,0	11,3	11,7	12,4	12,7	1,0 %
Sonstige chemische Industrie	30,4	35,1	37,0	41,2	43,3	1,5 %
Sonstige Wirtschaftszweige	103,7	117,9	122,5	132,8	138,7	1,2 %
Verarbeitung v. Steine u. Erden	7,6	8,4	8,5	9,0	9,2	0,8 %
Summe	524,7	599,4	626,2	690,0	725,2	1,4 %

1: CAGR: „Compound Annual Growth Rate“, jährliche Wachstumsrate

Quelle: Destatis 2023, Szenarioannahmen Fraunhofer ISI

Für energieintensive Subsektoren sind die unterstellten physischen Produktionsmengen der hauptsächliche Treiber von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen. Abbildung 12 zeigt die Annahmen zur Produktion von ausgewählten THG-intensiven Produkten der Grundstoffindustrien. Demnach wird für einige Produkte ein leichter durch ambitionierte Materialeffizienz bedingter Rückgang angenommen, insgesamt entwickeln sich die Produktionsmengen kontinuierlich. Statistische Daten reichen je nach Verfügbarkeit bis zum Jahr 2021 oder 2022. Mittelfristig wurde angenommen, dass die Produktionsmengen sich bis 2028 aus der aktuellen Krise in den Jahren 2022/23/24 erholen. Es wird weder von einem starken Wachstum noch von einer deutlichen Abwanderung in andere Länder ausgegangen. Die Produktionsmengen enthalten bereits Annahmen zur Steigerung der Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette und insbesondere in der Bauwirtschaft. Maßgeblicher Unterschied der O45-Szenarien ist die Annahme der Importsubstitution von Ammoniak in O45-Strom, die in O45-H₂ nicht aufrechterhalten wird.

Abbildung 12: Annahmen der Produktionsmengen energieintensiver Produkte

3.4.2 Herstellung von Energiewendetechnologien

Der Wandel zur Klimaneutralität geht mit einem sehr hohen Bedarf an klimaneutralen Produkten und Anlagen einher. Es ist wahrscheinlich, dass zukünftig ein Teil dieser Produkte in Deutschland hergestellt wird, wobei der Umfang zukünftiger heimischer Fertigung sehr unsicher ist. Um den Energiebedarf für die Fertigung sogenannter Energiewendetechnologien abzubilden, sind die Prozesse zur Produktion von PV-Modulen, Dämmstoffen und Windkraftanlagen (WKA) sowie KFZ-Batterien in der Modellierung berücksichtigt und wirken sich entsprechend auf den Energiebedarf des Industriesektors aus. Die Produktion von Elektrolyseuren und Wärmepumpen wurde ebenfalls geprüft, wird aufgrund des relativ geringen Energiebedarfs jedoch nicht explizit abgebildet.

Um die Prozesse im Modell abzubilden, müssen eine Reihe von Annahmen zu Aktivitätsniveau, Wertschöpfungstiefe und spezifischem Energieverbrauch getroffen werden. Diese werden im Folgenden beschrieben. Das Aktivitätsniveau leitet sich aus den in den O45-Szenarien benötigten Mengen ab und enthält Annahmen zu Importen. Die angenommenen Wertschöpfungstiefe ist besonders unsicher und muss entsprechend, als Annahme betrachtet werden. Daten zum spezifischem Energieverbrauch der Prozesse sind in der Literatur verfügbar, können aber durch Hochskalierung und technisches Lernen zukünftig weiter sinken.

Wichtige Annahmen zu den berücksichtigten Energiewendetechnologien sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Hauptannahmen zu berücksichtigen Energiewendetechnologien

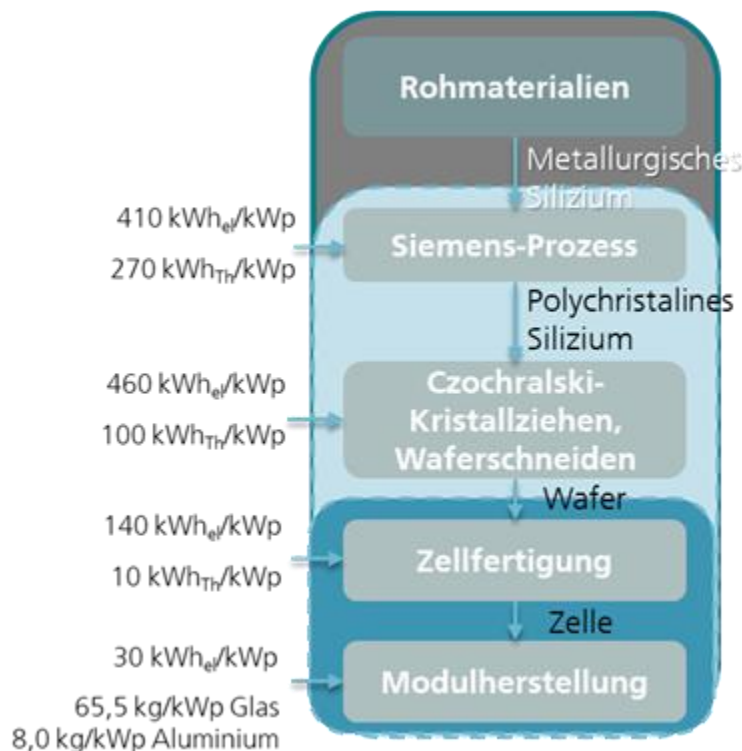
Technologie	Definition/ Abgrenzung / Komponenten	Mittelwert Aktivität pro Jahr 2020-2045	SEC der Herstellung bezogen auf die Aktivitätsgröße
KfZ-Batterie	Ausgeglichene Handelsbilanz BEV; Aktivität ist Produktionsmenge nach T45-Strom	200 GWh Batteriekapazität	0,07 TWh/GWh
Windkraftanlagen	Aktivität ist jährlicher Zubau nach T45-Strom	~10 GW Installierte Leistung	0,2 TWh/GW
PV-Module Option 1	Vorprodukte im Ausland;	~3 GW Installierte Leistung	0,15 TWh/GW
PV-Module Option 2	Tiefe Wertschöpfungskette;	~3 GW Installierte Leistung	1,4 TWh/GW
Dämmstoffe	Nur zusätzliche Bedarfe durch verstärkte Sanierung (~50 %); Aktivität ist orientiert an T45-Strom	208 km ² Gedämmte Gebäudehülle	0,05 TWh/km ²

3.4.2.1 PV-Module

Im Folgenden sind die Prozesse und getroffene Annahmen zur Abbildung der Prozesse in der Modellierung kurz dargestellt (Abbildung 13). Die Produktion von PV-Modulen kann in vier Schritte unterteilt werden. Im Siemensprozess wird metallurgisches Silizium zu polykristallinem Silizium verarbeitet. Daraus werden nach dem sogenannten Czochralski-Kristallziehen Wafer geschnitten. Diese Wafer werden zu Zellen verarbeitet, die schließlich zu Modulen zusammengefügt werden. Der spezifische Energiebedarf beträgt 1400 kWh pro installierte kW-Leistung, davon entfallen 1200 kWh auf die Waferherstellung. Im Jahr 2045 wird die installierte PV-Kapazität in Deutschland nach T45-Strom¹⁶ 428 GW betragen. Zurzeit findet die Modulherstellung in Deutschland bereits statt, die vorgelagerten Schritte jedoch nur in geringem Umfang (Fraunhofer ISE, PSE Projects GmbH 2024).

¹⁶ Die Ergebnisse der Stromerzeugungsmodellierung in O45 waren zum Zeitpunkt der Modellierung des Industriesektors noch nicht vorhanden. Daher wurde auf die (älteren) T45-Szenarien zurückgegriffen. Die Unterschiede der in den Szenarien installierten PV-Kapazität sind gering (O45-Strom: 403 GW).

Abbildung 13: Prozesskette zur Herstellung von PV-Modulen basierend auf (Fthenakis et al. 2011; Ökobaudat 2022; Hengstler et al. 2021)



Es wird angenommen, dass, um die im Jahr 2045 nach T45-Strom benötigte PV-Kapazität von 428 GW zu erreichen, die Produktion von PV-Modulen in Deutschland verstärkt wird, mit einer Kapazität von 6 GW pro Jahr¹⁷. Für die Hälfte der Kapazität wird angenommen, dass die gesamte Wertschöpfungskette in Deutschland stattfindet. Für die andere Hälfte (3 GW pro Jahr) werden die benötigten Wafer importiert, so dass nur die Zellfertigung und die Modulproduktion in Deutschland stattfinden. Zusätzlich wird ein steigender Bedarf an Aluminium und Glas berücksichtigt.

3.4.2.2 Dämmstoffe

Energieeffiziente Gebäude sind Voraussetzung für ein effizientes Erreichen der Klimaziele. Die Produktion von Dämmstoffen könnte darum in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Dämmstoffe sind ein sehr heterogener Markt. Der Energiebedarf zur Produktion von Dämmstoffen und der Materialbedarf kann je nach Material stark schwanken (Umweltbundesamt (UBA) 2013) und überlagert sich mit verschiedenen Branchen. In der Modellierung wird ein durchschnittlicher Energiebedarf von 0,05 TWh/km² angenommen. Für die Implementierung wird ein Wachstumspfad angenommen, der an die Sanierungstätigkeit im Gebäudesektor gekoppelt ist. Basierend auf einem Dämmbedarf von etwa 5200 km² zu dämmender Fassadenfläche (Wissenschaftliche Dienste 2022) und unter der Annahme, dass die Sanierungsrate sowie der Dämmstoffbedarf bis 2035 langsam ansteigen, ergibt sich inklusive Ersatzinvestitionen ein jährlich steigender Energiebedarf von etwa 8,3 TWh pro Jahr bis 2045 bei einer Importrate von 40 %.

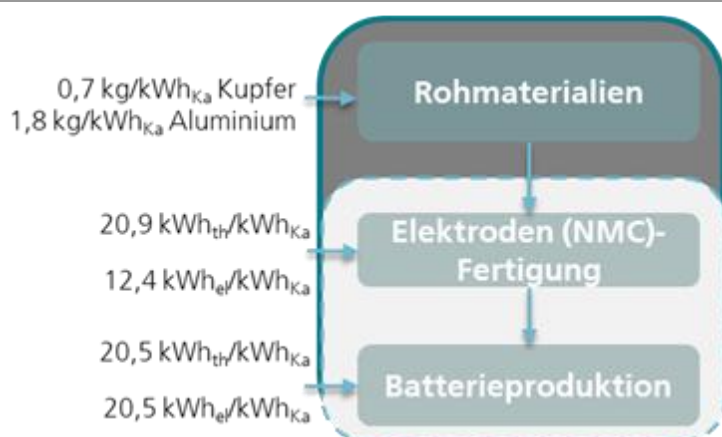
¹⁷ Inklusive Ersatzinvestitionen, unter der Annahme, dass der Anteil heimischer Produktion bis 2035 ansteigt

3.4.2.3 KFZ-Batterien

Als neue Verbraucher wurden Batteriefabriken bereits in den T45 Szenarien berücksichtigt. Sie sind entsprechend Definition der Wirtschaftszweige (WZ2008) im Subsektor der Metallbearbeitung (Nr. 27.2) eingeordnet. Für diesen Subsektor haben sie als vollständig neuer Verbraucher eine hohe Bedeutung. Neu hinzugefügt wird die Produktion von NMC (Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide)-Kathoden. NMC ist nur eines von verschiedenen möglichen Kathodenmaterialien und die Zusammensetzung kann je nach Batterie variieren (Degen und Schütte 2022). Basierend auf dem Energiebedarf zur Herstellung von NMC wird hier für die gesamte Kathodenproduktion ein Energiebedarf von $33,3 \text{ kWh/kWh}_{\text{Kapazität}}$ berücksichtigt (Dai et al. 2019).

Die Batterieproduktion wird mit einem spezifischen Energiebedarf von $42 \text{ kWh/kWh}_{\text{Kapazität}}$ angenommen (Abbildung 14), der sich zur Hälfte auf Strom und Wärme aufteilt (Degen und Schütte 2022). Ausgehend vom Batteriebedarf für Elektromobilität wird eine Annahme zur Entwicklung der Batterieproduktion getroffen. Die Berechnung nutzt den im Verkehrssektor der O45-Szenarien berechneten Bedarf an Batterien für Neufahrzeuge als Grundlage (in O45-Strom 2045: 262 GWh) – demnach werden bilanziell alle inländisch genutzten Fahrzeuge mit in Deutschland produzierten Batterien versorgt¹⁸.

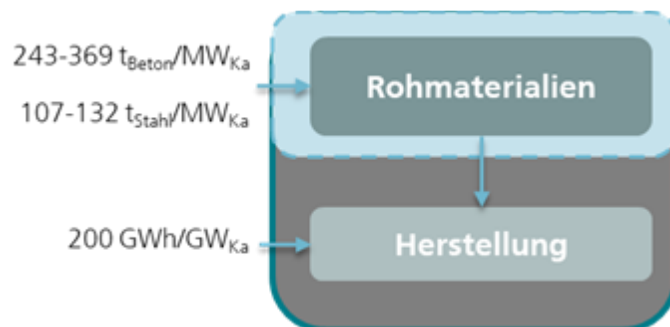
Abbildung 14: Prozesskette zur Herstellung von KFZ-Batterien basierend auf (Dai et al. 2019, Degen und Schütte 2022)



3.4.2.4 Windkraftanlagen

Windkraftanlagen sind essenziell für das klimaneutrale Energiesystem. Das Ziel in O45-Strom von 160 GW Windkraft an Land und 70 GW auf See bis 2045 bedingt einen schnellen, großskaligen Ausbau. Der Bau von Windkraftanlagen kann energieintensiv sein und benötigt große Mengen Stahl und Beton. Es wird ein spezifischer Energiebedarf von $200 \text{ GWh/GW}_{\text{installierte Leistung}}$ angenommen (Ghenai 2012), (Abbildung 15). Der jährliche Energiebedarf steigt damit inklusive Ersatzinvestitionen bis 2045 auf etwa 2 TWh pro Jahr. Der resultierende Bedarf an Beton (ca. 80 Mio. t) und Stahl (ca. 30 Mio. t) wird in jeweiligen Branchen berücksichtigt.

¹⁸ Dabei wird die grobe Annahme getroffen, dass Ex- und Importe von batterielevanten Fahrzeugen ausgeglichen sind. Abweichende Annahmen sind möglich.

Abbildung 15: Prozesskette zur Herstellung von Windkraftanlagen basierend auf (Ghenai 2012)

3.4.3 Kreislaufwirtschaft und Umstellung auf Sekundärrouen

Für die Herstellung von Materialien wie Stahl, Aluminium, Papier, Glas und Kunststoffe liegt der Energieverbrauch der Sekundärroue mitunter ein Vielfaches unter dem der Primärroue. Entsprechend weist der weitere Ausbau der Kreislaufwirtschaft ein großes Potenzial zur Dekarbonisierung der Industrie auf. Im Modell FORECAST werden Primär- und Sekundärroue ausgewählter CO₂-intensiver Produkte separat abgebildet, wodurch die Kreislaufwirtschaft über exogene Verschiebungen der Produktionsmengen detailliert in den Szenarien aufgenommen werden kann. Technische und ökonomische Hemmnisse, wie die Verfügbarkeiten von Recyclingmaterial oder abweichende Produktqualitäten der Sekundärroue, können entsprechend in die exogenen Annahmen einfließen.

In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt der Kreislaufwirtschaft auf einem Anstieg der Sekundärproduktion bei Produkten wie Papier, Aluminium und Glas. Hier sind die verbleibenden Potenziale für eine weitere Steigerung vergleichsweise niedrig. In allen Szenarien wird die Sekundärroue von Stahl und Kunststoffen deutlich ausgebaut, da hier große THG-Minderungspotenziale liegen. Besonders die Steigerung des Anteils von Elektrostahl von etwa 30 % im Jahr 2015 auf 49 % in O45-Strom, bzw. 42 % in O45-H₂ hat eine hohe CO₂-Minderung zur Folge, da die Primärroue über den Kohle- und Kokseinsatz im Hochofen sehr CO₂-intensiv ist. Dies wird von den Annahmen gestützt, dass die Produktion von hochwertigem Sekundärstahl den industriellen Maßstab erreicht, und in Hochleistungsstahlsegmenten eingesetzt werden kann. Des Weiteren wird von einer steigenden Schrottverfügbarkeit basierend auf dem steigenden Stahlverbrauch der letzten Jahrzehnte sowie verbesserter Sammel- und Sortierungsverfahren ausgegangen.

Um der wachsenden Bedeutung des Kunststoffrecyclings gerecht zu werden, werden das mechanische Recycling und das chemische Recycling, in Form der Gasifizierung, explizit durch Prozesse im Modell abgebildet (siehe Abschnitt 3.3.3). Da das Potenzial stark von der Verfügbarkeit von geeignetem Abfall abhängt, wurde dieses gesondert untersucht.

Tabelle 13: Annahmen zur Kreislaufwirtschaft in den O45 Szenarien

Produkt	Recyclingquoten bis 2045
Stahl	Sekundärstahl von 30 % auf 41 % bis 49 %
Kunststoffe/Ethylen	Szenariospezifisch, bis zu 90 % des Abfalls, siehe Kapitel 3.3.3.1
Glas	Steigerung Flachglasrecycling (Energieeffizienzmaßnahme)
Papier	Anteil Altpapierfasern an Gesamtfasern konstant bei 87 %
Aluminium	Anteil Sekundäraluminium konstant bei 59 %

Bei den meisten Produkten ist die Produktion über die Sekundärroute auf Basis von Recyclingmaterialien weniger Energie- und CO₂-intensiv. Bei dieser Umstellung verändern sich neben dem eigentlichen Produktionsprozess in der Grundstoffindustrie weitere Teile der Wertschöpfungskette. So wird die vorgelagerte Gewinnung und Aufbereitung von Primärrohstoffen durch Logistik zum Sammeln, Sortieren und Aufbereiten der Recyclingmaterialien ersetzt. Eine vollständige CO₂-Bilanz müsste auch diese Teile der Wertschöpfungskette mit einbeziehen, inkl. veränderter Transportströme. Dies kann im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Energieverbrauch für die Herstellung der Produkte den Gesamtverbrauch über den Lebenszyklus deutlich dominiert, da hier die Produkte und Materialien mit besonders hohen CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase ausgewählt wurden.

Tabelle 13 fasst die zentralen Annahmen zur Kreislaufwirtschaft für Produkte mit besonders hohen CO₂-Emissionen zusammen. Während der Umbau zu einer umfassenden Kreislaufwirtschaft viele weitere Produkte und Branchen betrifft, wird der Schwerpunkt in dieser Studie auf besonders CO₂-intensive Produkte gelegt. So werden die größten Hebel zur CO₂-Minderung abgebildet.

3.4.4 Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette

Während Energie- und Materialeffizienz in den Verfahren der energieintensiven Grundstoffindustrie häufig bereits weitestgehend optimiert sind, bietet der effiziente Einsatz von CO₂-intensiven Materialien entlang der Wertschöpfungsketten sowie in den unterschiedlichen Verbrauchsbereichen ein hohes ungenutztes Potenzial zur Minderung der CO₂-Emissionen sowie des Energieverbrauchs auf. CO₂-intensive Materialien sind häufig in großen Mengen und zu niedrigen Preisen für Endverbraucher verfügbar (Beton, Papier, Kunststoffe) und ihre Kosten spielen nur eine untergeordnete Rolle bei der Investitionsentscheidung der jeweiligen Endprodukte (z. B. Stahlkosten anteilig am Preis eines Pkw). Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz können dabei sehr vielfältig sein und z. B. den Ausschuss im Produktionsprozess minimieren, die Verwendung von Beton und Stahl im Hochbau aufgrund genauerer statischer Rechnungen optimieren oder die Stärke von Verpackungsmaterial wie Glasflaschen reduzieren.

Im Modell FORECAST wird der Materialeffizienzfortschritt als exogene Änderung der Produktionsmengen von CO₂-intensiven Produkten szenarioabhängig definiert. Damit ist es möglich, Materialeffizienz deutlich konkreter zu berücksichtigen, als dies alleine mit wirtschaftlichen Aktivitätsgrößen der Fall wäre. Strategien zur Erhöhung der Materialeffizienz sind vielfältig und können je nach Sektor oder Produkt sehr unterschiedlich ausfallen. Gleichzeitig überlagern Annahmen zur gesamtwirtschaftlichen Entwicklung Materialeffizienzfortschritte. Daher werden hier ergänzend zu Änderungen gegenüber dem Basisjahr der Modellierung (2021) Anteile der Materialeffizienz bis 2045 dargestellt (Tabelle 14).

Die getroffenen Annahmen basieren auf Literaturlauswertung (Milford et al. 2011; Milford et al. 2013; Zettl et al. 2014; Bringezu et al. 2015; Herbst 2017; Material Economics 2018; Purr et al. 2020) sowie auf bereits vorhandenem Wissen, z. B. durch Experteninterviews.

Bei den Produkten Rohstahl, Papier, Zement und Behälterglas wurde ein Materialeffizienzfortschritt von 7 % bis 10 % angenommen. Somit ist die in allen Szenarien hinterlegte Produktionsmenge der Produkte im Jahr 2045 um 7 % bis 15 % niedriger als in möglichen Szenarien ohne diesen Fortschritt. Für ausgewählte Produkte sind weitere szenario-inhärente Trends berücksichtigt. So geht der Bedarf an Kalk stärker zurück, da der Einsatzzweck im Hochofen substituiert wird und in der Rauchgasentschwefelung bei Kohlekraftwerken entfällt. Diese und weitere die Produktnachfrage beeinflussende Zusammenhänge sind dargestellt, auch wenn sie andere Ursachen als Materialeffizienz haben.

Dieser hinterlegte Materialeffizienzfortschritt kann aus technischer Sicht als moderat bis vorsichtig eingeschätzt werden, da die technischen Potenziale in vielen Fällen durchaus höher sind. Andererseits verlangt die Realisierung der Potenziale eine grundlegende Umstellung des regulatorischen Rahmens sowie der Routinen bei den Endverbrauchern. Materialkosten spielen derzeit eine untergeordnete Rolle bei wirtschaftlichen Entscheidungen in den relevanten Endverbrauchssektoren, wie z. B. in der Bauwirtschaft. Viele der CO₂-intensiven Produkte werden in der Bauwirtschaft eingesetzt. Entsprechend ist dies der Schlüsselsektor, um eine effektive Materialeffizienzstrategie mit hoher CO₂-Wirkung umzusetzen.

Tabelle 14: Annahmen zum Fortschritt der Materialeffizienz in O45-Szenarien

Produkt	Veränderung Produktion in 2045 ggü. 2021	Darin Veränderung durch Materialeffizienz	Hintergrund
Rohstahl	+8 %	-5 %	Effizientere Produktverwendung und Materialsubstitution, z. B. in der Automobilindustrie
Aluminium	+17 %	-5 %	-
Papier	-7 %	-10 %	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Produkt- und Verpackungsgestaltung (Bedeutung von Verpackungen steigt weiter)
Behälterglas	+2 %	-10 %	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Produkt- und Verpackungsgestaltung
Zement	-30 %	-5 %	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Bauwirtschaft
Klinker¹	-32 %	-15 %	Rückgang Klinkeranteil in der Zementproduktion von 0,72 im Jahr 2021 auf 0,65 in 2045 und entsprechender Anstieg bei alternativen Zumahlstoffen
Kalk	-33 %	-5 %	Rückgang maßgeblich durch Kohleausstieg, zum Teil durch Stahltransformation (fällt nur teilweise unter Materialeffizienz).
Ammoniak	-100 % (O45-H ₂ : -9 %)	O45-H ₂ : -10 %	Nachfragereduktion Mineraldünger (Präzisionslandbau, verbesserte Stickstoffaufnahme)
HVC	-8 %	- 10 %	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Produkt- und Verpackungsgestaltung von Kunststoffen
Fleisch/Molkerei	-20 %	0 %	Rückgang aufgrund geänderter Ernährungsgewohnheiten (fällt nicht unter Materialeffizienz).

Quelle: Fraunhofer ISI

3.4.5 Energieeffizienz

Energieeffizienz ist eine der zentralen Säulen zur Treibhausgasreduktion. Kurz- und mittelfristig reduziert sie durch die Senkung des Bedarfs an fossilen Energieträgern, Strom und Fernwärme die THG-Emissionen. Langfristig sorgt Energieeffizienz im klimaneutralen Energiesystem dafür, dass die Bedarfe an erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung, PtX und Infrastrukturen, und damit die dabei entstehenden Kosten, sinken.

Im Modell FORECAST sind etwa 200 einzelne Effizienztechniken hinterlegt, welche in Abhängigkeit ihrer Wirtschaftlichkeit unterschiedlich schnell durch den Anlagenbestand diffundieren und so die Effizienz von Prozessen bzw. Querschnittstechniken verbessern.¹⁹ Entsprechend der empirischen Literatur zur Diffusion von Effizienztechniken wird im Modell die Amortisationsdauer der Investitionen als zentrales Wirtschaftlichkeitskriterium angesetzt. Bei vielen Unternehmen setzen Effizienzprojekte mit einer längeren Amortisationsdauer als drei Jahre nicht um. In den O45-Szenarien wird davon ausgegangen, dass auch Projekte mit deutlich längerer Amortisationsdauer umgesetzt werden.

Allen O45-Szenarien liegt ein ambitionierter Effizienzfortschritt zugrunde. Dieser setzt den Einsatz von bester verfügbarer Technik (BVT) voraus, sowohl bei Prozesstechniken wie auch bei Querschnittstechniken wie Motoren, Druckluft oder Dampferzeugung. In vielen Bereichen muss sogar darüber hinausgegangen werden, indem auch innovative Effizienztechniken eingesetzt werden, die heute noch nicht am Markt verfügbar sind. Aggregierte Ergebnisse zum Effizienzfortschritt finden sich in Kapitel 4.2.1.4.

3.4.6 Prozesswechsel auf klimafreundliche Produktionsverfahren

Die Umstellung auf eine nahezu CO₂-neutrale Produktion erfordert in den O45-Szenarien grundlegende Umstellungen in der Herstellung von Massenprodukten der Grundstoffindustrien wie Ammoniak, Olefine, Stahl, Glas und Zement, welche aktuell zum Großteil fossile Brenn- und Rohstoffe nutzen. Am bedeutendsten ist dabei derzeit Erdgas als Rohstoff in der Chemie und als Energieträger in allen Prozessen, insbesondere in der Glasherstellung, außerdem Kohle als Reduktionsmittel und Energieträger in der Stahlherstellung und als günstiger Energieträger für die Zementproduktion. Die Substitution von fossilen Energien durch CO₂-freie Energieträger verlangt häufig eine umfangreiche Umstellung von bestehenden Prozessen und Anlagen. Gleiches gilt für die Vermeidung von prozessbedingten Emissionen, welche z. B. in den heutigen Verfahren bei der Herstellung von Stahl, Zement oder Ammoniak in großen Mengen auftreten.

Neue CO₂-arme oder potenziell CO₂-neutrale Verfahren sind häufig noch nicht im großindustriellen Einsatz. Es befinden sich jedoch in allen Branchen entsprechende neue Verfahren in der Entwicklung, die häufig bereits im Pilot- oder Demomaßstab erprobt werden und bei einer entsprechenden Perspektive auf einen wirtschaftlichen Betrieb auf den industriellen Maßstab hochskaliert werden können.

Tabelle 15 gibt einen Überblick der berücksichtigten Verfahren, der zugehörigen Referenztechnik, dem CO₂-Minderungspotenzial sowie eine Einordnung zur technischen Reife entsprechend des „Technology Readiness Level“ (TRL²⁰). Investitionen werden bezogen auf die Produktionskapazität angegeben und sind als Größenordnung zu verstehen, da es große Unsicherheiten und gleichzeitig

¹⁹ Für eine Übersicht der abgebildeten Effizienztechniken wird verwiesen auf Fleiter et al. 2013.

²⁰ Die TRL ordnen die technische (und ökonomische) Reife in einer aufsteigenden Reihenfolge; von Grundlagenforschung (TRL 1) über Labor- (TRL 4), Pilot- (TRL 5) und Demonstrationsanlagen (TRL 6) bis hin zu wettbewerbsfähigen, hochskalierten Anlagen (TRL 9). Es existieren verschiedene Definitionen, hier wird sich auf die der EU Kommission im Rahmen des Horizon 2020-Programms bezogen (European Commission 2014).

wenig empirische Daten gibt. Die Investitionen werden für die Jahre 2030 und 2045 ausgewiesen, wodurch ersichtlich wird, bei welchen Technologien in welchem Maße technisches Lernen und Kostenreduktion hinterlegt sind. Dies ist insbesondere bei relativ „neuen“ Verfahren der Fall.

Viele der CO₂-armen Verfahren beruhen auf dem Einsatz von CO₂-neutralen Sekundärenergieträgern wie Strom oder Wasserstoff. Zu direkter Elektrifizierung zählt die elektrisch beheizte Glasschmelzwanne. Andere Verfahren nutzen CO₂-neutral hergestellten Wasserstoff als Energieträger und Reduktionsmittel (Stahl: DRI) und Rohstoff (Chemie: Methanol, Ammoniak, Naphtha). Andere Ansätze verfolgen Materialsubstitutionsstrategien. Diese umfassen die Markteinführung neuer Zementsorten (CO₂-armer Zement), die geringere Anteile des problematischen Rohstoffs Kalkstein nutzen und zum Teil einen geringeren energetischen Aufwand erfordern. Für eine ausführlichere Diskussion der technischen Reife der einzelnen Technologien wird auf den Bericht zu den TN-Szenarien verwiesen (Fleiter et al. 2022).

Obwohl all diese Prozesse ein großes Potenzial zur Emissionsreduktion zeigen, bestehen substanzielle wirtschaftliche Unsicherheiten, die die Umsetzung in der Breite (über Pilot- und Demonstrationsanlagen hinausgehend) bislang verhinderten. Aus diesem Grund sind auch technische Fragen der Machbarkeit im industriellen Maßstab noch nicht immer sicher beantwortet. Gleichzeitig existieren derzeit mehrere sowohl wissenschaftliche als auch kommerzielle Projekte, die sich der Umsetzung der Technologien widmen (siehe Einschätzung TRL und Literaturlauswahl in Tabelle 15). In allen O45-Szenarien wird daher angenommen, dass die Markteinführung im industriellen Maßstab zwischen 2025 und 2030 bei entsprechend ambitioniertem Vorgehen möglich ist. Ein vollständiger Umbau der Produktionsrouten ist dann bis 2045 notwendig, um eine nahezu THG-neutrale Industrieproduktion zu erreichen. Tabelle 4 gibt einen Überblick zur Wahl der jeweiligen Verfahren in den einzelnen Szenarien. Eine Darstellung des Prozesswechsels im zeitlichen Verlauf ist im Abschnitt für die Sektoren Stahl, Grundstoffchemie sowie Zement und Kalk verfügbar (siehe Abschnitt 3.3)

Tabelle 15: Übersicht der Annahmen zu klimafreundlichen Produktionsverfahren

Branche	Neues Verfahren	Referenz-Verfahren	TRL	THG-Minderung ggü. Ref [%]1	Spez. Energieverbrauch [GJ/t]	Spez. Investitionen [Euro/t Kapazität]1		Quellen
						2030	2045	
Chemie	H ₂ als Rohstoff für Ammoniak Synthesegas	Dampf-reformierung (Rohstoff Erdgas)	8-9	Bis 100 %	6,2 (elektrisch) 25,2 (Rohstoff)	272	272	(Bazzanella und Ausfelder 2017; Schneider et al. 2019; Smith et al. 2020; Stork et al. 2018)
	H ₂ als Rohstoff für Methanol Synthesegas	Dampf-reformierung (Rohstoff Erdgas)	8-9	Bis 100 %3	5,4 (elektrisch) 22,7 (Rohstoff)	450	450	(Bazzanella und Ausfelder 2017; Schneider et al. 2019; Stork et al. 2018; Pérez-Fortes et al. 2016)
	Methanol-to-Olefins (MTO)	Steamcracker mit erdölba-sierten Raffineriepro-dukten (Naphtha)	8-9	<0 bis > 100 %4	5,0 (elektrisch) 45,5 (Rohstoff)	282	231	(Bazzanella und Ausfelder 2017; Stork et al. 2018)
	Methanol-to-Aromatics (MTA)	Steamcracker mit erdölba-sierten Raffineriepro-dukten (Naphtha)	8-9	<0 bis > 100 %4	5,0 (elektrisch) 85,6 (Rohstoff)	282	231	(Bazzanella und Ausfelder 2017; Stork et al. 2018)
	Elektrische Steamcracker	Steamcracker mit erdölba-sierten Raffineriepro-dukten (Naphtha)	7-8	Bis zu 100 % der direkten Emissionen (Scope 1)	36 (energetisc h) 110 (Rohstoff)	425 (nur Austausch Ofen)	425	(van Delft und Kler 2017)
	Gasifizierung von Kunststoffabfällen mit anschließender Methanolsynthese	Steamcracker mit erdölba-sierten Raffineriepro-dukten (Naphtha)	6-7	<0 bis > 100 %5	15,7 (energetisc h) 29 (Rohstoff)	990	990	(Afzal et al. 2023)
Stahl	H ₂ -DRI + EAF	Hochofen-Route	7	Bis ~95 %	13	415 bis 10006	415 bis 10006	(Vogl et al. 2018; Fishedick et al. 2014; ASTIER et al. 1982; Arens und Vogl 2019);

Branche	Neues Verfahren	Referenz-Verfahren	TRL	THG-Minderung ggü. Ref [%]1	Spez. Energieverbrauch [GJ/t]	Spez. Investitionen [Euro/t Kapazität]1		Quellen
						2030	2045	
	PtG-DRI + EAF	Hochofen-Route	9	Bis ~95 %	13	415 bis 1000	415 bis 1000	Annahme wie H ₂ -DRI
Zement	CO ₂ -armer Zement (-30 %, hoher Belit-Anteil)	Portland Zement (Alit-basiert)	8-9	25-30 %	3,3	442	242	(Chan et al. 2019) http://www.aether-cement.eu/ (IEA 2018)
	CO ₂ -armer Zement (-50 %, Calcium-Silikat-Hydrat)	Portland Zement (Alit-basiert)	7	50 %	2,5	138	148	(Chan et al. 2019) (Stemmermann et al. 2010) http://www.celitement.de/ (IEA 2018)
	CO ₂ -armer Zement (-70 %, rekarbonisierend)	Portland Zement (Beton-Fertigteile)	8-9	30-70 %	3,2	188	98	(Chan et al. 2019) https://www.solidlife.eu/ (IEA 2018)
	Elektrifizierung Klinkerbrennen + CO ₂ -Abscheidung	Konventioneller Drehrohrofen	5-6	90 %	3,5	400	300	https://www.project-leilac.eu/leilac-pilot-plant
	Elektrisch beheizte Glaswanne (Flachglas)	Erdgas (Regenerativ-Brenner)	6-7	80 %	10	188	154	(Rehfeldt et al. 2020) (Pfeifer et al. 2011)
Glas	H ₂ -befeuerte Glaswanne (Flachglas)	Erdgas (Regenerativ-Brenner)	4-5	80 %	14	n. v.	n. v.	(Kopernikus-Geschäftsstelle, Projektträger Jülich 30.03.2021) (Neuwirth et al. 2022a)

1: Für die Modellrechnungen werden diskrete Annahmen zu den spezifischen Investitionen benötigt. Es ist zu beachten, dass Unsicherheiten bei diesen Werten groß sind und Angaben in der Literatur sich deutlich von realen Investitionen unterscheiden können.

2: Investitionen beziehen sich auf eine Modernisierung bestehender Anlagen, keinen vollständigen Neubau.

3: Annahme: Wasserstoff/PtG und Strombedarf wird mit erneuerbaren Energien gedeckt.

4: Je nach Herkunft und Verbleib des im Produkt gebundenen CO₂. In dieser Studie wird das benötigte CO₂ durch CCU aus prozessbedingten Emissionen der Kalk- und Klinkerherstellung gedeckt und in die Atmosphäre entlassen oder im Kreis geführt (verbleibende Emissionen werden weiter den nicht-metallischen Mineralien zugerechnet).

5: Der Prozess der Kunststoffabfall-Gasifizierung kann mehr CO₂-Emissionen verursachen als das herkömmliche Verfahren der Methanolsynthese, aber er reduziert die Emissionen in den vorgelagerten Ketten. Wenn dieser Prozess anstelle der Abfallverbrennung verwendet wird, verringert er auch die Emissionen, die sonst bei der Verbrennung anfallen würden.

6: Größenordnung von 1.000 Euro/t Rohstahlkapazität in mehreren Projektankündigungen in Deutschland genannt.

3.4.7 Brennstoffwechsel in Öfen und Dampferzeugung

Die Vermeidungsstrategie Brennstoffwechsel beschreibt den Wechsel von fossilen auf CO₂-neutrale Energieträger bei überwiegend gleichen technischen Anlagen und Verfahren. Je nach Branche, Verfahren und Technik ist Brennstoffwechsel mit wenig Aufwand und Investitionen verbunden, kann aber auch sehr umfangreichen Neubau von Anlagen verlangen. Entsprechend ist in einigen Bereichen eher von einem Prozesswechsel die Rede (siehe Abschnitt 3.4.6), wenngleich die Abgrenzung häufig nicht eindeutig ist. Techniken zum Brennstoffwechsel sind in FORECAST in einer Querschnittsperspektive für Dampferzeuger und Industrieöfen berücksichtigt.

Der Einsatz CO₂-neutraler Brennstoffe ist stark durch die Struktur der Wärmeerzeugung bestimmt. Industrieöfen benötigen häufig Temperaturen über 1000 °C, sehr hohe Energiedichten und sind im Design bereits auf den Einsatz bestimmter Energieträger (meistens Erdgas) ausgerichtet. CO₂-neutrale Alternativen wie Strom, Wasserstoff und PtG oder der Einsatz von Biomasse bzw. Biogasen sind in Zukunft möglich, spielen derzeit aber nur eine geringe Rolle. Dies ist häufig weniger auf technische Herausforderungen, als auf wirtschaftlich unattraktive Bedingungen zurückzuführen (Rehfeldt et al. 2020). Weitere Prozesse nutzen Wärme in Form von Dampf und Warmwasser. Hier ist die Wärmeerzeugung von der -nutzung räumlich durch das Medium getrennt und Wärmeerzeuger operieren weitgehend unabhängig vom jeweiligen Prozess. Während sich für die Wärmeerzeugung auf niedrigem Temperaturniveau bis etwa 150 °C auch Wärmepumpen (und ggfs. Solarthermie) eignen, sind relevante Technologien für die höheren Temperaturniveaus direktelektrische Elektrodenkessel und Wasserstoff- oder PtG-Brenner in Dampfkesseln²¹ und KWK-Anlagen.

Das geringere TRL und die große Spannbreite von direktelektrischen Industrieöfen entsteht durch die stärker ausgeprägte Heterogenität der technischen Anlagen (Pfeifer et al. 2011), die eng auf das jeweilige Produkt abgestimmt sind. Während einige Anlagen mit bestehender Technik elektrifiziert werden können (und zum Teil bereits sind²²), liegen für viele andere noch keinerlei Betriebserfahrungen vor und es ist unklar, ob die benötigte Produktqualität (z. B. bei Wärmebehandlungen) erreicht werden kann und wie der Prozess geführt werden muss. Dabei ist anzumerken, dass in diesem Fall geringe TRL vor allem formal durch die TRL-Systematik entstehen – ohne Pilot- oder Demonstrationsanlage kann die Anwendung nicht höher als TRL 4 bewertet werden. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Weiterentwicklung zwangsläufig lange Zeiträume in Anspruch nehmen muss. Die hier untersuchten Szenarien gehen davon aus, dass bei entsprechenden wirtschaftlichen Anreizen, wie sie in den O45-Szenarien bestehen, kurz- und mittelfristig Elektrifizierung auch in den verschiedenen Industrieöfen zur Anwendung gebracht werden kann. Technische Herausforderungen bestehen in einigen Anwendungen in der Erreichung der Energiedichte aktueller erdgasbefuerter Anlagen durch direkte Elektrifizierung. Für elektrische oder Wasserstoff-befeuerte Öfen, die nicht separat in Tabelle 15 aufgeführt sind, sondern als Querschnittstechnik modelliert werden, werden Fixkosten von im Mittel 2000 €/kW installierte thermische Leistung, 20 Jahre Lebensdauer und 6.000 Volllaststunden pro Jahr angenommen. Diese Mittelwerte basieren auf einer branchenspezifischen Analyse von über 30 einzelnen Anwendungen (Fleiter et al. 2023a). Es ist zu beachten, dass die Bandbreite und Heterogenität über die verschiedenen Anwendungen hinweg sehr hoch ist.

²¹ In Tabelle 16 in „Dampfkessel (flüssig, gasförmig“) zusammengefasst.

²² Zum Beispiel in der Kupferbearbeitung, in Härtereien oder Temperaturführung an Stahlflachprodukten (Banderwärmung).

Tabelle 16: Technologieannahmen Prozessdampf- und Warmwasser

Beispiel für eine Anlage mit 5 MW thermischer Leistung.

Gruppe	Technik	Investition in €/kW _{th}	Betriebs- kosten €/kW	Technische Lebens- dauer	Thermisch e Effizienz
KWK	BHKW (Erdgas, Biomasse)	500	10	25	41 %
	Erdgas-Gasturbine	450	18	25	40 %
	Erdgas-Gas- und Dampfturbine	1.528	46	25	40 %
	Dampfturbine (alle Energieträger)	800	24	40	59 %
	Brennstoffzelle	3.373	169	25	45 %
Kessel	Dampfkessel (flüssig, gasförmig)	76	3	25	92 %
	Dampfkessel (feste Brennstoffe)	162	3	25	92 %
	Dampfkessel (elektrisch)	76	1	25	97 %
Niedertemperatur	Erdgas-Wärmepumpe	449	4	20	170 %
	Kompressionswärmepumpe	449	4	20	283 %
	Fernwärme	76	1	40	100 %

Für die Modellierung des Brennstoffwechsels in der Dampferzeugung sind u. a. Annahmen zu Investitionen, Betriebskosten, Lebensdauer und Nutzungsgrad der unterschiedlichen Technologieoptionen nötig. Diese sind in Tabelle 16 für eine beispielhafte Anlage mit 5 MW thermischer Leistung zusammengefasst. Im Modell FORECAST wird berücksichtigt, dass sich die spezifischen Investitionen entsprechend der Anlagengröße deutlich ändern und bei kleineren Anlagen deutlich höher sind (siehe Abbildung 16).

Im Bereich der Niedertemperatur sind Wärmepumpen (Vorlauftemperatur >90 °C) mit hoher Leistung eine sehr relevante CO₂-neutrale Technologie, die die Dekarbonisierung der Warmwasser- und Teile der Dampferzeugung abdecken kann (Danish Energy Agency 2020). In aktuell verfügbaren Anlagen werden Temperaturbereiche bis etwa 150 °C und Leistungen bis 20 MW²³ erreicht (Arpagaus 2018). Das TRL wird auf 7 bis 9 geschätzt. Maßgebliche Hemmnisse für den breiten Einsatz sind wirtschaftlicher Natur (Verhältnis Erdgaspreis zu Strompreis), die bislang eine Hochskalierung für größere Leistungen verhindert haben. In den O45-Szenarien wird die Technologie als verfügbar und marktreif angenommen. Die tatsächliche Integration einer Wärmepumpe in konkrete industrielle Prozesse ist allerdings aufgrund der Bedeutung des Temperaturhubes auf die Effizienz höchst standortspezifisch. Die Umsetzung ist derzeit noch als Einzelprojekt anzusehen.

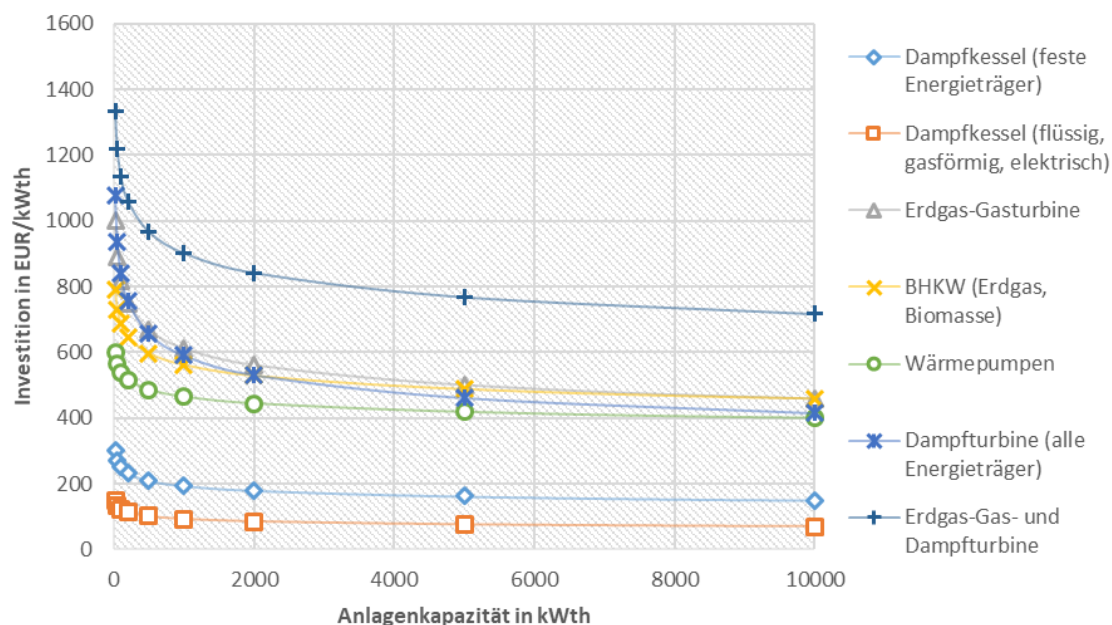
Demgegenüber weisen Elektrodenkessel eine weiter fortgeschrittene Marktposition auf. Sie sind als reguläres Produkt – obwohl verglichen mit fossilen Anlagen in geringen Stückzahlen – beziehbar

²³ Geringere Leistungsbereich zwischen 200 kW und 2 MW in den hohen Temperaturbereichen. Zum Vergleich: Leistungsbereiche von Erdgaskesseln liegen im mittleren zweistelligen MW-Bereich.

und decken Leistungsbereiche bis über 60 MW ab. Unter bestimmten Bedingungen unter Ausnutzung ihrer spezifischen Vorteile (Regelbarkeit, Effizienz, Eignung als Backsystem) sind sie bereits konkurrenzfähig mit niedrigen Volllaststunden (<500, (Danish Energy Agency 2020)). Sie werden daher als TRL 9 eingestuft. Auch Dampfkessel, welche Wasserstoff-Brenner nutzen, sind bereits in industrieller Größenordnung auf dem Markt verfügbar und werden mit TRL 9 eingeschätzt (Fleiter et al. 2023a).

Abbildung 16: Spezifische Investition verschiedener Dampferzeuger

In Abhängigkeit von der Anlagengröße.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

3.4.8 CO₂-Abscheidung, Transport und Speicherung

Die Szenarien folgen dem Grundsatz, den Einsatz von CCS möglichst zu minimieren und auf Bereiche mit besonders schwierig bzw. teuer vermeidbaren Emissionen zu begrenzen. Dies ist besonders der Fall bei den prozessbedingten Emissionen der Zement- und Kalkherstellung. Selbst wenn ambitionierte primäre Minderungsmaßnahmen getroffen werden, verbleiben hier substantielle Emissionsmengen (siehe Abschnitt 3.3.2). Gleichzeitig ist die Wirksamkeit von primären Vermeidungsmaßnahmen z. B. durch eine Umstellung auf Materialien mit geringerem CO₂-Fußabdruck in der Bauwirtschaft sehr unsicher. CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) oder Nutzung (CCU) kann hier einen Beitrag zur THG-Neutralität leisten.

Für einen langfristigen und nachhaltigen Umgang mit diesen abgeschiedenen CO₂-Mengen gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten: Zum einen stellt die Speicherung in geologischen Lagerstätten, beispielsweise ehemaligen und bereits ausgeschöpften Erdgasfeldern, eine Möglichkeit dar. Zum anderen wird CO₂ zukünftig in einer klimaneutralen Welt ein wichtiger Rohstoff, insbesondere für die industrielle Produktion von kohlenstoffbasierten Chemieprodukten. In beiden Fällen ist die langfristige Vermeidung des Eindringens des CO₂ in die Atmosphäre sicherzustellen und erfordert eine detaillierte Bilanzierung. Für die industrielle Nutzung von abgeschiedenem CO₂ als Rohstoff spielen insbesondere die Art und Nutzung der hergestellten Produkte sowie Produktlebensdauer und deren Entsorgung und Recyclingmöglichkeiten eine wichtige Rolle. Bedeutend für eine funktionierende Kohlenstoffbilanz sind hierbei eine möglichst verlustfreie Speicherung und

Kreislaufführung von fossilem CO₂ und gegebenenfalls Kompensierung durch Abscheidung von nicht-fossilem CO₂ oder Luftabscheidung (Direct Air Capture, DAC). Dabei ist nach aktuellem Stand der Technik anzunehmen, dass die Luftabscheidung insbesondere kurz- und mittelfristig nicht konkurrenzfähig zur Abscheidung an Punktquellen sein wird, wobei die zukünftige Entwicklung der Kosten der Luftabscheidung noch unsicher ist (Fasihi et al. 2019).

Insbesondere Methanol und High Value Chemicals (HVC, z. B. Ethylen) könnten über alternative Prozessrouten hergestellt werden, die in großem Umfang CO₂ als Rohstoff zusammen mit grünem Wasserstoff nutzen und so zu einer Kreislaufführung beitragen. Damit werden nicht nur Emissionen bei der Herstellung der genannten Produkte vermieden, sondern auch CO₂-Emissionen aus anderen Sektoren in großem Maßstab chemisch gebunden und CO₂ als Rohstoff genutzt. Statt wie bisher meist aus Erdgas, könnte Methanol aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid (CO) hergestellt werden, das durch Elektrolyse aus CO₂ synthetisiert wird. Eine mögliche Route zur Herstellung von HVCs ist die Methanol-to-Olefin(MtO)-Route (siehe Kapitel 3.3.3). Die Umstellung der HVC-Produktion auf die MtO-Route führt zu einem erhöhten Bedarf an Methanol als Zwischenprodukt. Dies erfordert einen großtechnischen Neubau von Methanolkapazitäten und führt zu einem hohen Wasserstoff- und CO₂-Bedarf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Bereitstellung des benötigten CO₂ eine entsprechende Infrastruktur konzipiert und aufgebaut werden muss, um CO₂-Quellen (Zement- und Kalkwerke) und -Senken (Chemiewerke und Raffinerien) zu verbinden und die benötigten Mengen bereitzustellen.

In Tabelle 17 sind die Technologieannahmen für eine CO₂-Infrastruktur zusammengefasst. Für den Neubau von CO₂-Transportleitungen sind nur wenige Informationen in der Literatur verfügbar und die spezifischen Kosten je km Pipeline-Neubau hängen von Faktoren wie dem Durchmesser und dem Aggregatzustand des zu transportierenden CO₂ ab. Im Mittelwert wird für die Kostenbewertung von 2,5 Mio. Euro/ km Leitungslänge ausgegangen. Dieser Wert ist höher als verfügbare Literaturwerte, kann aber als realistische Schätzung angesehen werden und wurde von Industrievertretern in der Größenordnung bestätigt. Die Umwidmung von bestehenden Erdgas-Leitungen kann deutlich günstiger sein, wenn technisch möglich. Da es jedoch große Unsicherheiten hinsichtlich der Konkurrenz zwischen CO₂, Erdgas und Wasserstoff um die Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes gibt, werden für das gesamte CO₂-Leitungsnetz die Kosten für einen Neubau angenommen. Mögliche Umwidmungen können die nötigen Investitionen entsprechend deutlich senken.

Als laufende Kosten für den CO₂-Transport wurden 5 €/t CO₂ angenommen (ZEP 2011).²⁴ Die Kosten zur Abscheidung des benötigten CO₂ aus den Rauchgasen der Zement- und Kalköfen wurden aus Kuramochi et al. (2012) abgeleitet. Diese geben für die nahe Zukunft für die Zementindustrie Werte von 160 €/t Kapazität und für Langzeitbetrachtungen eine Degression der Kosten auf 80 €/t Kapazität. an. Für die Speicherung wurden im Mittel 10 €/t CO₂ angenommen (ZEP 2011), was eher eine langfristige Sicht auf entsprechende Kosten ist.

²⁴ Die angenommene Größenordnung bei den Transportkosten deckt sich auch mit anderen Studien. Hinsichtlich der Kosten zum CO₂-Transport werden in ZEP 2011 für eine CO₂-Pipeline (Onshore) mit einer maximalen Kapazität von 20 Mt/a Kosten je nach zu transportierender Distanz angegeben. Für eine Länge von 1.500km entsprechen diese 11,27 €/t CO₂. Diese Größenordnung wird auch von Rubin et al. 2015 bestätigt.

Tabelle 17: Angenommene Parameter CCU/SCO₂-Abscheidung, Transport und Speicherung.

	Wert	Einheit
Kosten CO₂-Abscheidung bei Zement- und Kalkwerken¹	120	€/t CO ₂ Kapazität
Spez. Investitionen Transportnetz - Neubau	2,5	Mio. €/km
Spez. Betriebskosten Transport	5	€/t CO ₂
Spez. Kosten Speicherung (Annahme: Offshore)	10	€/t CO ₂
Spez. Energieverbrauch der Abscheidung	0,9	GJ/t CO ₂
Wirksamkeit der Abscheidung	80	%

1: Spez. Investitionen bezogen auf die jährliche Kapazität

4 Ergebnisse O45-Orientierungsszenarien

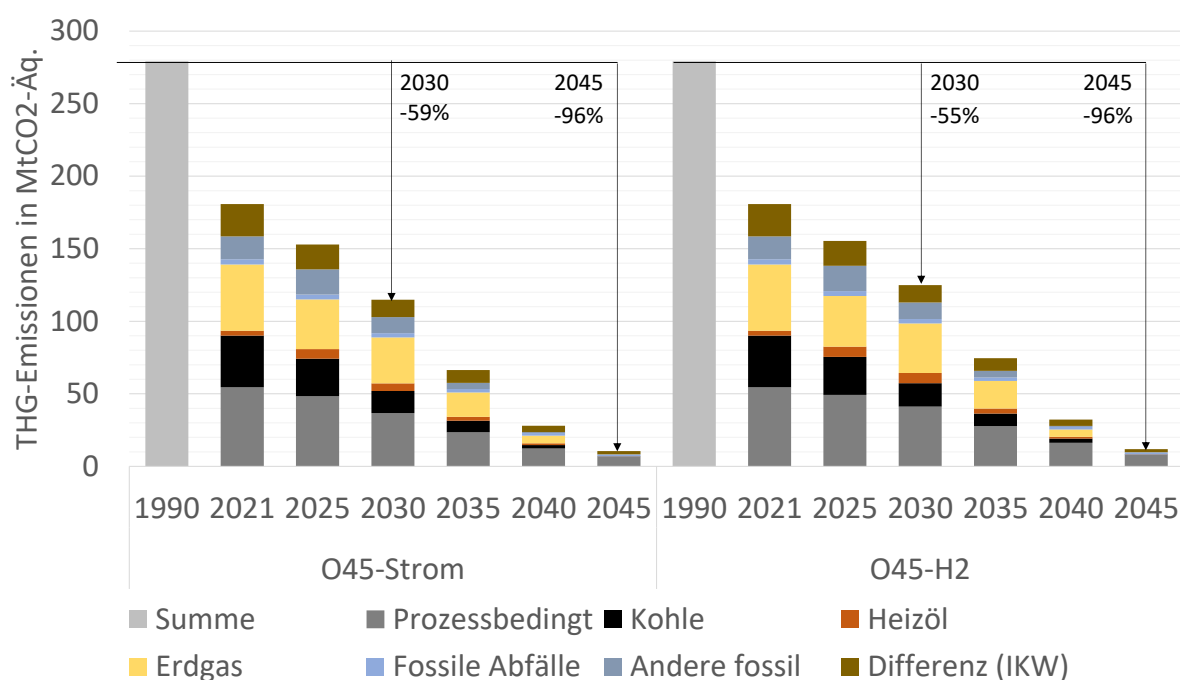
4.1 Treibhausgasemissionen

4.1.1 Übersicht

In beiden O45-Szenarien (O45-Strom, O45-H₂) wird gemäß Szenariodefinition mit 96 % Minderung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors das Ziel der weitgehenden Treibhausgasneutralität bis 2045 erreicht (Abbildung 17). Es verbleiben geringe energiebedingte Mengen aus der Verbrennung fossilen Abfalls (~1 Mt_{CO₂-Äq.}) sowie prozessbedingte Emissionen (7-8 Mt_{CO₂-Äq.}) aus verschiedenen kleinteiligen Quellen, darunter Produktverwendung, Elektronik, chemische Produkte (Lösungsmittel, Ruß, Schmierstoffe) und Keramik und Glas²⁵. Aus Zement- und Kalkwerken werden 11 bis 12 Mt CO₂ im Jahr 2045 abgeschieden.

Abbildung 17: Entwicklung der resultierenden Treibhausgasemissionen des Industriesektors

Emissionsbilanzierung nach KSG: Prozessbedingte Emissionen kalibriert auf NIR 2021; energiebedingte Emissionen kalibriert auf AGEB je Energieträger. Daraus entstehende Differenz (maßgeblich Industriekraftwerke (IKW)) separat ausgewiesen. Abgeschiedenen Emissionen aus Zement- und Kalkwerken bereits abgezogen. Siehe Abschnitt 2.3.



Das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2030 (<118 Mt_{CO₂-Äq.}) wird in O45-Strom (115 Mt_{CO₂-Äq.}) erreicht. Das Szenario O45-H₂ (125 Mt_{CO₂-Äq.}) verfehlt das Sektorziel 2030 nach KSG um 7 Mt_{CO₂-Äq.}. Hauptgrund für diese leichte Verzögerung ist die späte Verfügbarkeit von Wasserstoff, der in O45-H₂ eine größere Rolle in der Dekarbonisierung der Prozesswärme einnimmt. O45-Strom kann hingegen auf früh verfügbare Technologien (Wärmepumpen, Elektrodenkessel, Teillektrifizierung von Industrieöfen) zugreifen, die konsistent mit dem langfristig im Szenario

²⁵ In diesen Anwendungen erscheint die Nutzung von CCU/S deutlich weniger attraktiv oder ist nicht möglich. Die Ergebnisse weisen darüber hinaus geringfügige Restmengen aus fossilen Energieträgern aus (<0,1 Mt_{CO₂-Äq.}). Diese sind modell- und rechenbedingt. Sie haben inhaltlich keine Bedeutung.

angestrebten Technologiepfad sind. Aufgrund von Überträgen vergangener Jahre ist das budgetbezogene Sektorziel entsprechend des aktuellen Projektionsberichts (Harthan et al. 2024) allerdings auf 121,6 MtCO₂-Äq. angestiegen. Für die im aktuell gültigen Klimaschutzgesetz (KSG) angewendeten Budgetbetrachtung (2021-2030) bedeutet das: 2030 übererfüllt O45-Strom das Sektorziel der Industrie, welches ein über den Zeitraum bis 2030 kumuliertes Budget von 1517 MtCO₂-Äq. vorsieht (O45-Strom: 1494 MtCO₂-Äq.). O45-H₂ verfehlt diese Zielmarke (1534 MtCO₂-Äq.). Die Abweichungen liegen im zu erwartenden Bereich der Unsicherheit und beide Szenarien zeigen nach 2030 eine weitere – sich in vielen Bereichen beschleunigende – Reduktion der Treibhausgasemissionen, so dass O45-H₂ bereits im Jahr 2031 (112 MtCO₂-Äq.) die Jahresemissionsmenge von 2030 unterschreitet und bis 2037 ein (virtuelles da nicht im KSG definiertes) Budget einer linearen Reduktion einhält – den Rückstand auf einen denkbaren Zielpfad somit aufholt. Bis zum Jahr 2045 verbleiben in beiden Szenarien lediglich kleinere Quellen prozessbedingter Treibhausgasemissionen.

Im Bereich der energiebedingten Treibhausgasemissionen sind maßgebliche Treiber für den Rückgang die Umstellung der Primärstahlerzeugung, die Dekarbonisierung des Energiebedarfs in Dampferzeugung und Industrieöfen sowie – im Übergang²⁶ – steigende Material- und Energieeffizienz und verstärkte Kreislaufwirtschaft. Bis 2030 sinken durch diese Einflüsse die energiebedingten Treibhausgasemissionen auf 64 % (O45-Strom) bis 69 % (O45-H₂) des Niveaus von 2021 – bis 2040 auf 11 % (beide Szenarien). Insbesondere die Treibhausgasemissionen aus der Kohlenutzung sinken bis 2030 in beiden Szenarien deutlich auf 43-45 % der kohlebedingten Treibhausgasemissionen von 2021 – eine direkte Folge der geringeren Hochofenaktivität (siehe 3.3.1 und 4.2.2.1). Hingegen entstehen in O45-Strom 2030 noch 69 % (O45-H₂: 75 %) der Treibhausgasemissionen von 2021 aus der Erdgasnutzung – dies vor allem durch die Erzeugung von Prozesswärme als Dampf und in Industrieöfen über viele Branchen verteilt ist (siehe 4.2.1.2).

Im Bereich der prozessbedingten Treibhausgasemissionen sind maßgebliche Treiber für den Rückgang die Abscheidung und Nutzung oder Speicherung von CO₂ aus der Zement- und Kalkherstellung, die Umstellung der Ammoniakproduktion auf grünen Wasserstoff (O45-H₂) bzw. der Import von grünem Ammoniak (O45-Strom), die Umstellung der Primärstahlerzeugung²⁷, und das reduzierte Inverkehrbringen und Verwenden von Fluorkohlenwasserstoffen (FKW). Bis 2030 sinken durch diese Einflüsse die prozessbedingten Treibhausgasemissionen auf 67 % (O45-Strom) bis 75 % (O45-H₂) des Niveaus von 2021 – bis 2040 auf 22 % (O45-Strom) bis 30 % (O45-H₂)²⁸.

4.1.2 CO₂-Abscheidung, Nutzung und Speicherung

Alle Szenarien berücksichtigen die Abscheidung von CO₂ aus der Zement- und Kalkindustrie, die Nutzung in der Chemieindustrie maßgeblich zur Herstellung von High Value Chemicals (HVC, z. B. Ethylen) als Vorprodukt für Kunststoffe (CCU) und die Speicherung in Offshore-Lagerstätten (CCS). Der CO₂-Bedarf der Chemieindustrie wird in beiden Szenarien über die Abscheidung von Emissionen aus Zement- und Kalkwerken sowie Müllverbrennungsanlagen (in denen auch

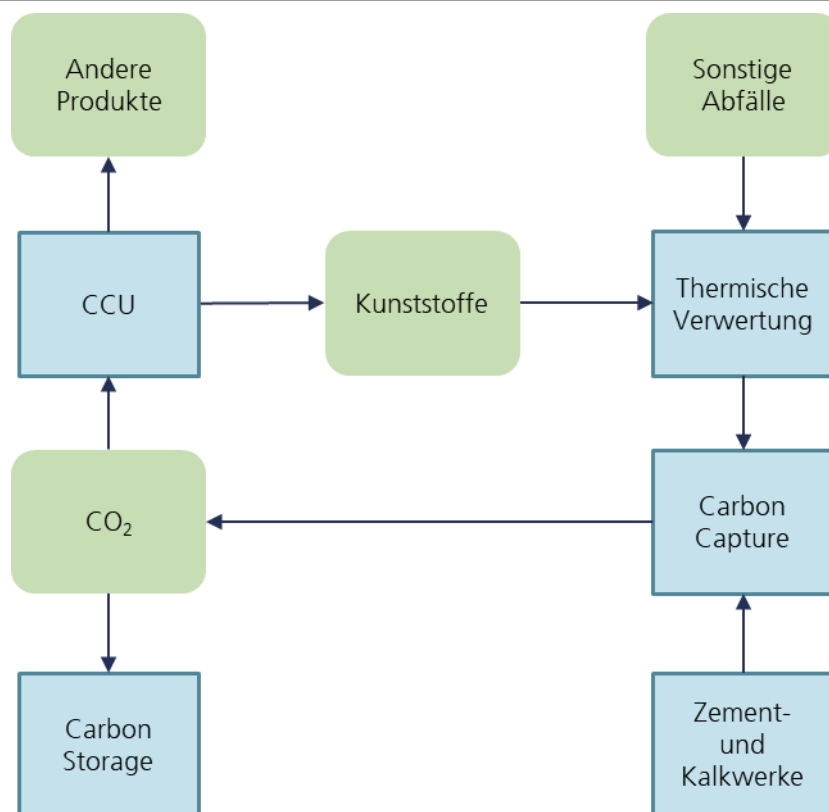
²⁶ Im Zieljahr verringern Kreislaufwirtschaft sowie Material- und Energieeffizienz Treibhausgasemissionen nur noch in geringem Umfang, da keine fossilen Energieträger mehr verwendet werden. Vorher tun sie das noch. Aber auch in einem weitgehend dekarbonisierten Industriesektor erbringen diese Nachhaltigkeitsstrategien wichtige Beiträge zum Energiesystem, in dem sie den Bedarf an hochwertigen Energieträgern (Strom, Wasserstoff) senken. Und damit die Angebotsseite entlasten.

²⁷ In der Inventarlogik werden relevante Teile der Treibhausgasemissionen der Hochofenroute als prozessbedingt kategorisiert.

²⁸ Der Unterschied entsteht vor allem durch die Szenariodefinition, dass in O45-H₂ langfristig Ammoniak hergestellt (und ab 2030 langsam auf wasserstoffbasierte Herstellung) umgestellt wird. Hingegen wird in O45-Strom angenommen, dass die Ammoniakproduktion nach 2025 schnell und umfassend zurückgefahren wird. Dadurch sind in O45-H₂ länger relevante Mengen prozessbedingter Treibhausgasemissionen aus den Anteilen konventioneller (erdgasbasierter) Ammoniakproduktion vorhanden.

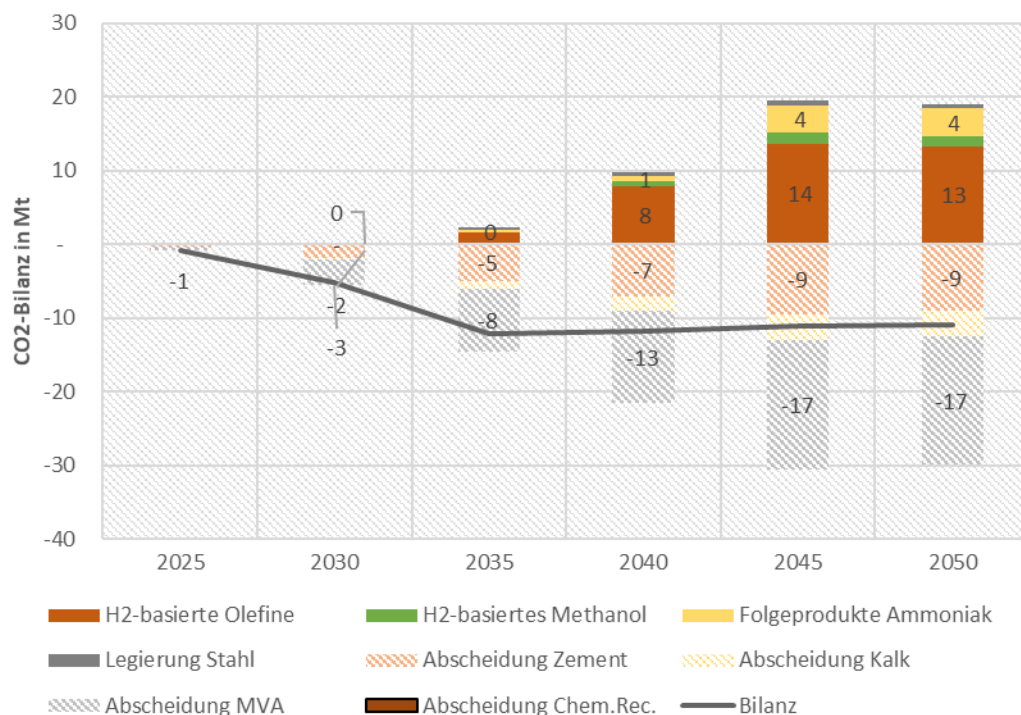
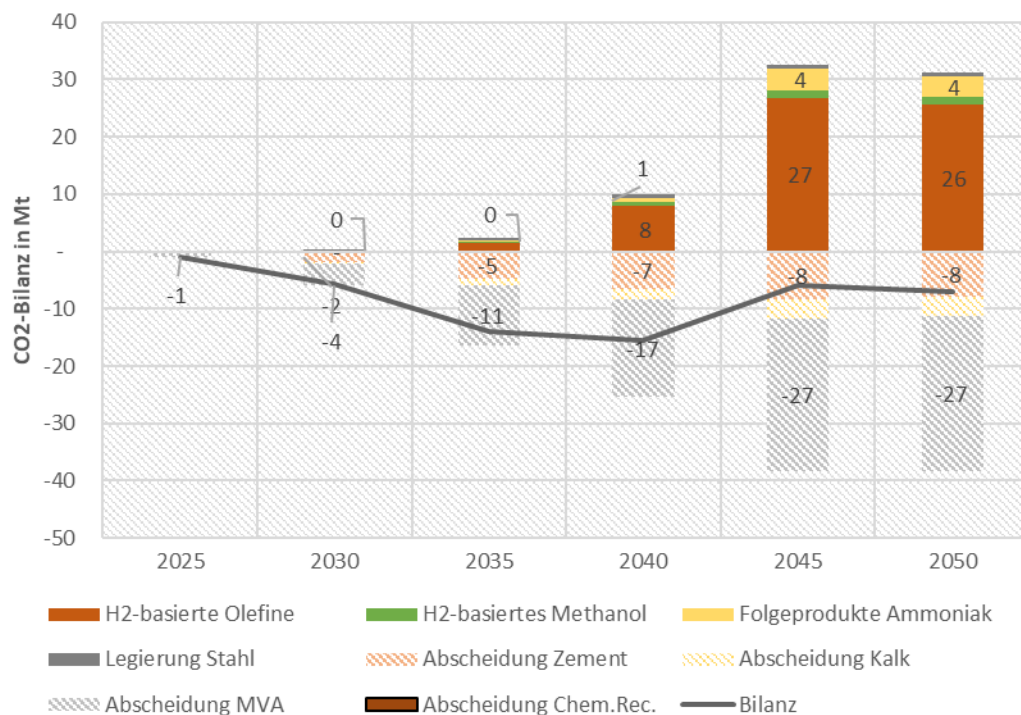
Kunststoffabfälle verbrannt werden) gedeckt – und somit ein beträchtlicher Teil²⁹ des prozessbedingten Kohlenstoffs im Produktkreislauf gespeichert. Da dieser Speicher nicht beliebig groß ist, wird nicht genutzter Kohlenstoff als CO₂ offshore gespeichert. Alle O45-Szenarien benötigen somit ein umfassendes CO₂-Leitungsnetz.

Abbildung 18: Schematische Darstellung des CO₂-Kreislaufs



Die resultierende zeitliche Entwicklung der Emissionen sowie des Hochlaufs der CO₂-Abscheidung ist für O45-Strom in Abbildung 19 und für O45-H₂ in Abbildung 20 dargestellt. Die Szenarien zeigen einen jährlichen CO₂-Bedarf von 19-31 Mt im Jahr 2045 – diese Menge wird vor allem durch die angenommene inländische Produktion wasserstoffbasierter Grundstoffchemikalien bestimmt. Allein zur Herstellung von HVCs über die MtO-Route werden Mengen zwischen 14 und 27 Mt_{CO2} benötigt. Als Quellen für das benötigte CO₂ reichen die verbleibenden Emissionen aus Kalk- und Zementwerken von 12 Mt_{CO2} bis 13 Mt_{CO2} nicht aus. Als zusätzliche Quelle ist die Abscheidung und Nutzung aus der Müllverbrennung berücksichtigt. Mit 17-27 Mt_{CO2} verbleibender CO₂-Emissionen kann sie zum Schließen des Kohlenstoffkreislaufs beitragen („thermische Verwertung“ in Abbildung 18). Hohe Unsicherheiten gibt es bei der Frage, welche Rolle das Kunststoffrecycling in Zukunft einnimmt. In diesem Konzept ist der Kreislaufschluss unter Berücksichtigung von Entsorgung, Lebensdauer und Verlusten sowie Speicherung eine Bedingung zur langfristigen CO₂-Neutralität von CCU.

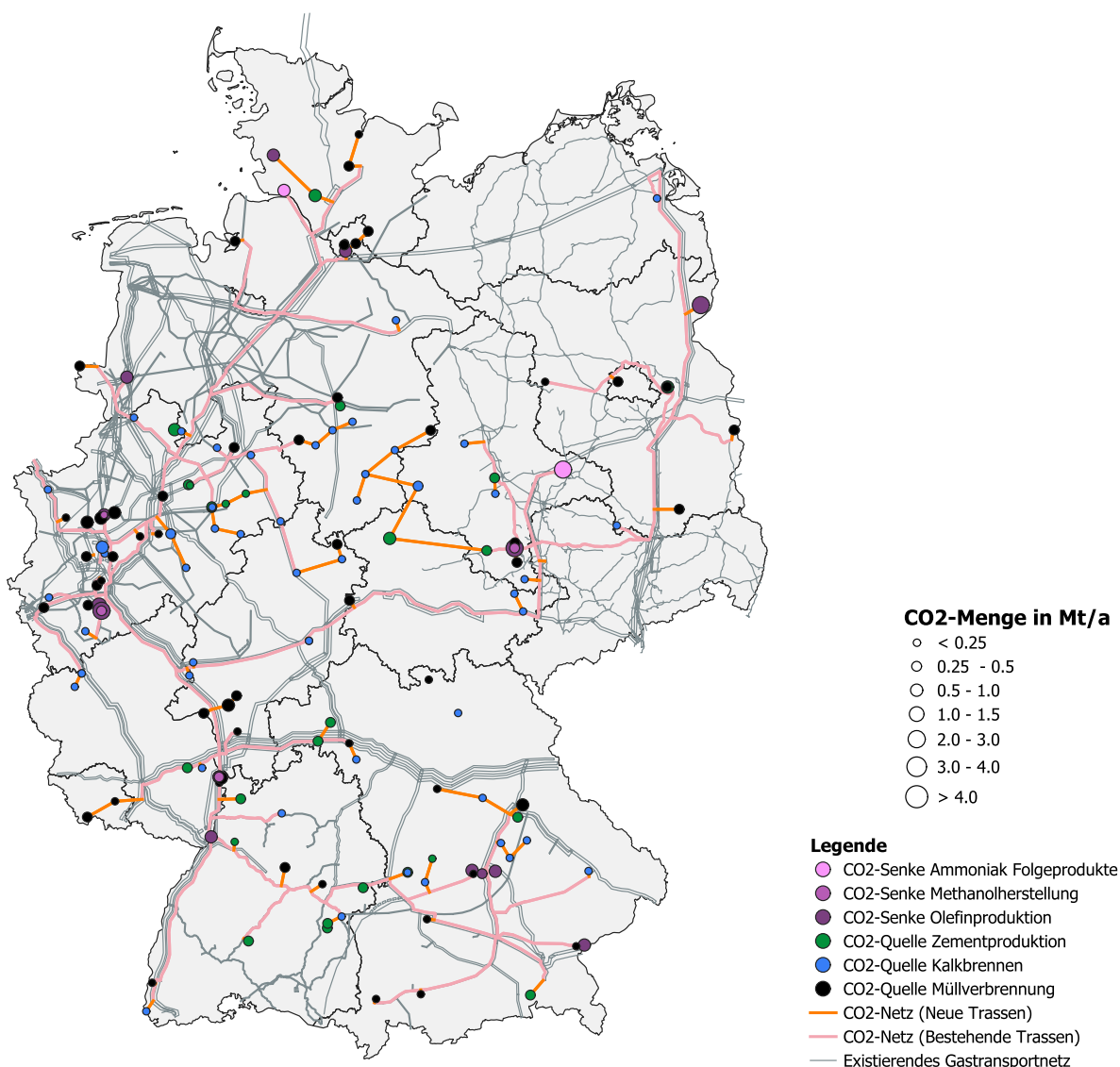
²⁹ Es lassen sich für 2045 Abschätzungen in der Größenordnung von 3,5 bis 4,5 Mt Kohlenstoff treffen (etwa 35 % des Gesamtumschlages). Im Zuge der im weiteren Verlauf steigenden Sättigung mit Kohlenstoff aus CCU im Produktumlauf kann dies bis auf etwa 9 Mt Kohlenstoff (100 %) ansteigen.

Abbildung 19: Entwicklung des CO₂-Bedarfs und des abgeschiedenen CO₂ in O45-Strom**Abbildung 20: Entwicklung des CO₂-Bedarfs und des abgeschiedenen CO₂ in O45-H₂**

Für das Jahr 2045 skizziert Abbildung 21 einen möglichen Leitungsverlauf des CO₂-Netzes unter Berücksichtigung der bestehenden potenziellen Anbieter und Nachfrager dar – ohne als Netzplanung verstanden werden zu können. Für den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur ist ein kompletter Neubau angenommen, da Konkurrenz zum Bedarf an Erdgas- und Wasserstoffinfrastruktur sehr unsicher ist. Generell folgen die Pipelines des CO₂-Netzes dennoch

den Trassen des heutigen Erdgastransportnetzes. Die Darstellung ist nicht als Analyse zu den Projektionen einzelner Standorte und eines Detailnetzes zu verstehen, sondern zeigt den Bedarf einer solchen Infrastruktur aufgrund der breiten regionalen Verteilung und erlaubt eine Schätzung der Systemkosten. Die CO₂-Senken bilden die heutigen Raffinerie- und Chemiestandorte ab. Auch bei Kalk (52 Standorte), Zement (32 Standorte) und Müllverbrennung (55 Standorte) sind die heutigen Standorte berücksichtigt ohne Annahmen zu räumlichen Verschiebungen, Neugründungen oder Schließungen zu treffen. Der starke Ausbau neuer Methanolkapazitäten zur Deckung des Bedarfs der MtO-Prozessroute erfolgt an den 14 Standorten der heutigen Methanolherstellung und Steamcracker (Raffinerien und Chemieparcs). Die Topologie des möglichen CO₂-Netzes wird in Abbildung 21 für das Szenario O45-Strom gezeigt. Die räumliche Verteilung sieht für das Szenario O45-H₂ nahezu identisch aus, wobei sich die Mengen aufgrund des geringeren Recyclings und verstärkter Nutzung der MtO-Route verschieben.

Abbildung 21: Mögliches CO₂-Netz im Jahr 2045 inkl. Quellen und Senken für O45-Strom



Für die überschlägige Schätzung der Gesamtlänge des Leitungsnetzes wurden entsprechend der Karte in Abbildung 21 für den Neubau von Leitungen die direkten Verbindungen zwischen Standorten gewählt. Auf Grundlage obiger Annahmen ergibt sich eine Leitungslänge von rund 6000 km, wobei davon etwa 4.500 km entlang bestehender Erdgastrassen verlaufen. Bei der

Berechnung der entstehenden Kosten ist ein kompletter Neubau angenommen. Eine Umwidmung eines Teiles der Leitungen würden die Kosten entsprechend senken. Um eine höhere Aussagekraft über eine realistische Netzlänge zu erhalten, sind detaillierte Netzplanungen notwendig.

Tabelle 18: Mengenabschätzungen CCU/S und geschätzte Länge eines möglichen CO₂-Netzes im Jahr 2045

	Einheit	O45-Strom	O45-H ₂
CO ₂ -Bedarf	Mt CO ₂ /a	19	31
CO ₂ -Abscheidung aus Zement- und Kalkwerken (prozessbedingt)	Mt CO ₂ /a	12	11
CO ₂ -Abscheidung aus Müllverbrennungsanlagen	Mt CO ₂ /a	17	27
Pipeline Länge	km	6.000	6.000

4.1.3 Prozessbedingte Treibhausgasemissionen

In beiden O45-Szenarien werden prozessbedingte Treibhausgasemissionen auf Prozess- bzw. Produktebene berechnet und den Quellkategorien des Nationalen Inventarberichts zugeordnet. Diese Aufteilung ist nicht immer – z. B. bei der Zuordnung der Treibhausgasemissionen der Stahlherstellung – eindeutig. Unter Berücksichtigung der Besonderheiten der Bilanzierung können aber Entwicklungspfade der prozessbedingten Treibhausgasemissionen auf hohem Detailgrad angegeben werden (Tabelle 19). Darin enthalten sind im Startjahr 2021 große Emissionsquellen der nichtmetallischen Mineralien (Zement: 13,6 Mt_{CO₂-Äq.} und Kalk: 4,5 Mt_{CO₂-Äq.}), Chemie (Ammoniak: 4,0 Mt_{CO₂-Äq.}) und Metalle (Stahl: 16,4 Mt_{CO₂-Äq.}) und viele weitere kleine Quellen³⁰, die in Summe 2021 etwa 5 Mt_{CO₂-Äq.} ausmachten. Hinzukommen – im Rahmen der Inventarlogik – Treibhausgasemissionen aus Produktverwendung³¹, die der Industrie zugerechnet werden (2021: 10,6 Mt_{CO₂-Äq.}). Im Szenarioverlauf werden insbesondere die großen Quellen durch eine Mischung aus Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Prozesswechsel adressiert – in 2045 summieren sich die Treibhausgasemissionen dieser ehemals großen Quellen (Zement, Kalk, Ammoniak, Eisen und Stahl) auf nur noch 12,7 Mt_{CO₂-Äq.}. Durch CCU/S der Treibhausgasemissionen aus der Zement- und Kalkproduktion werden diese bilanziell ausgeglichen³².

Die 2045 verbleibenden Treibhausgasemissionen der anderen Quellen in Höhe von 6,5 Mt_{CO₂-Äq.} sind bestimmt durch die Verwendung von Lösungsmitteln und prozessbedingten Treibhausgasemissionen aus der Glas- und Keramikherstellung (~3 Mt_{CO₂-Äq.}) sowie weiteren Quellen aus Metallen, Chemie sowie Produktverwendung und Elektronik. Viele dieser ursprünglich "kleinen" Quellen sind in der Szenariorechnung nicht mit Vermeidungsstrategien hinterlegt (mit "*" markiert). Sie sind nicht notwendig unvermeidbar, stellen aber besondere Herausforderungen dar.

Die Entwicklung ist in beiden Szenarien weitgehend ähnlich, in Tabelle 19 wird nur O45-Strom dargestellt. Ein relevanter Unterschied besteht in mittelfristig relevanten prozessbedingten Treibhausgasemissionen aus der Ammoniakproduktion in O45-H₂³³.

³⁰ Verschiedene Nicht-Eisen-Metalle (1,1 Mt_{CO₂-Äq.}), Chemie (2,5 Mt_{CO₂-Äq.}) sowie Glas und Keramik (1,7 Mt_{CO₂-Äq.}).

³¹ Unter anderem Kältemittel aus Kühlsystemen und Klimaanlage, Feuerlöscher, Lösungsmittel.

³² Hier nicht dargestellt, siehe 4.1.2.

³³ Ergänzend zu Tabelle 19: 2030: 4,1 Mt_{CO₂-Äq.}, 2035: 3,8 Mt_{CO₂-Äq.}, 2040: 3,2 Mt_{CO₂-Äq.}.

Tabelle 19: Prozessbedingte Treibhausgasemissionen in O45-Strom

Bezeichnungen in Klammern geben Quellkategorie gemäß Inventarbericht an. Quellkategorien ohne im Szenario abgebildete Vermeidungsstrategie sind mit "*" markiert – diese sind konstant gehalten oder lediglich an der Produktionsaktivität skaliert. Angaben in Mt_{CO₂-Äq.} Angaben bei Zementklinker und Kalk: vor CO₂-Abscheidung und Speicherung oder Nutzung (CCU/S).

Sektor	Produktgruppe	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Nichtmetallische Mineralien	Zementklinker (2.A.1)	13,6	11,9	12,9	11,8	10,8	9,7
	Kalk (2.A.2)	4,5	3,5	4,2	3,5	3,2	3,0
	*Glas (2.A.3)	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
	*Keramik (2.A.4a)	0,8	0,7	0,8	0,7	0,6	0,5
Chemie	Ammoniak (2.B.1)	4,0	3,4	4,1	3,8	3,2	0,0
	Salpetersäure (2.B.2)	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0
	Adipinsäure (2.B.3)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	*Carbid (2.B.5)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	*Soda ash (2.B.7)	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4
	*Petrochemie und Ruß (2.B.8)	1,4	1,2	1,5	1,5	1,4	1,4
	*Fluorchemikalien (2.B.9)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Stahl (Teil von 2.C.1)	16,4	17,4	10,4	5,8	0,0	0,0
	*Eisenlegierungen (2.C.2)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Metalle	Aluminium (2.C.3)	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8
	*Magnesium (2.C.4)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	*Blei (2.C.5)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	*Zink (2.C.6)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	*Schmierstoffe (2.D.1)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Produktverwendung und Elektronik	*Paraffinwachs (2.D.2)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	*Lösungsmittel NMVOC (2.D.3)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
	FKWs (2.F)	8,0	6,2	3,9	1,2	0,0	0,0
	*Elektronik (2.E.1)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	*Andere Produktverwendung (2.G)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	*Andere (2.H)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	SUMME in Mt_{CO₂-Äq.}	54,6	49,5	43,3	33,7	24,7	20,0

4.2 Energienachfrage

4.2.1 Übersicht

Die resultierende Energienachfrage des Industriesektors ist in Abbildung 22 im Szenariovergleich gezeigt. Sie umfasst sowohl den Endenergieverbrauch wie auch den stofflichen Einsatz von Energieträgern in der (Petro-)chemischen Industrie.

Der gesamte Energieeinsatz sinkt bis 2045 in beiden O45-Szenarien leicht von 996 TWh (2021) auf 898 TWh (O45-H₂) bzw. 888 TWh (O45-Strom) – trotz einer angenommenen steigenden Wertschöpfung. Durch Energie- und Materialeffizienz sowie Kreislaufwirtschaft sinkt der Energiebedarf bis 2040 stärker. Abnehmendes Effizienzpotential, neue Verbraucher (z. B. energieintensive Batteriefabriken, Verfahren wasserstoffbasierter Chemie) lassen ihn bis 2045 stagnieren.

Der Energiebedarf differenziert sich in den O45-Szenarien gemäß der jeweilig namensgebenden Schwerpunktsetzung. Dennoch gilt: In beiden Szenarien steigt der Einsatz von Strom deutlich und Wasserstoff wird in beiden Szenarien zum zweiten zentralen Energieträger für die Versorgung der (nahezu) klimaneutralen Industrie.

Im Detail bedeutet das:

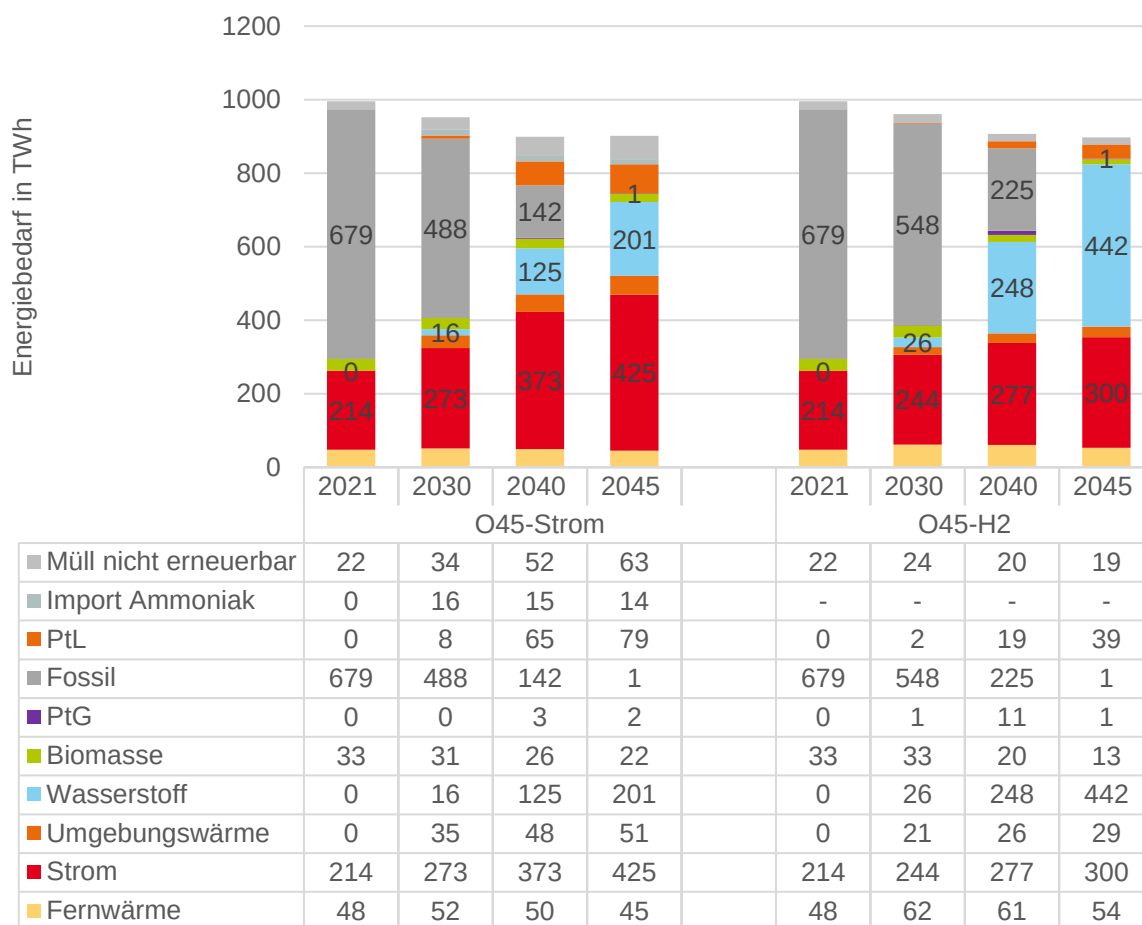
In O45-Strom steigt der Strombedarf von 2021 (214 TWh) bis 2030 auf 273 TWh und 2045 auf 425 TWh – also um 98 % – an. Hinzu kommt die Nutzung von 201 TWh Wasserstoff (davon 86 TWh stofflich) und von 80 TWh synthetischen Kohlenwasserstoffen (stofflich), außerdem 56 TWh Kunststoffabfälle im chemischen Kunststoffrecycling (siehe dazu Abbildung 35). Ergänzt wird der Endenergiebedarf durch einen überwiegend konstanten Sockel Fernwärme (2045: 45 TWh), sinkende Biomassenutzung (2045: 22 TWh), geringfügige energetische Nutzung von Abfällen (8 TWh) und deutlich vergrößerte Nutzung von Umgebungswärme in Wärmepumpen (2045: 51 TWh). In Summe sind dadurch >85 % des Energiebedarfs durch direkt oder indirekt strombasierte Technologien gedeckt³⁴. In O45-Strom ist ergänzend der durch die rückläufige inländische Produktion notwendige Import von Ammoniak angegeben (2045: 14 TWh), um die Vergleichbarkeit der beiden Szenarien herzustellen.

In O45-H₂ steigt der Strombedarf von 2021 (214 TWh) bis 2030 erheblich, allerdings etwas weniger stark, auf 244 TWh und 2045 auf 300 TWh – also um 40 % – an. Hinzu kommt 2045 die Nutzung von 442 TWh Wasserstoff (davon 181 TWh stofflich) und 40 TWh synthetische Kohlenwasserstoffe (stofflich). Ergänzt wird der Endenergiebedarf durch einen wachsenden Sockel Fernwärme (2045: 54 TWh), sinkende Biomassenutzung (2045: 16 TWh), geringfügige energetisch Nutzung von Abfällen (8 TWh) und vergrößerte Nutzung von Umgebungswärme in Wärmepumpen (2045: 13 TWh). In Summe sind dadurch 90 % des Energiebedarfs durch direkt oder indirekt strombasierte Energieträger gedeckt.

³⁴ Diese Angabe (ebenso jene zu O45-H₂) beinhaltet sämtliche stofflich verwendeten Kohlenwasserstoffe, direkte Stromnutzung, Wasserstoff und Umgebungswärme. Die Fernwärme kann potenziell auch strombasiert erzeugt werden – dies wird im Industriemodell nicht definiert.

Abbildung 22: Resultierender Energieverbrauch im Industriesektor

Dargestellt ist die Summe aus Endenergieeinsatz nach AGEB-Definition und stofflichem Energieträgereinsatz.

**4.2.1.1 Endenergiebedarf (ohne stoffliche Nutzung)**

Im Folgenden wird der reine Endenergiebedarf ohne die stoffliche Nutzung von Energieträgern betrachtet (siehe Abbildung 23).³⁵ In Summe verringert sich der Endenergiebedarf bis zum Jahr 2045 in beiden Szenarien von 724 TWh (2021) auf etwa 665 TWh. Energie- und Materialeffizienzerbesserungen überkompensieren das angenommene Wirtschaftswachstum.

Der unterschiedliche Grad der Elektrifizierung (O45-Strom: 64 %, O-H₂: 45 %, 2021: 30 %) bildet ein markantes Unterscheidungskriterium. In dem geringer elektrifizierten Szenario O45-H₂ wird werden anstatt Strom etwa 130 TWh zusätzlich für die Bereitstellung von Prozesswärme durch Wasserstoff genutzt. Damit nehmen Gase dort eine gegenüber 2021 bilanziell vergleichbare Rolle ein (260 TWh gegenüber 230 TWh in 2021) – mit deutlich verschobenen Anwendungen (siehe dazu auch Abbildung 26 bis Abbildung 29). Die Rolle von Erdgas als in 2021 wichtigsten Energieträger der Prozesswärmeerzeugung wird in O45-H₂ teilweise, in O45-Strom überwiegend durch Elektrifizierung übernommen. Wichtige Anwendungsfelder von Wasserstoff sind die Direktreduktion in der Stahlindustrie (ersetzt Kohle), die Bereitstellung von Prozesswärme auf hohen Temperaturniveau und die stoffliche Nutzung (ersetzt flüssige fossile Energieträger). Fossile Energieträger – insbesondere Kohle – werden in beiden Szenarien bis 2040 weitgehend ersetzt, maßgeblich getrieben durch die Umstellung der Rohstahlerzeugung.

³⁵ Die Differenz der beiden Darstellungen – die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie – ist in Abbildung 35 dargestellt.

Im Rahmen dieser Szenarien (und in Anlehnung an vorhergehende T45-Szenarien) kann die Struktur des Endenergiebedarfs 2045 folgendermaßen beschrieben werden: Es existiert eine robuste Bedarfsstruktur von etwa 300 TWh Strom, 110 TWh Gase und 120 TWh andere Energieträger (Biomasse, Fern- und Umgebungswärme, Müll). Diese wird je nach Szenario durch zusätzliche ~ 100 TWh Strom oder Wasserstoff in der Prozesswärmeerzeugung ergänzt.

Abbildung 23: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Industriesektor

Dargestellt ist der Endenergieeinsatz nach AGEB ohne stofflichen Energieträgereinsatz.

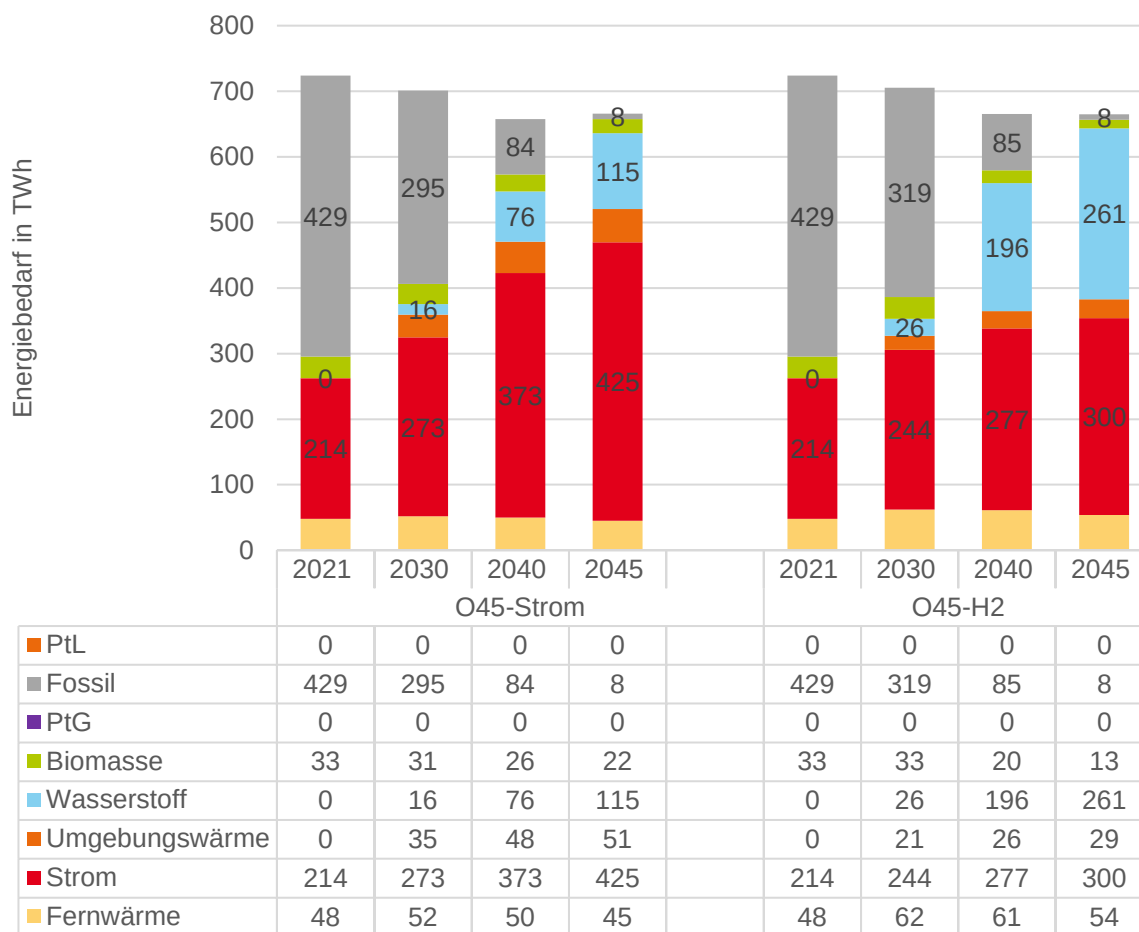
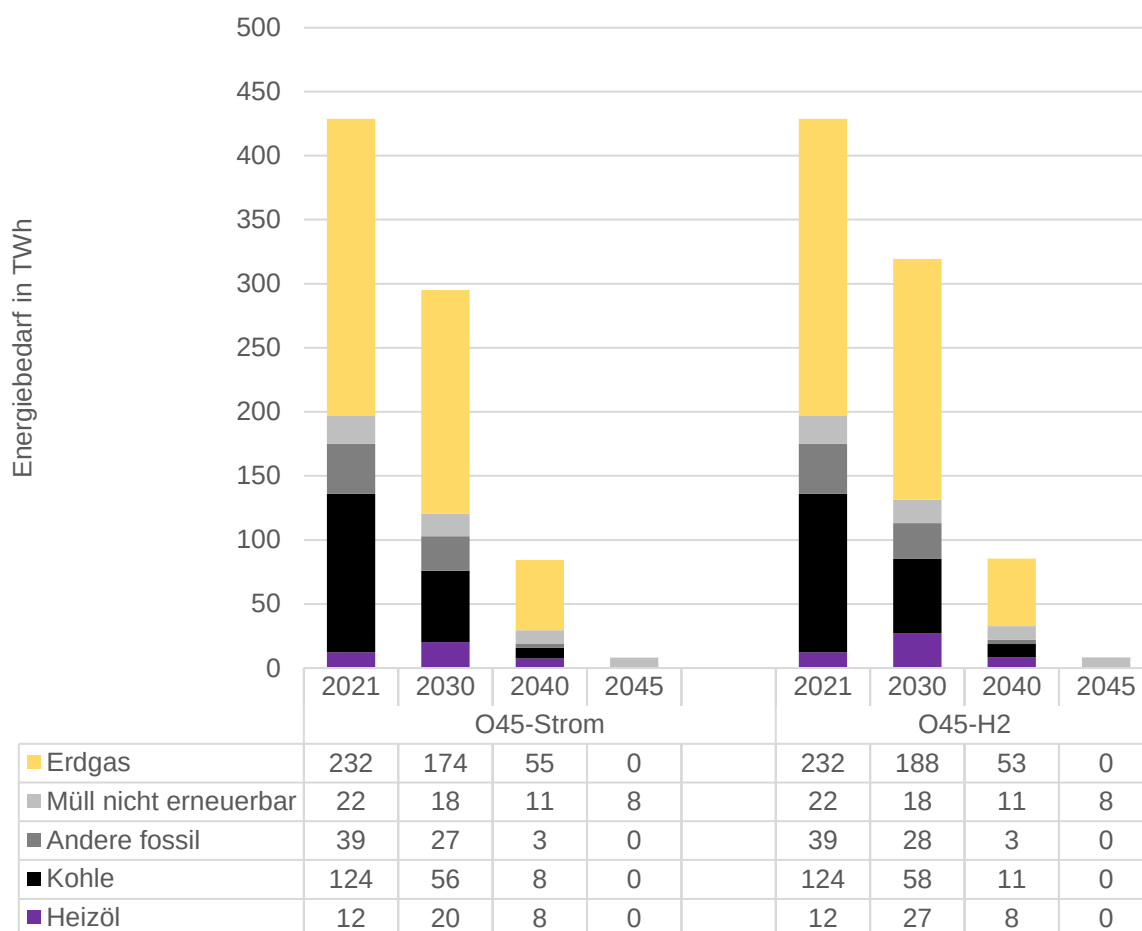


Abbildung 24: Entwicklung des fossilen Endenergieverbrauchs im Industriesektor

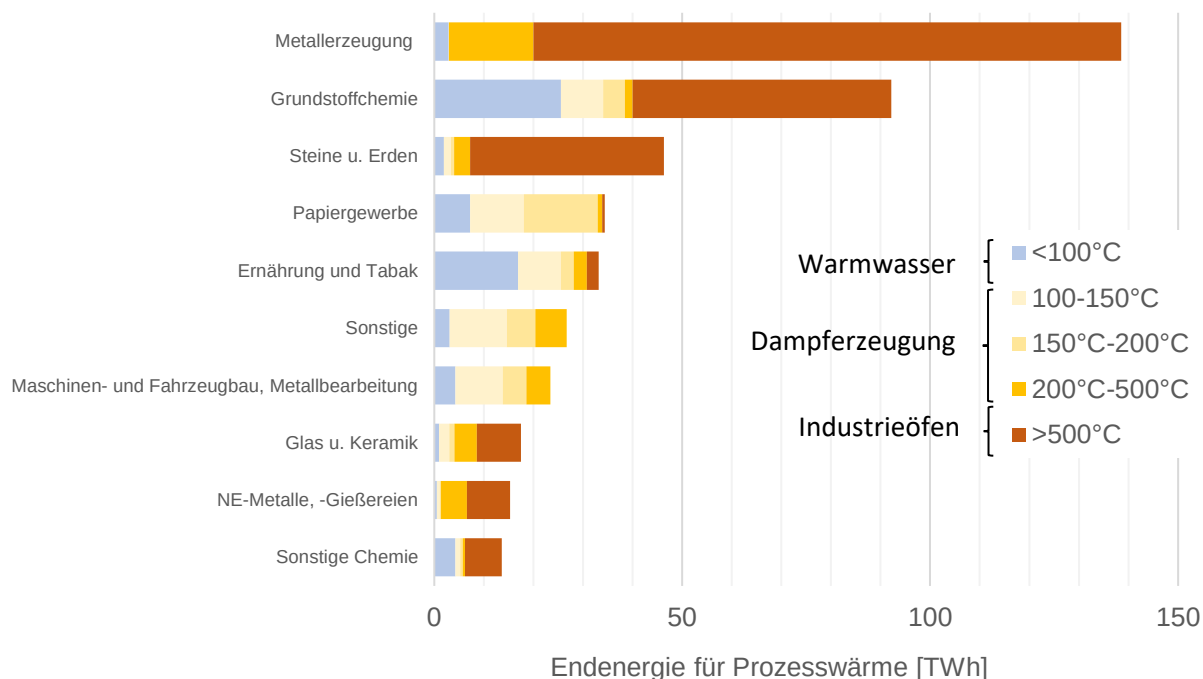
Dargestellt ist der fossile Endenergieeinsatz nach AGEB ohne stofflichen Energieträgereinsatz.



4.2.1.2 Energieträgerwechsel in der Prozesswärme

Die Bereitstellung von Prozesswärme ist die größte CO₂-Quelle im Industriesektor und macht den größten Anteil am Endenergiebedarf aus. Gleichzeitig verteilt sie sich auf sämtliche Industriebranchen und weist eine sehr hohe Vielfalt an Technologien und Prozessparametern auf, welche auf die Anforderungen der jeweiligen Anwendungen abgestimmt sind. Diese Heterogenität zeigt sich u.a. in den unterschiedlichen nötigen Temperaturniveaus, welche maßgeblich einschränken, welche Energieträger und Technologien für die Bereitstellung genutzt werden können. Für die Szenariorechnung werden sieben Temperaturniveaus unterschieden, die in drei Bereiche (Warmwasser, Dampferzeugung und Industrieöfen) gruppiert werden (Abbildung 25). Der Hochtemperaturbereich der Industrieöfen dominiert in den besonders energieintensiven Branchen Metallerzeugung, Grundstoffchemie und (Verarbeitung von) Steinen und Erden. Zusammen werden dort 210 TWh über 500°C benötigt³⁶. Ähnlich hohe Bedeutung haben Hochtemperaturbedarfe in der sonstigen chemischen Industrie, Nicht-Eisen-Metallen und Gießereien sowie Glas und Keramik. In anderen Subsektoren wird Prozesswärme überwiegend (>90 %) als Warmwasser und Dampf bereitgestellt.

³⁶ Diese Berechnungen sind eine Mischung aus auf einzelne Prozesse bezogene Bedarfe und branchenweiten Temperaturprofilen. Sie enthalten daher einen Anteil von Schätzungen.

Abbildung 25: Temperaturverteilung des Prozesswärmebedarfs im Jahr 2019

Der Einsatz von Wasserstoff ist insbesondere in Hochtemperaturanwendungen, die konventionell mit Erdgas betrieben werden und eine hohe Energiedichte sowie Temperaturen benötigen ("Industrieöfen") vorteilhaft gegenüber einer Elektrifizierung. Ob eine Elektrifizierung grundsätzlich möglich ist, muss oft konkret am Standort entschieden werden – dies bedeutet oft Neubau von Anlagen und kann logistische Herausforderungen mit sich bringen³⁷. Das technische Potential zur Elektrifizierung ist hoch und könnte mit der Markteinführung neuer Technologien weiter ansteigen

³⁷ Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Standortinterne und standortexterne Faktoren. Standortintern kann der verfügbare Bauraum in bestehenden Gebäuden oder die insgesamt verfügbare Fläche der direkten Elektrifizierung Grenzen setzen, da mit heute verfügbarer Technik oft größere Bauräume (zum Beispiel durch den Ersatz eines brennstoffbetriebenen durch mehrere elektrische Öfen) benötigt werden als mit Gasbeheizung. Standortextern ist die benötigte Anschlussleistung oft nur als Erdgasleitung – nicht als Stromleitung – verfügbar.

(Rehfeldt et al. 2024). Die tatsächlich realisierten Anteile direkter und indirekter Elektrifizierung sind aber stark von der Überwindung organisatorischer und wirtschaftlicher Hemmnisse abhängig.

Hintergrund: Bilanzierung des Energiebedarfs der Stahlerzeugung

Hochöfen und deren CO₂-armes Alternativroute der Direktreduktion nutzen Energieträger für mehrere Zwecke. Die wichtigsten sind die Erwärmung des Rohstoffs (Eisenerzpellets oder eine Mischung aus Koks, Eisenerz und Zuschlagsstoffen) und die Reduktion des Eisenerzes.

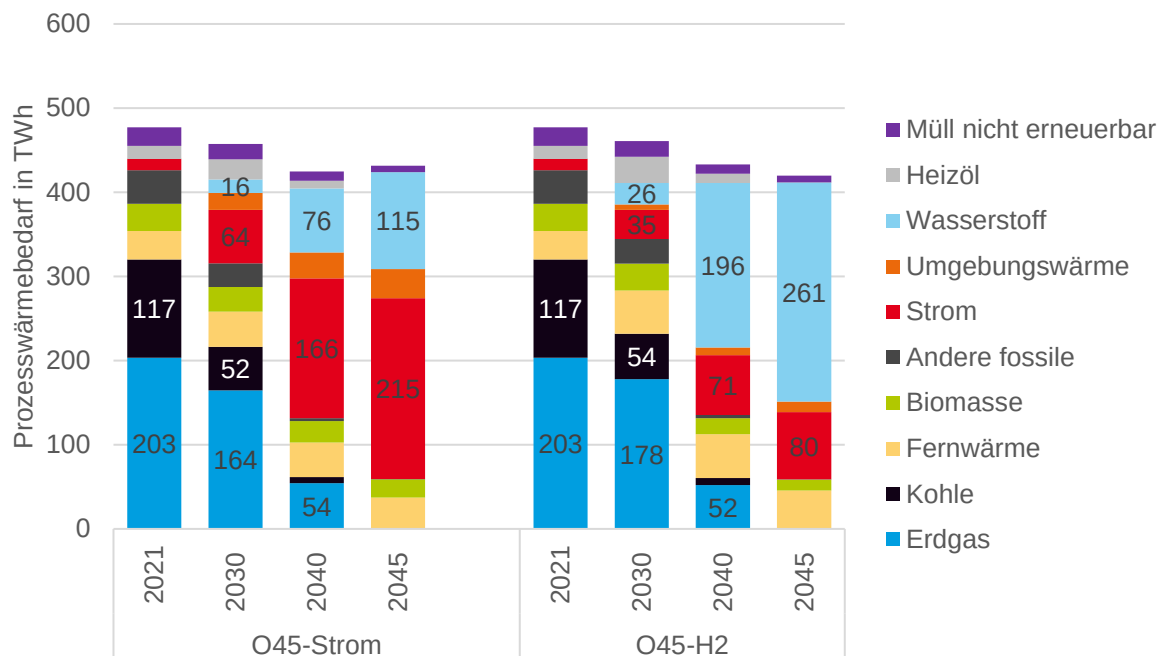
Während die Erwärmung und je nach Verfahren das Schmelzen klar eine energiebezogene Nutzung der Energieträger ist, kann die Reduktion als stoffliche Nutzung gesehen werden. Die Zuteilung ist nicht eindeutig und wird in bedeutenden Bezugssystemen wie der Energiebilanz und dem Treibhausgasinventar unterschiedlich gehandhabt. Danach richtet sich auch die Bilanzierung in diesem Bericht:

- Der **Energieeinsatz** in der Stahlerzeugung wird vollständig als energiebedingt eingestuft und in den jeweiligen Abbildungen so abgebildet. Dies entspricht der Definition nach offizieller Energiebilanz der AGEB. Im Zuge der in der Modellierung wird der Endenergiebedarf der Metallerzeugung beinahe vollständig den Industrieöfen zugerechnet.
- Für die Berechnung der Erreichung der **Klimaziele nach Klimaschutzgesetz** wird auf die Einordnung der Inventarberichte umgeschwenkt. Dort werden Treibhausgasemissionen aus der Energieträgerverwendung in Hochöfen als prozessbedingte Emissionen (also explizit nicht energiebedingt) bilanziert. Diese Treibhausgasemissionen werden in der Ergebnisdarstellung entsprechend umgruppiert.

Die beiden durch die Szenarien beschriebenen Pfade für die Umstellung der Prozesswärme unterscheiden sich besonders bei der Bedeutung von Strom und Wasserstoff. Gemein haben die beiden Szenarien allerdings, dass beide Energieträger zentral für die zukünftige klimaneutrale Bereitstellung von Prozesswärme werden und in Summe über 80 % des Energieeinsatzes in diesem Segment ausmachen Abbildung 26. In O45-Strom wird die Prozesswärme stark elektrifiziert (auf 215 TWh in 2045). Hinzu kommen 115 TWh Wasserstoff und 101 TWh andere Energieträger (Fernwärme, Umgebungswärme, Biomasse, fossiler Müll). O45-H₂ setzt für die Prozesswärmebereitstellung hingegen einen Schwerpunkt auf die energetische Nutzung von Wasserstoff (261 TWh), ergänzt durch Elektrifizierung (80 TWh) und andere Energieträger (79 TWh). Für beide O45-Szenarien gilt, dass zwischen 2020 und 2030 der Einsatz von Heizölen – bedingt durch höhere Erdgaspreise und dadurch ausgelöste Ausweichbewegungen – ansteigt (von etwa 16 TWh auf 24-31 TWh).

Abbildung 26: Endenergiebedarf in der Prozesswärme

Summe aus Hochtemperatur (Industrieöfen) und Nieder- und Mitteltemperatur (Dampf und Warmwasser).

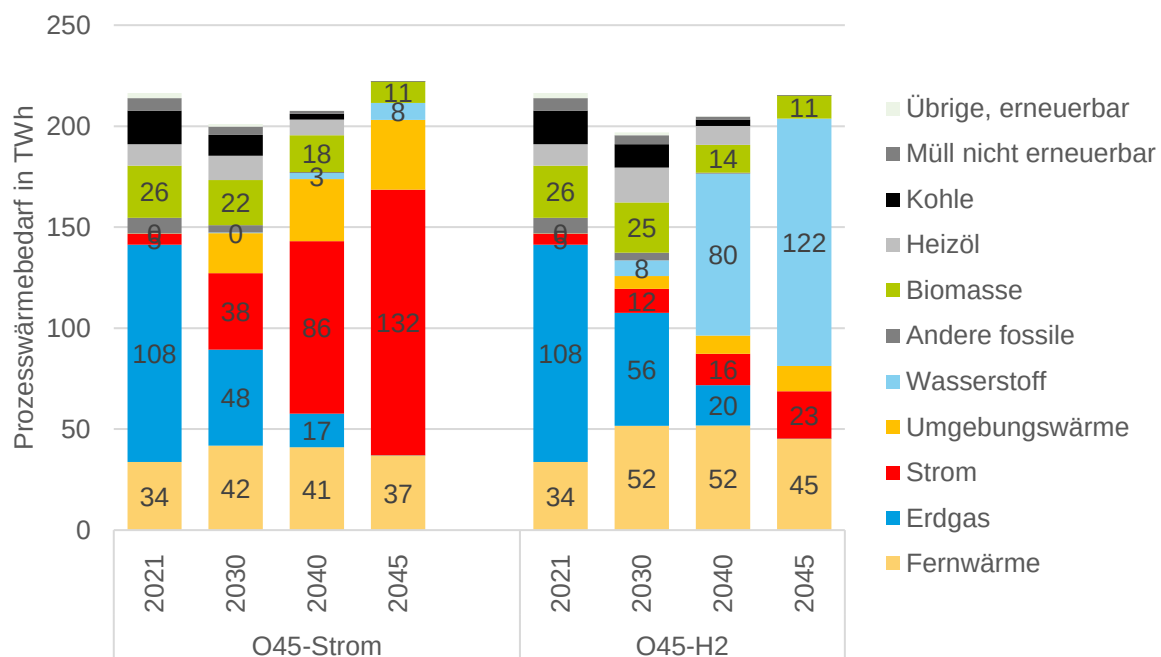


Eine Unterteilung der Prozesswärme in Hoch- und Niedertemperatur ermöglicht die Abgrenzung von Erzeugungstechnologien. Im **Temperaturbereich unter 500°C**, davon der Großteil unter 200°C, dominiert die Bereitstellung von Prozesswärme in Form von Dampf und Warmwasser (Abbildung 27). Mit 216 TWh betrifft dies 45 % der gesamten Prozesswärme – davon wiederum 66 % fossil. Die Lieferung von Wärme hat in diesem Technologiebereich eine größere Bedeutung (2021: 34 TWh), ist aber nicht mit "Fernwärme" im Gebäudesektor zu verwechseln, da hier vor allem Lieferungen über 140°C in Form von Dampf von nahegelegenen Kraftwerken relevant sind.

Die deutlichen Unterschiede beim zukünftigen Einsatz von Strom und Wasserstoff zwischen den beiden Szenarien spiegeln Unsicherheiten wider (Siehe Abbildung 27). Das Szenario O45-Strom zeigt, dass ein hoher Grad der Elektrifizierung technisch möglich ist. Technologien wie Elektrodenkessel sind verfügbar und Hochtemperaturwärmepumpen werden schnell weiterentwickelt. Diese erlauben hohe Effizienzsteigerungen und machen die Elektrifizierung entsprechend wirtschaftlich attraktiver. Im Ergebnis zeigen sich für das Jahr 2045 etwa 132 TWh Strom und 58 TWh Umgebungswärme, während Wasserstoff mit 8 TWh lediglich in Nischen eingesetzt wird. Auch im Szenario O45-H₂ findet eine Elektrifizierung statt, allerdings auf deutlich niedrigerem Niveau. Langfristig wird Wasserstoff mit 122 TWh zum wichtigsten Energieträger in diesem Segment. Dieses Szenario beschreibt eine mögliche Entwicklung, bei welcher die umfassende Elektrifizierung an Hürden wie unter anderem dem entsprechenden Netzanschluss scheitert.

Abbildung 27: Endenergiebedarf in der Dampf- und Warmwassererzeugung

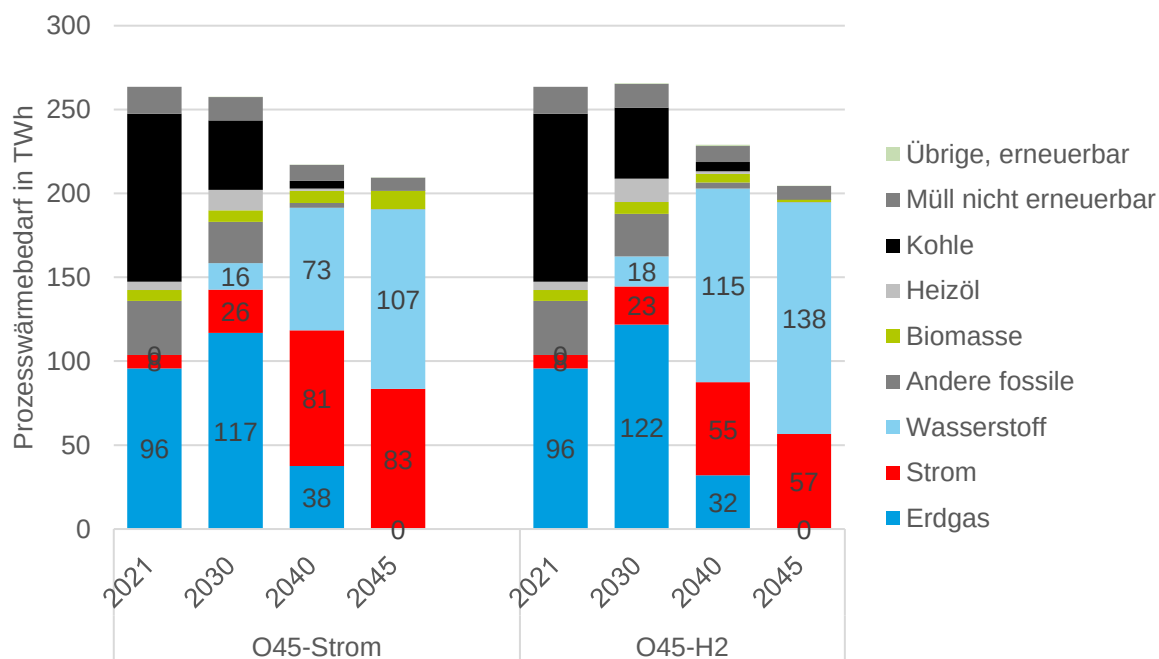
Vergleich von O45-Strom und O45-H₂. Temperaturbereich bis 500°C, davon >75 % unter 200°C.



Im **Hochtemperaturbereich über 500°C** wird eine große Vielfalt an unterschiedlichen Industrieofentypen genutzt, Prozesse benötigen nicht nur hohe Temperaturen sondern auch hohe Energiedichten und -Mengen(vergleiche beispielsweise (Fleiter et al. 2023a). Wenngleich eine Elektrifizierung in vielen Bereichen technisch möglich sein wird, so gibt es gleichzeitig Anwendungen, die zunächst weitere technische Entwicklung verlangen und für die eine Elektrifizierung nur über einen kompletten Neubau von Anlagen möglich wäre. Entsprechend sind die Hemmnisse für eine Elektrifizierung in diesem Segment höher als bei der Dampf- und Warmwasserbereitstellung. Dadurch spielt in diesem Bereich in allen Szenarien die Nutzung von Wasserstoff eine bedeutende Rolle (zwischen 106 und 136 TWh in 2045). In beiden Szenarien ist aber auch eine deutlich ansteigende Elektrifizierung (zwischen 57 und 83 TWh in 2045) – ausgehend von einem geringen Niveau (8 TWh in 2021) – vorhanden (siehe Abbildung 28). Zum Teil ist dies auf eine stärkere Nutzung der Sekundärroute der Stahlerzeugung zurückzuführen, tatsächlich findet aber eine breite Elektrifizierung auch in anderen Industrieöfen statt (Weiterverarbeitung Metalle, Chemie, Glas und Keramik). Die Nutzung von Kohle (und deren Derivate) geht mit der Umstellung der Stahlerzeugung zurück. Der summierte Energiebedarf dieses Segments geht durch Prozessumstellung langfristig zurück (z. B. bei Stahl Wechsel von Primärerzeugung auf Sekundärroute mit deutlich geringerem Energiebedarf), darin sind maßgeblich bilanzielle Effekte (Verschiebung in andere Technologiebereiche) enthalten.

Abbildung 28: Endenergiebedarf in Industrieöfen

Vergleich von O45-Strom und O45-H₂. Temperaturbereich über 500°C.

**4.2.1.3 Verwendung von Wasserstoff und Strom**

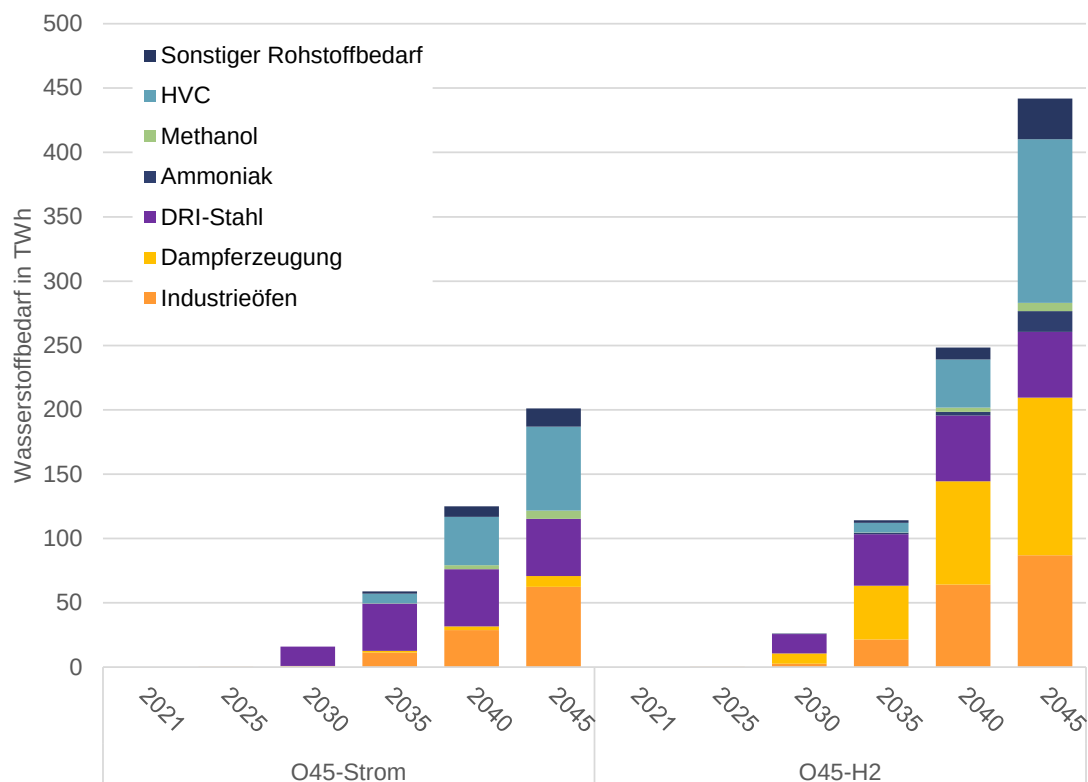
In diesem Abschnitt wird die Verwendung der in den Szenarien zentralen Sekundärenergieträger Strom und Wasserstoff vertiefend beschrieben, beginnend mit Wasserstoff.

Wasserstoff wird in O45-Strom für Anwendungen eingesetzt, die sich nicht oder nur schlecht direkt elektrifizieren lassen (Abbildung 29). Bedarfe entstehen für die Versorgung der chemischen Industrie mit CO₂-neutralen Rohstoffen für die Produktion von hochwertigen Chemikalien³⁸, Methanol und Ammoniak (2045: 86 TWh), Direktreduktion von Eisen (44 TWh) und weitere Prozesswärmeerzeugung besonders auf hohen Temperaturniveaus (71 TWh). In Summe werden im Jahr 2045 etwa 200 TWh (2030: 16 TWh) Wasserstoff benötigt.

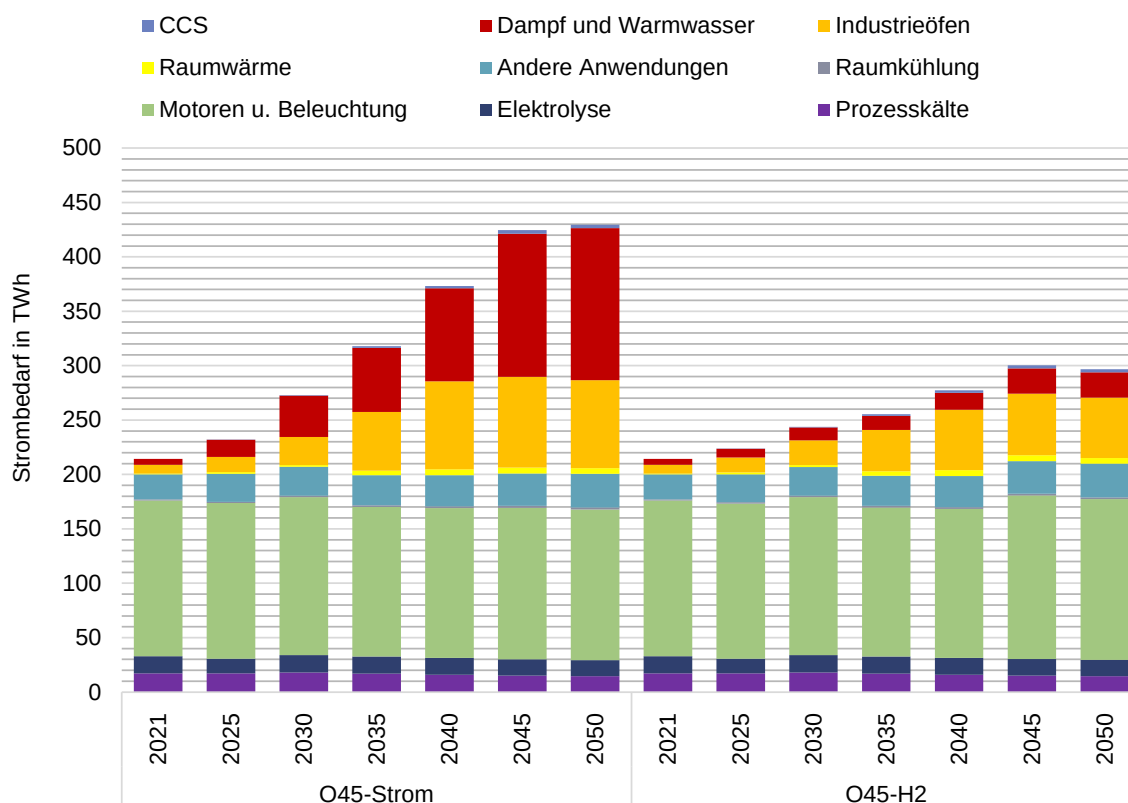
In O45-H₂ wird über diese notwendig erscheinende Nutzung hinausgegangen. Wasserstoff ist in diesem Szenario nicht nur dort attraktiv, wo kaum Alternativen bestehen, sondern auch in anderen Bereichen wettbewerbsfähig (unter der Annahme, dass Wasserstoff in ausreichenden Mengen und zu hinreichend niedrigen Preisen verfügbar sein wird). Dazu gehören Industrieöfen, die im Szenario O45-H₂ etwas weniger direkt elektrifiziert werden (2045: +24 TWh Wasserstoffbedarf gegenüber O45-Strom) und die breite Nutzung in der Dampferzeugung (2045: +114 TWh Wasserstoffbedarf gegenüber O45-Strom). Dazu wurden bezüglich der Infrastruktur (stark ausgebautes Wasserstoffnetz inklusive Verteilebene, demgegenüber mangelhafter Ausbau der elektrischen Anschlussleistungen) und der wirtschaftlichen Attraktivität von Wasserstoff im Vergleich zu direkter Stromnutzung starke Annahmen zum Vorteil von Wasserstoff getroffen. Dieses Szenario spannt den noch offenen Lösungsraum zur Nutzung von Wasserstoff in der Industrie weit auf. Weniger großzügige Annahmen zur wirtschaftlichen Attraktivität von Wasserstoff lassen die Nutzung entsprechend O45-Strom plausibler erscheinen.

³⁸ High-value chemicals (HVC)

Abbildung 29: Resultierender Einsatz von Wasserstoff im Industriesektor nach Anwendungen



Strom steigt in seiner Bedeutung als Energieträger in beiden O45-Szenarien, sowohl relativ wie absolut (Abbildung 30). Die Stromnutzung wird im Jahr 2021 noch durch Elektromotoren, Pumpen, Kompressoren, Druckluft und ähnliche Anwendungen bestimmt. Deren Stromverbrauch nimmt im Szenarioverlauf leicht ab oder stagniert. Hier werden steigend wirkende Effekte wie das angenommene Wirtschaftswachstum durch Effizienzgewinne kompensiert. Insgesamt steigt der Stromverbrauch dennoch, da in allen Szenarien zumindest eine Teilelektrifizierung der Prozesswärme stattfindet. Im Szenario O45-Strom dominiert die Elektrifizierung in der Prozesswärme (siehe Abschnitt 4.2.1.2). Auch schwieriger zu elektrifizierende Öfen werden größtenteils elektrifiziert. Dadurch steigt der direkte Strombedarf in O45-Strom auf insgesamt 425 TWh in 2045 (O45-H₂: 300 TWh).

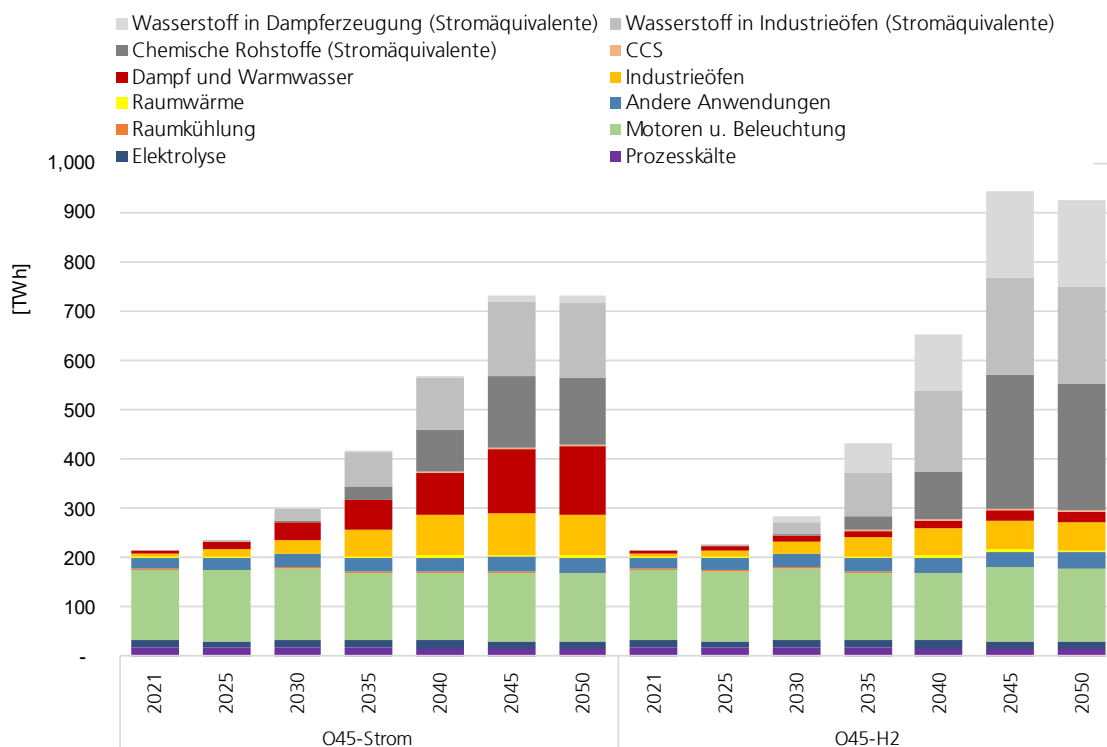
Abbildung 30: Resultierender Einsatz von Strom im Industriesektor nach Anwendungen

Ob direkt oder indirekt, alle Szenarien zeigen einen deutlichen Anstieg des Bedarfs an "Stromäquivalenten" (Abbildung 31). Diese – nur virtuelle und nicht in die Endenergienachfrage der Industrie eingehende – Größe zeigt den gesamten Stromverbrauch inkl. dem zur Bereitstellung von Wasserstoff und Grünen Kohlenwasserstoffen.

Für eine erste Schätzung werden einfache Umwandlungsfaktoren angenommen (70 % für Wasserstoff, 50 % für Kohlenwasserstoffe). Der Bedarf dieser Stromäquivalente ist nach Anwendungen aufgeschlüsselt. Er beläuft sich 2021 auf 214 TWh, maßgeblich für klassische Anwendungen wie Motoren und Beleuchtung, Prozesskälte, Raumwärme und -kälte sowie Elektrolyse. Während dieser Block bis 2045 in O45-Strom auf 206 TWh (O45-H₂: 218 TWh) sinkt, kommen neue Anwendungen hinzu (vergleiche Abbildung 26 bis Abbildung 28 und Abbildung 30). Der 2045 in beiden Szenarien größte Block aber ist die indirekte Elektrifizierung – die Herstellung von strombasierten Gasen – die zwischen 308 TWh (O45-Strom) und 642 TWh (O45-H₂) benötigt. Der Strombedarf für die Abscheidung von CO₂ ist mit knapp 3 TWh geringfügig. Dies dient lediglich einer einfachen Abschätzung der Größenordnung - im Berichtsmodul zum Energieangebot werden Erzeugungsseite und Importströme genauer betrachtet. In Summe wird aber klar, dass die in O45-H₂ verwendete Strategie der starken Ausdehnung der Wasserstoffnutzung mit einer höheren Energieintensität der Industrienachfrage einhergeht – der Strombedarf inklusive Stromäquivalente ist 2045 in O45-H₂ 209 TWh (29 %) höher als in O45-Strom.

Abbildung 31: Stromäquivalente im Industriesektor nach Anwendungen

Vergleich von O45-Strom und O45-H₂. Inklusive theoretischem Stromverbrauch für die Herstellung von Wasserstoff/PtX als Stromäquivalente. Für die Berechnung des potenziellen Stromverbrauchs für die Erzeugung von Wasserstoff/PtX wird überschlägig eine Umwandlungseffizienz der Prozesskette von 70 % (Wasserstoff) bzw. 50 % (PtX) angenommen.



4.2.1.4 Energieintensität

Die Energieintensität setzt den Energiebedarf in Bezug zur Wertschöpfung. Sie kann durch viele Entwicklungen beeinflusst werden, gilt aber im Allgemeinen als ein aggregierter Indikator für die Energieeffizienz der Produktion. In beiden O45-Szenarien³⁹ sinkt die Energieintensität von 1,38 kWh/€₂₀₂₁ (2021) bis 2045 auf 0,92 kWh/€₂₀₂₁ (Tabelle 20). Dazu trägt zunächst eine Verlagerung wirtschaftlicher Aktivität zu Branchen mit höherer Wertschöpfung bei: Im Mittel steigt entsprechend der Annahmen der Szenarien die Wertschöpfung der verarbeitenden Industrie zwischen 2021 und 2045 um 37 % (CAGR⁴⁰ von 1,4 %). Die energieintensiven Grundstoffe (im Bereich >3 kWh/€) wachsen aber unterdurchschnittlich (z. B. Metallerzeugung 23 %, CAGR 0,9 %; Grundstoffchemie 26 %, CAGR 1 %), Branchen mit hoher Wertschöpfung aber vergleichsweise geringer Energieintensität (im Bereich <0,5 kWh/€) wachsen stärker (z. B. Fahrzeugbau 48 %, CAGR 1,6 %; Maschinenbau 49 %, CAGR 1,7 %).

Darüber hinaus steigen Energie- und Materialeffizienz sowie Kreislaufwirtschaft insbesondere der energieintensiven Branchen, es wird daher pro Euro Wertschöpfung weniger Material umgesetzt und weniger Energie benötigt. Dies setzt sich zusammen aus inkrementellen Verbesserungen (effizientere Motoren und Prozesse) und disruptiven Änderungen der Produktion – beispielhaft zu

³⁹ Die Unterschiede zwischen O45-Strom und O45-H₂ sind – aufgrund der für alle als identisch angenommene Wertschöpfung – lediglich durch die geringfügig unterschiedlichen Endenergiebedarfe bedingt und vernachlässigbar.

⁴⁰ CAGR: Compound Annual Growth Index (Jährliche Wachstumsrate)

verstehen am Fall der Roheisenerzeugung. Dort werden mit dem Umstieg auf wasserstoffbasierte Direktreduktion und schrottbasierte Sekundärroute nicht nur fossile durch potenziell erneuerbare Energieträger ersetzt, sondern gleichzeitig energiesparendere Verfahren genutzt: Die Direktreduktion (ob mit Erdgas oder Wasserstoff) reduziert den Energiebedarf einer Tonne Rohstahl um etwa 30 %, die Sekundärroute um bis zu 90 %. Die Energieintensität des Subsektors "Metallerzeugung" sinkt so zwischen 2019 und 2045 von 25 kWh/€ auf 15 kWh/€ (-2 % pro Jahr). Im Zeitraum 2000 bis 2015 sank die Energieintensität der industriellen Bruttowertschöpfung im Mittel um 1,3 % pro Jahr (Umweltbundesamt und BMWi 2019). Dies wird in den O45-Szenarien fortgeführt mit einem Absinken von 1,7 % pro Jahr übertroffen.

Tabelle 20: Entwicklung der Energieintensität im Szenario O45-Strom

Dargestellt in [kWh/€2021].

	Branche	2021	2025	2030	2040	2045	CAGR 2021-2045	(2045/2021)-1
O45-Strom	Bergbau	2,20	1,91	1,78	1,72	1,83	-0,8 %	-17 %
	Ernährung und Tabak	1,24	1,02	0,95	0,83	0,79	-1,9 %	-37 %
	Fahrzeugbau	0,27	0,23	0,22	0,22	0,23	-0,7 %	-15 %
	Glas u. Keramik	3,98	3,36	3,49	3,04	3,08	-1,1 %	-23 %
	Grundstoffchemie	5,92	4,77	4,80	4,35	4,12	-1,5 %	-30 %
	Gummi- u. Kunststoffwaren	0,85	0,67	0,67	0,56	0,53	-1,9 %	-37 %
	Maschinenbau	0,22	0,18	0,18	0,18	0,18	-0,7 %	-16 %
	Metallbearbeitung	0,63	0,62	0,85	0,90	0,85	1,3 %	35 %
	Metallerzeugung	25,75	22,44	22,19	15,92	15,52	-2,1 %	-40 %
	NE-Metalle, -gießereien	3,41	2,81	3,07	2,87	2,83	-0,8 %	-17 %
	Papiergewerbe	5,94	4,21	4,39	3,62	3,48	-2,2 %	-41 %
	Sonstige chemische Industrie	0,78	0,72	0,70	0,71	0,70	-0,4 %	-10 %
	Sonstige Wirtschaftszweige	0,51	0,43	0,40	0,40	0,41	-0,9 %	-19 %
	Verarbeitung v. Steine u. Erden	7,39	5,71	5,69	4,72	4,46	-2,1 %	-40 %
	Verarbeitendes Gewerbe	1,38	1,13	1,12	0,95	0,92	-1,7 %	-33 %

4.2.2 Branchenbetrachtung

Um die gesetzten sektoralen Klimaziele zu erreichen, sind je Branche (Subsektor) aufgrund unterschiedlicher Ausgangsbedingungen und Herausforderungen spezifische Strategien erforderlich. In Summe ergeben diese die in Abbildung 17 und Abbildung 22 dargestellten Energienutzungen und Treibhausgasemissionen. Die in den O45-Szenarien modellierten Transformationspfade für die Subsektoren Eisen und Stahl, die Verarbeitung von Steinen und Erden und die chemische Industrie werden im Folgenden hinsichtlich des resultierenden Energiebedarfs quantifiziert.

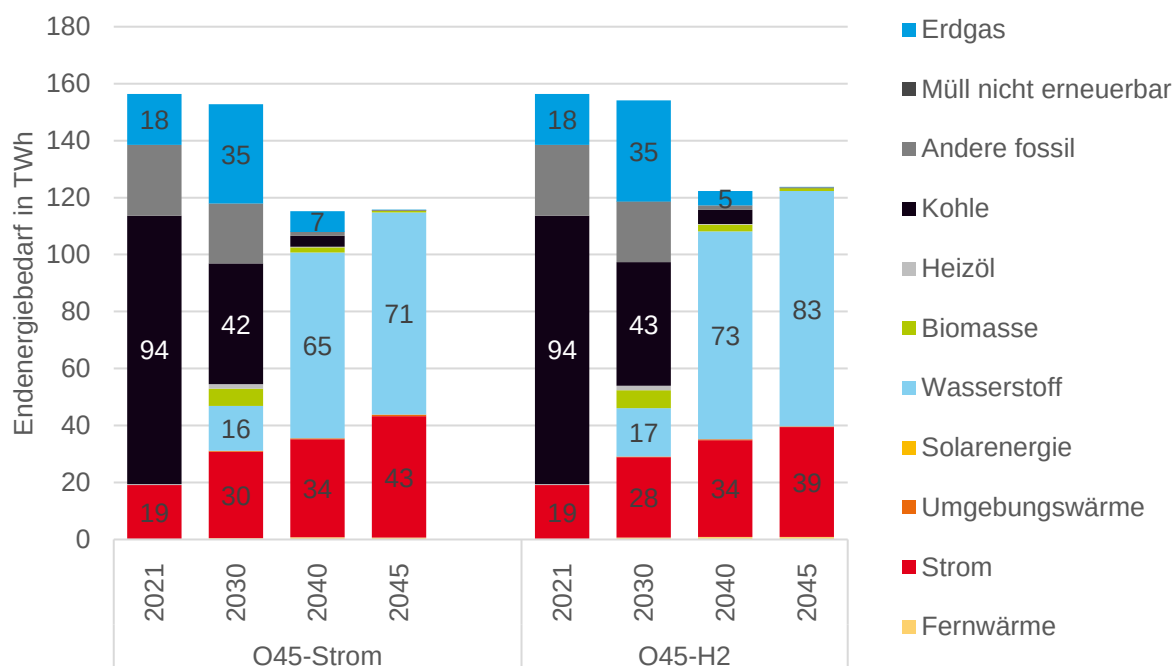
4.2.2.1 Herstellung von Eisen- und Stahl

Die Ergebnisse zur Branche Eisen- und Stahl beruhen auf den in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Annahmen. Die O45-Szenarien unterscheiden sich nur geringfügig in den Anteilen der wasserstoffbasierten Direktreduktion – in O45-Strom wird ein leicht höherer Anteil direkt elektrifizierter Stahlerzeugung in der Sekundärroute angenommen. In beiden Szenarien werden bis 2030 vorrangig erdgasbasierte Direktreduktionsanlagen betrieben. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese bei ihrer Errichtung mit der Absicht und der Option geplant werden, sie auf Wasserstoff umzustellen (H₂-ready). Diese Umstellung erfolgt nach 2030 und ist bis kurz nach 2040 abgeschlossen. Abbildung 32 zeigt den resultierenden Energiebedarf der Branche. In allen O45-

Szenarien sinkt der gesamte Endenergiebedarf bis 2045 durch eine leichte Reduktion der Aktivität und Prozesswechsel von der integrierten Hochofenroute auf die Sekundärroute und die Direktreduktion auf etwa 120 TWh. Dabei liegt der Energiebedarf je Tonne Rohstahl bei der Direktreduktion etwa 30 % niedriger im Vergleich zur Hochofenroute. Besonders hoch sind die Effizienzgewinne bei der Umstellung auf die Sekundärroute, die zu Einsparungen von bis zu 90 % führt.

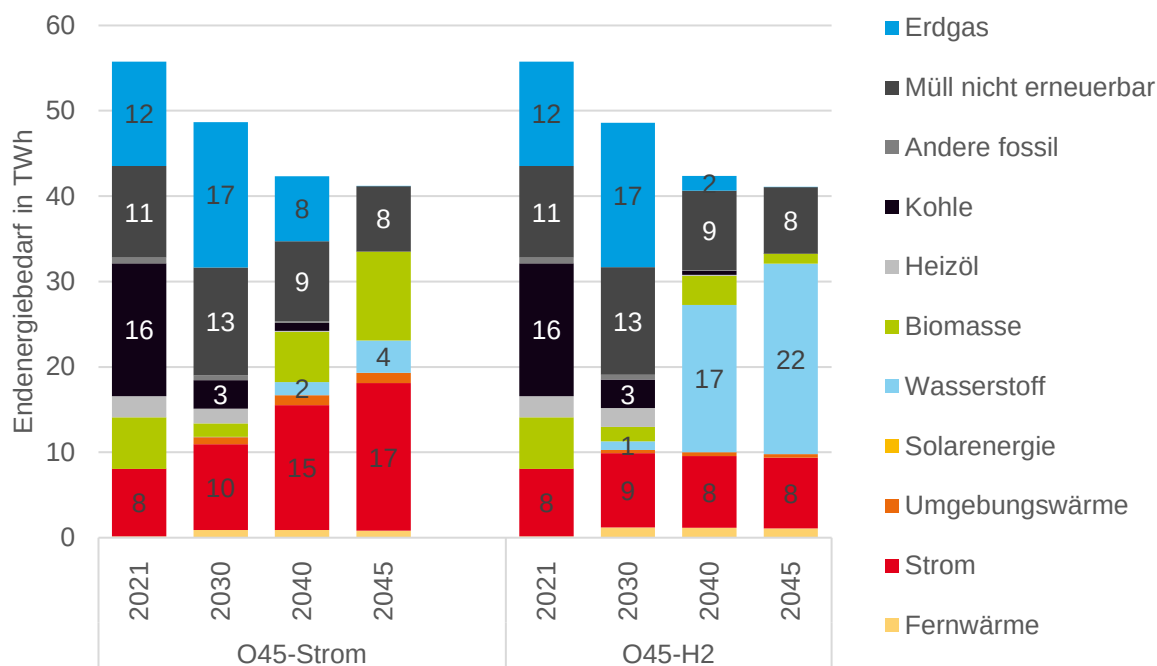
Abbildung 32: Endenergiebedarf im Subsektor Metallerzeugung

Vergleich von O45-Strom und O45-H₂.



4.2.2.2 Verarbeitung Steine- und Erden (Zement und Kalk)

Die Ergebnisse zum resultierenden Energiebedarf in der Branche Steine u. Erden sind in Abbildung 33 zusammengefasst. Der Energieträgerwechsel zielt als primäre Maßnahme der Treibhausgasvermeidung auf die Substitution der Kohlenutzung durch die in den jeweiligen O45-Szenarien zentralen Energieträger Strom und Wasserstoff. Während im Jahr 2021 Kohlen noch rund 28 % des Energiebedarfs ausmacht, sind es 2030 noch 7 % – um 2040 wird die letzte Kohle ersetzt, bis 2045 auch Erdgas. Der jeweilige Hauptenergieträger wird durch Biomasse sowie nicht-erneuerbare Anteile von Müll ergänzt. Biogene Reststoffe und Abfall mit geringem Brennwert können in der Kalzinierung eingesetzt werden, während im Drehrohrofen oder für die Herstellung von Hochwertigem Branntkalk hochwertige Biomasse, Wasserstoff und Strom eingesetzt werden. In sehr geringem Umfang kann gelieferte und Umweltwärme in Prozessschritten mit niedriger Temperatur (z. B. Aufbereitung und Trocknung von Brennstoffen und Rohmaterial) unterstützen. In O45-Strom wird darüber hinaus von der Direktelektrifizierung von jedenfalls Teilen der Zementklinker- und Kalkproduktion ausgegangen (2045: 17 TWh). In O45-H₂ wird dies (sowie Biomasse) weitgehend durch Wasserstoffnutzung ersetzt (2045: 22 TWh). In Summe sinkt der Energiebedarf im Sektor in beiden Szenarien deutlich. Dies ist eine direkte Folge der fallenden Klinkerproduktion, die sich als Kombination aus sinkendem Klinkerfaktor und sinkender Zementproduktion ergibt.

Abbildung 33: Endenergiebedarf im Subsektor Verarbeitung von Steinen und ErdenVergleich von O45-Strom und O45-H₂.

Nahezu CO₂-neutrale Produktion wird erst durch den flächendeckenden Einsatz von CO₂-Abscheidung erreicht. Einem Einstieg in die CO₂-Abscheidung bis zum Jahr 2030 (2 Mt_{CO2}-Äq.) folgt in beiden O45-Szenarien ein schneller Hochlauf, sodass bis 2045 alle Zement- und Kalkwerke umgerüstet sind. Bei der Verbrennung freierwerdender biogener Kohlenstoff gilt zunächst als Klimaneutral. Wird dieser abgeschieden können negative Treibhausgasemissionen erreicht werden. Mit einer angenommenen Abscheiderate von 80 % und den durch die bilanziell entstehenden negativen Treibhausgasemissionen aus der Biomassenutzung entsteht eine beinahe ausgeglichene Bilanz des Subsektors – lediglich die weiter stattfindende Nutzung nicht-erneuerbaren Mülls als Ersatzbrennstoffe in der Zementherstellung erzeugt verbleibende Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 1,3 Mt_{CO2}-Äq.

Diese sekundären Minderungen der Treibhausgasemissionen können nur gelingen, wenn – zusätzlich zum massiven Aufwand an den Standorten selbst – der Transport des abgeschiedenen CO₂ sowohl zu Nutzungs- als auch Speicherstandorten ermöglicht wird (siehe 4.1.2). Nutzungskonzepte in der chemischen Industrie erzeugen dabei komplett neue Abhängigkeiten und subsektorale Interaktionen, die neben Infrastruktur auch Regulierung benötigen. Wenige der notwendigen Voraussetzungen für dieses System sind momentan vorhanden, die Umsetzung entsprechend ambitioniert.

4.2.2.3 Grundstoffchemie: Rohstoffliche Nutzung von Energieträgern

In der Grundstoffchemie ist ein Großteil des Energiebedarf der stofflichen Nutzung von Energieträgern zuzuschreiben. Die stoffliche Nutzung von fossilen Energieträgern in der der (petro-)chemischen Industrie betrug 2021 etwa 272 TWh.

Emissionen der stofflichen Nutzung fossiler Energieträger werden nicht direkt bei der Herstellung, sondern erst nach ihrem Lebenszyklus in sogenannten End-of-life-Prozessen (z. B. Müllverbrennung) freigesetzt. Dies macht zur Erreichung der Klimaneutralität eine Umstellung der Rohstoffbasis für viele Produkte und eine Transformation der chemischen Industrie erforderlich, auch wenn dadurch nicht direkt Emissionen in der Industrie reduziert werden.⁴¹ Relevante Produkte sind insbesondere Ammoniak, Methanol, HVCs zur Kunststoffproduktion und Bitumen (Vergleiche Kapitel 3.3.3).

Ammoniak wird heute mithilfe der Haber-Bosch-Synthese aus mittels Erdgas-Dampfreformierung gewonnenen Wasserstoff und Stickstoff synthetisiert. Bei der Dampfreformierung entstehendes CO₂ wird zum Teil zur Synthese von Harnstoff aus Ammoniak weiter genutzt. So gebundenes CO₂ wird bei der Nutzung des Harnstoffs als Dünger jedoch wieder frei. Durch die Nutzung von grünem Wasserstoff kann die Emission von fossilem CO₂ verhindert werden. CO₂ für die Harnstoffsynthese kann in Zukunft aus Industrieprozessen, Abfallverbrennung oder aus der Umgebungsluft gewonnen werden.

Auch Methanol wird heute aus Wasserstoff und Kohlenstoff synthetisiert, die durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen werden. In Zukunft könnte Methanol wie Harnstoff aus grünem Wasserstoff und zuvor abgetrenntem CO₂ synthetisiert werden.

Für die Herstellung von HVCs zur Kunststoffproduktion werden mehrere mögliche Routen berücksichtigt. Heute werden HVCs in Raffinerien, oder in eng an Raffinerien angebunden Chemiestandorten bei der Produktion von Treibstoffen wie Benzin und Diesel als Nebenprodukt aus Rohöl hergestellt. Als Alternative werden, neben dem mechanischen Recycling von Kunststoffen, welches zu einem geringeren Bedarf von HVCs führen kann, das chemische Recycling, die MtO/MtA-Route und die Fischer-Tropsch Synthese berücksichtigt.

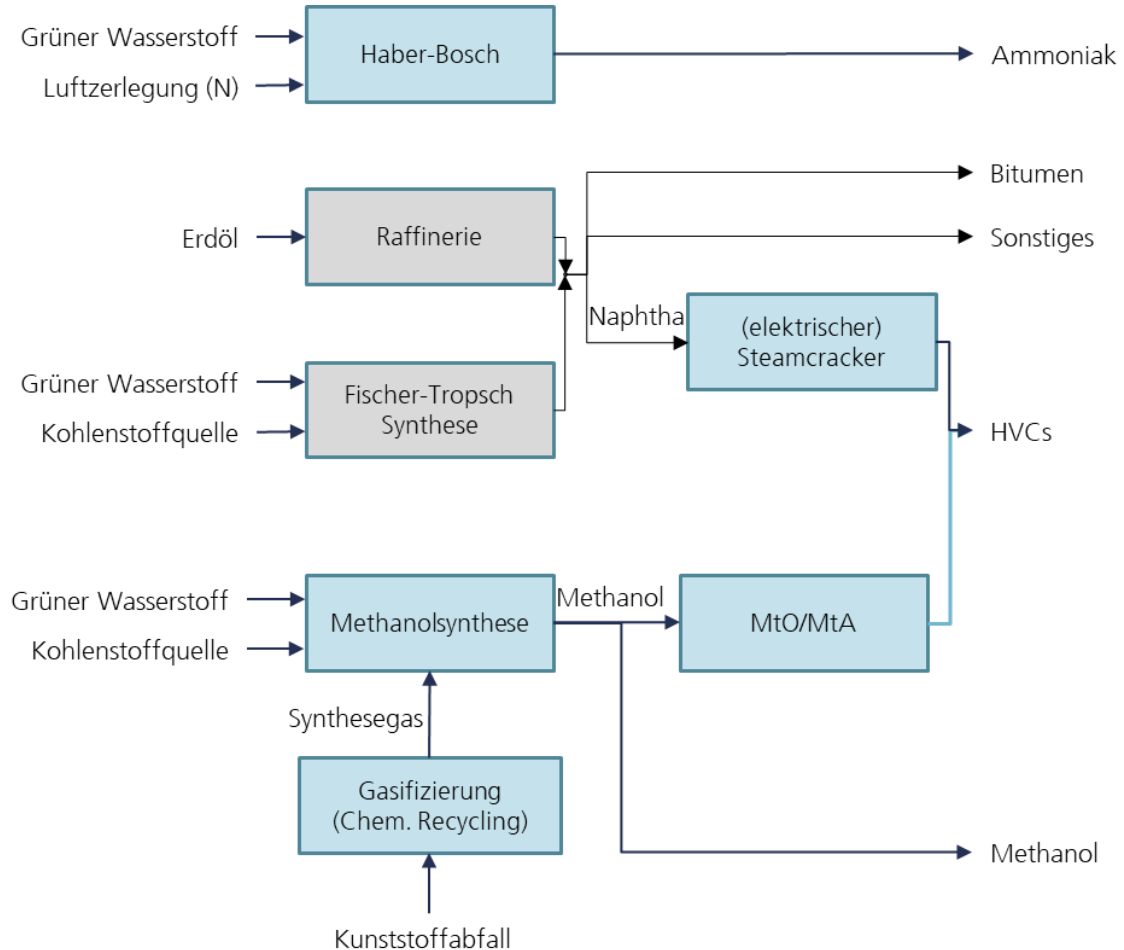
Stellvertretend für eine Vielzahl von chemischen Recyclingprozessen wird die Gasifizierung von Kunststoffabfall mit anschließender Methanolsynthese berücksichtigt. Durch die MtO/MtA-Route kann dieses und auch aus Wasserstoff und CO₂ synthetisiertes Methanol weiter zu HVCs verarbeitet werden. Bei der FT-Route wird aus Wasserstoff und CO₂ ein dem Rohöl ähnliches Produkt gewonnen. Aus diesem können mit heute bereits etablierten Prozessen neben HVCs auch Kerosin gewonnen werden. Auch Bitumen, welches wie HVCs heute ein Nebenprodukt aus Raffinerien ist, kann auf diesem Weg gewonnen werden.

⁴¹ Die Treibhausgasemissionen werden im Umwandlungssektor bilanziert, eine Umstellung der Produktion zahlt also nicht auf das Sektorziel der Industrie ein. Überdies ist sie aufgrund hoher Kosten für den stofflich benötigten Wasserstoff sehr teuer. und weist damit hohe Vermeidungskosten auf. Sie ist dennoch strategisch notwendig und muss frühzeitig gestartet werden – etwa, um langlebige fossil basierte Kunststoffe nicht lange nach 2045 im Kreislauf zu haben.

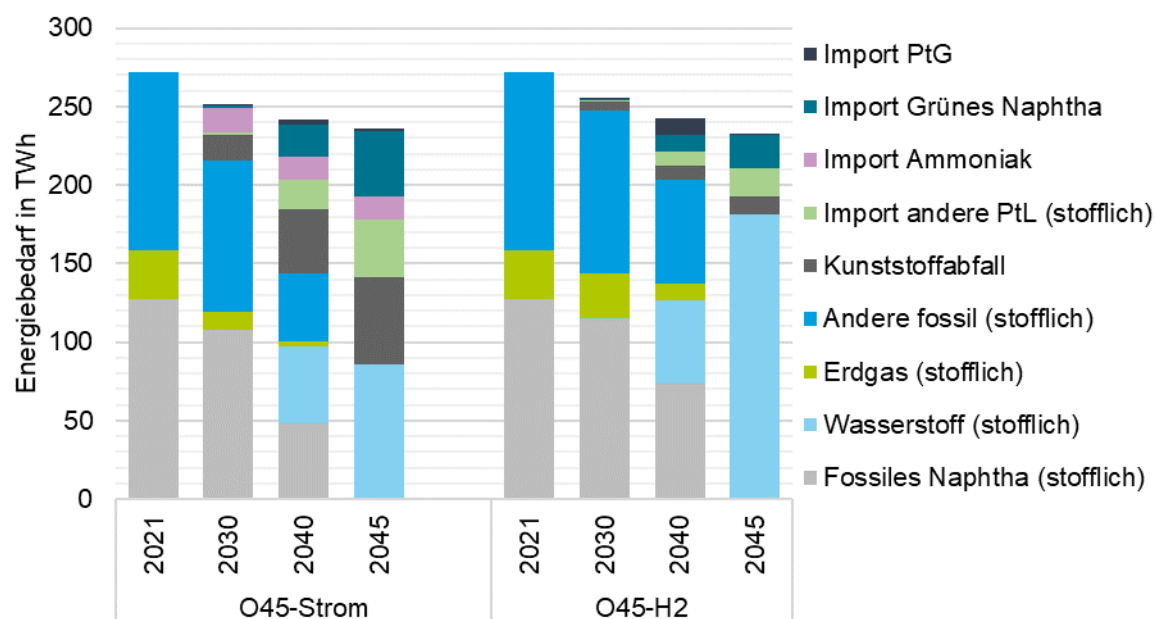
Abbildung 34: Routen zur stofflichen Nutzung von Energieträgern

N – Stickstoff; FT – Fischer-Tropsch Synthese; MTO/MTA – Methanol to Olefins/Aromatics Prozess; HVCs – High Value Chemicals wie Ethylen und Aromaten; Chem. Recycling – Chemisches Recycling;

In Blau in der Industrie berücksichtigte Prozesse



Im Jahr 2045 liegt der stoffliche Bedarf in den O45-Szenarien bei 232-236 TWh, Abbildung 35. Der Hochlauf der Prozessumstellung und der Einsatz von grünem Wasserstoff und dessen Derivaten beginnt nach 2030. Der Wasserstoffbedarf steigt bis 2040 je nach Szenario auf 85-180 TWh. Ein gewisser Anteil von 40-80 TWh synthetischer Energieträger (Import) bleibt auch in diesen Szenarien. In O45-Strom wird ebenfalls Ammoniak mit einem Energiegehalt von etwa 14 TWh importiert. Kunststoffabfall wird mit 56 TWh in O45-Strom in großen Mengen im mechanischen und chemischen Recycling genutzt. In O45-H₂ wird Kunststoffabfall mit etwa 11 TWh nur in geringerem Maße und lediglich im mechanischen Recycling eingesetzt. Die Ergebnisse verdeutlichen den starken Einfluss der Strategien zur stofflichen Nutzung von Energieträgern auf den Wasserstoffbedarf. Insgesamt herrschen in allen Szenarien große Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung der Produktionsmengen und der Bedeutung von Importen.

Abbildung 35: Stoffliche Nutzung nach Energieträger in den O45-Orientierungsszenarien

4.2.3 Regionale Energienachfrage

Die regionale Energienachfrage Deutschlands wird für die 401 Landkreise und kreisfreien Städte (NUTS 3) dargestellt. Im Modell ist die jeweilige Industriestruktur der Regionen berücksichtigt. Einerseits ist die standortscharfe, aktuelle Produktionsmenge bzw. Kapazität von Anlagen energieintensiver Prozesse (insbesondere der Stahl-, Zement-, Glas-, Papierindustrie, Grundstoffchemie bzw. Petrochemie), andererseits die Beschäftigtenanzahl je industriellem Subsektor aus statistischen Analysen hinterlegt. Diese Daten bilden die Grundlagen für die regionale Verteilung, wobei die zukünftige Entwicklung analog zu den nationalen Annahmen erfolgt. Zentrale Annahmen bei der Regionalisierung sind, dass die jeweiligen Standorte erhalten bleiben und dass die Veränderung der Produktionsmengen und Prozesse an den Standorten relativ gleich zum nationalen Durchschnitt erfolgt. Dadurch sind die Haupttreiber für die Entwicklung der Energienachfrage (bspw. Elektrifizierung, Einsatz von Wasserstoff als Rohstoff) je nach lokaler Industriestruktur stärker oder schwächer ausgeprägt als in der nationalen Entwicklung. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt in Regionen mit Stahlherstellung (Umstellung der Hochofenroute auf Wasserstoffdirektreduktion) sowie in Regionen mit Standorten der (petro-)chemischen Industrie (Nutzung erneuerbarer Rohstoffe für die stoffliche Nutzung).

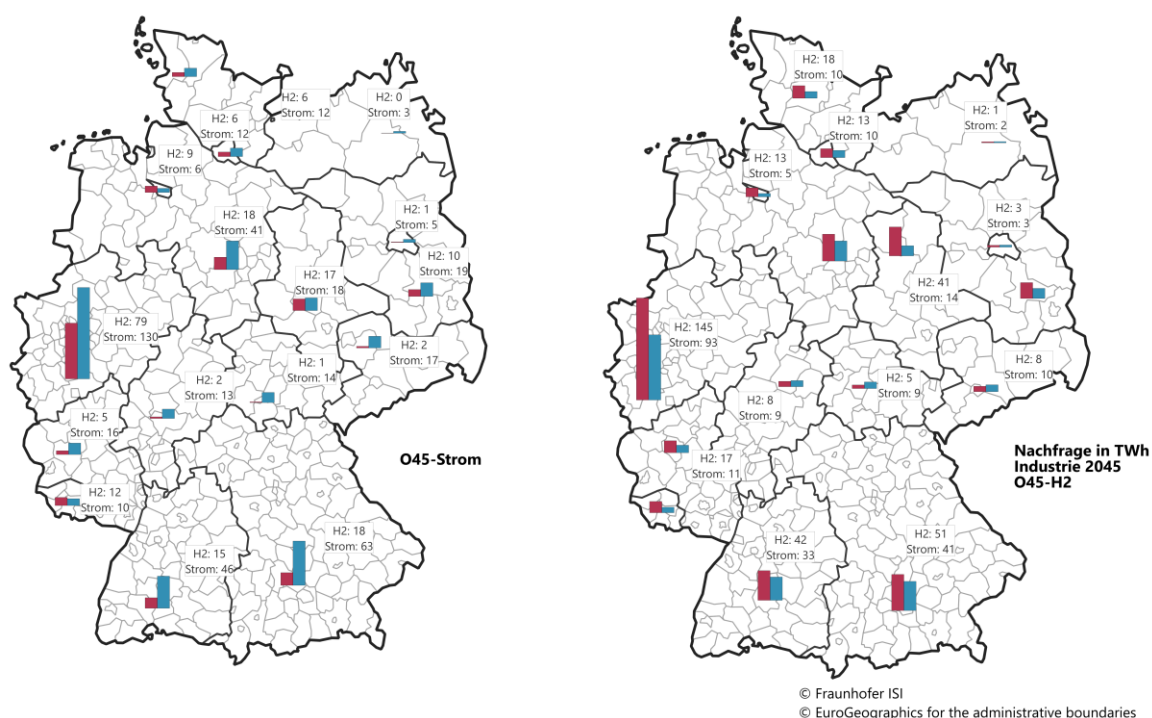
Bei der Bewertung der regionalen Nachfrage sollten folgende wichtige Unsicherheiten bezüglich der Standorte berücksichtigt werden:

- Standortentscheidungen, die die Schließung oder Neuerrichtung von Produktionsanlagen zur Folge haben, können in der Modellierung nicht antizipiert werden. Diese können, je nach Produktionsprozess, ein relevanter Faktor in der Entwicklung der regionalen Nachfrage sein.
- Die Umstellung von Produktionsanlagen auf klimaneutrale Prozesse verläuft an jedem Standort zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Diese individuellen Transformationspfade haben einen Einfluss auf den Hochlauf der Wasserstoffnachfrage und wurden in der Modellierung nicht diskret berücksichtigt.
- Die Ansiedlung neu aufzubauender Produktionsanlagen findet nicht zwingend dort statt, wo die zu ersetzenden fossilen Anlagen heute bestehen. Die trifft insbesondere auf die Standorte

der Petrochemie (Raffinerien) zu, die wichtige Grundstoffe wie HVCs in den heutigen Prozessen als Nebenprodukt herstellen.

Die regionale Nachfrage nach Strom und Wasserstoff durch die Industrie im Jahr 2045 entwickelt sich tendenziell ähnlich wie die nationale Nachfrage (siehe Abbildung 36). Im Szenario O45-Strom verzeichnet der Großteil der Bundesländer 2045 den höchsten Bedarf an Strom, während im Szenario O45-H₂ in vielen Bundesländern der Wasserstoffbedarf den Strombedarf übersteigt. In Bundesländern mit einer hohen Anzahl an Standorten energieintensiver Industrien ist die Nachfrage proportional ebenfalls höher.

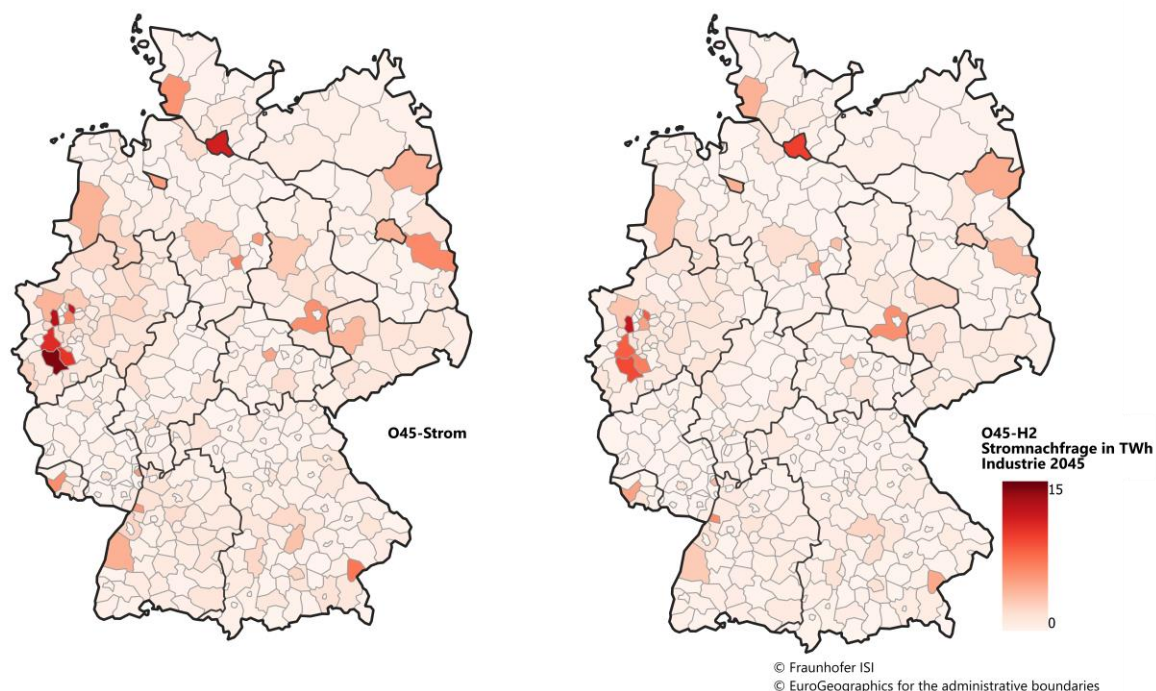
Abbildung 36: Wasserstoff- und Stromnachfrage in den Bundesländern im Jahr 2045



Die **Elektrifizierung führt zu einem strukturellen Wandel** der industriellen Energienachfrage in den meisten Regionen. In Abbildung 37 ist die regionale Stromnachfrage nach Landkreisen und kreisfreien Städten im Jahr 2045 der beiden Szenarien dargestellt. Unter den oben genannten Annahmen steigt die Stromnachfrage bis 2045 durch die fortschreitende Elektrifizierung in den meisten Regionen an. Ein wichtiger Treiber ist die Elektrifizierung der Prozesswärme. Elektrisch betriebene Öfen können zu einer erheblichen Steigerung der regionalen Stromnachfrage führen, insbesondere wenn die Region eher durch wenige energieintensive Anlagen geprägt ist. Deutlich stärker ist aber der Effekt von angekündigten Batteriefabriken in den Regionen, die derzeit eine geringe industrielle Stromnachfrage aufweisen. Insgesamt ist in den meisten Regionen von einer Steigerung der Stromnachfrage im Industriesektor bis 2045 im Vergleich zum derzeitigen Stand auszugehen, abhängig von den jeweilig angesiedelten Unternehmen und Prozessen. Besonders energieintensive Prozesse sowie Batteriefabriken führen meist zu einer überdurchschnittlichen Steigerung der Stromnachfrage. Die Szenarien haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der regionalen Stromnachfrage. So führt das Szenario O45-Strom zu einer Steigerung der Stromnachfrage in nahezu allen Regionen, davon zum Großteil über 50 %, teilweise um mehrere Faktoren. Im Szenario O45-H₂ kommt es dagegen in 70 Regionen zu einer Senkung des Stromverbrauchs im Vergleich zum derzeitigen Stand, und nur in 27 Regionen kommt es zu einer Steigerung von über 50 %. Der Rückgang ist in Regionen mit einer geringen absoluten Stromnachfrage zu beobachten, in denen sich Effizienzfortschritte von Querschnittstechniken wie

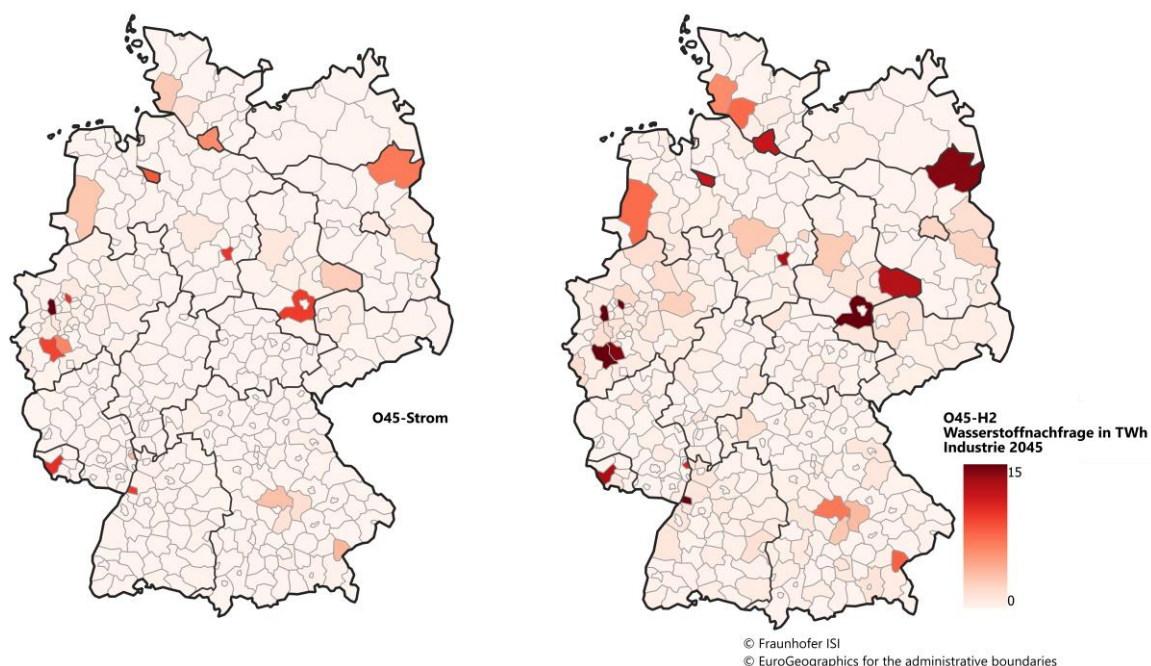
Elektromotoren stark auswirken sowie einige wenige Regionen mit Prägung durch die Chemieindustrie, die bspw. durch effizientere Chlorherstellungsverfahren oder Ammoniakimporte weniger Strom benötigen.

Abbildung 37: Stromnachfrage in den Landkreisen und kreisfreien Städten im Jahr 2045



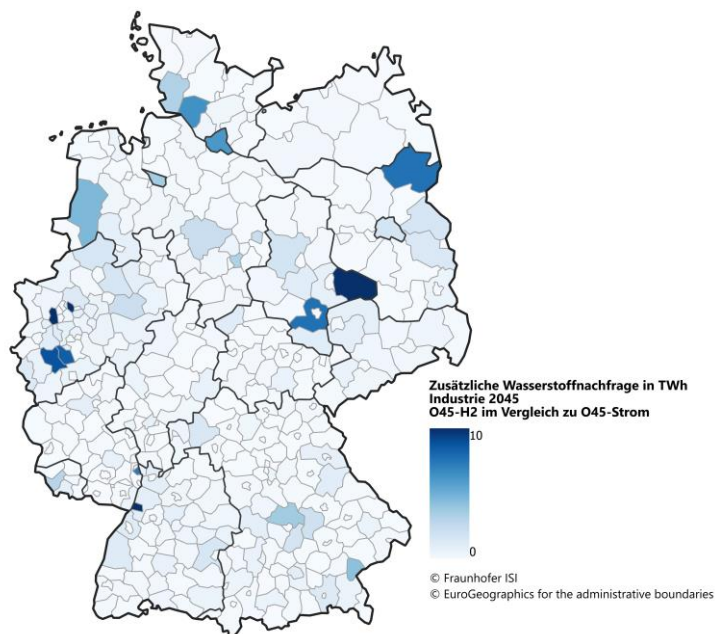
Die **regionale Nachfrage nach Wasserstoff** im Jahr 2045 ist für beide Szenarien in Abbildung 38 dargestellt. In den meisten Regionen ist der Wasserstoffbedarf im Jahr 2045 unter 0,5 TWh, wobei in O45-H₂ mehr Regionen eine Nachfrage in dieser Größenordnung aufweisen. Dies ist getrieben durch Wasserstoff als Energieträger für die Prozesswärmeerzeugung. In 25 Regionen in O45-Strom, bzw. 63 Regionen in O45-H₂, übersteigt die Nachfrage 1 TWh. Haupttreiber in diesen Regionen ist der Bedarf einzelner Industriestandorte. Dies sind die heutigen ca. 20 Standorte mit Stahlherstellung, Ammoniakproduktion und Steamcracker (HVCs). Für diese wird angenommen, dass bis 2045 je nach Szenario zur Herstellung von Methanol und Ammoniak Wasserstoff als Rohstoff eingesetzt wird. Darüber hinaus wird Wasserstoff für die Reduktion des Eisenerzes zur Stahlherstellung benötigt. Die Annahmen für die chemische Grundstoffindustrie sind, dass bereits existierende Methanolstandorte in Deutschland in vergleichbarer Größenordnung zu heute auf Methanolproduktion aus grünem Wasserstoff (MtO) umstellen. Die restlichen benötigten Mengen von grünem Methanol werden durch die Raffineriestandorte hergestellt. Heutige Standorte der Ethylen- und HVC-Produktion stellen teilweise auf elektrisch betriebene Steamcracker um, die Synthese aus Methanol zu Ethylen übernehmen ebenfalls die Raffineriestandorte als integrierten Prozess. Daraus folgt, dass die mögliche Produktionsroute für grünes Ethylen und HVC hauptsächlich an den heutigen Raffineriestandorten angesiedelt ist und damit die regionale Energienachfrage, insbesondere nach Wasserstoff und Strom, in diesen Standorten zum Teil erheblich steigt.

Abbildung 38: Wasserstoffnachfrage in den Landkreisen und kreisfreien Städten im Jahr 2045



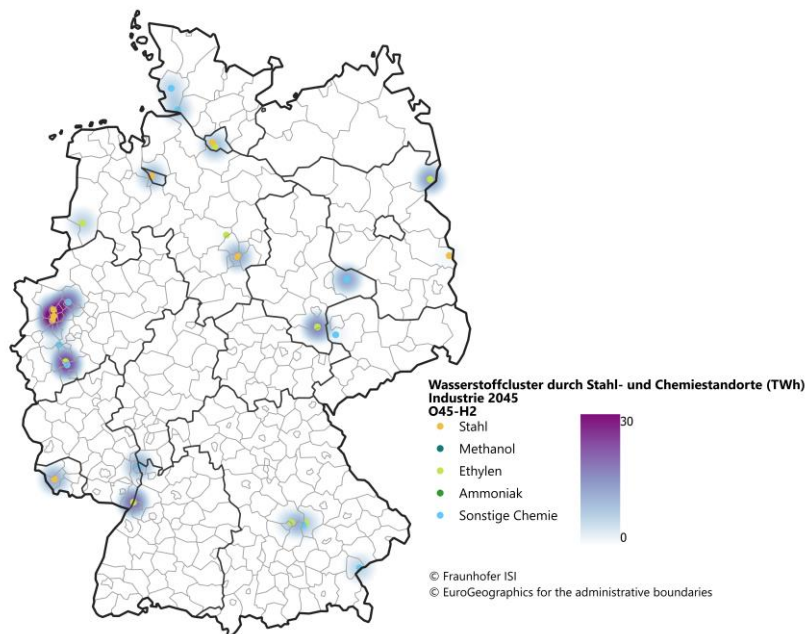
In Abbildung 39 ist der zusätzliche Wasserstoffbedarf in den Regionen in O45-H₂ im Vergleich zu O45-Strom dargestellt. Die Schwerpunkte der Wasserstoffnachfrage im Szenario O45-H₂ sind, ähnlich zum Szenario O45-Strom, die ca. 20 großen Chemie- und Stahl-Standorte. Die Regionen mit einem hohen zusätzlichen Bedarf haben bereits in O45-Strom einen hohen Wasserstoffbedarf, da dort Chemie- und Raffineriestandorte angesiedelt sind. Insbesondere wird, anstatt elektrischer Steamcracker in O45-Strom, mehr Methanol in der MtO-Route in O45-H₂ hergestellt. Die Herstellung von Ammoniak ist ein zusätzlicher stofflicher Bedarf in O45-H₂ an den vier existierenden Standorten in Deutschland (vergleiche Abbildung 40). Darüber hinaus gibt es in O45-H₂ einen breiten Bedarf in weiteren Regionen, die Wasserstoff für die Prozesswärme einsetzen, wobei die absolute Nachfrage in diesen Regionen etwa eine Größenordnung geringer ist wie in den Regionen mit energieintensiven Prozessen der Stahl- und Chemieindustrie. Durch den breiten Einsatz von Wasserstoff zur Versorgung der Prozesswärme in allen Branchen zeigt sich eine deutlich weitere Verteilung über die Regionen Deutschlands, als dies im Szenario O45-Strom der Fall ist.

Abbildung 39: Vergleich von O45-H₂ zu O45-Strom im Jahr 2045: Zusätzliche Wasserstoffnachfrage im Jahr 2045 in den Landkreisen und kreisfreien Städten



Die 20 Regionen mit der höchsten Wasserstoffnachfrage 2045 haben kumuliert einen Anteil von 64 % an der gesamten Wasserstoffnachfrage in Deutschland, sodass die Nachfrage nach Wasserstoff sehr punktuell ist, wie in Abbildung 40 durch die Cluster visualisiert. Im Jahr 2045 können sich für diese punktuellen Bedarfe zum Teil erhebliche Mengen in einzelnen NUTS 3 Regionen ergeben, bis zu 49 TWh für Regionen mit Stahlherstellung, sowie bis zu 21 TWh für Regionen mit Raffinerie- und Grundstoffchemie. Verbrauchsschwerpunkte liegen entlang der Standorte für diese Prozesse, vom Chemiedreieck Bayern, über die Raffinerie und Chemiestandorte im Südwesten, im Ruhrgebiet und Großraum Köln, bis hin zu ostdeutschen Standorten und an der friesischen Küste. Dies verdeutlicht, dass eine **Wasserstoffinfrastruktur** sich an diesen großen Verbraucherzentren orientieren sollte. Die restlichen Regionen haben nur geringe Bedarfe im Vergleich zu den großen Regionen.

Abbildung 40: Wasserstoffcluster durch Standorte der Stahl- und Chemieindustrie im Jahr 2045.



Die szenariobasierte Analyse der regionalen Energienachfrage der Industrie zeigt auf, in welcher Bandbreite neue Verbraucher und die Veränderung der Produktion Einfluss insbesondere auf die Strom- und Wasserstoffnachfrage hat. Grundlage ist, dass die bisher bestehenden Standorten die Produkte mit derzeit vergleichbaren Marktanteilen weiterhin herstellen, unter Berücksichtigung der nationalen Entwicklungen des Produktionsvolumens und der Diffusion neuer klimafreundlicher Produktionsverfahren in den Szenarien. Die Herstellung von Stahl und chemischer Produkte führt zu einer Steigerung der Stromnachfrage und einer hohen Wasserstoffnachfrage in den entsprechenden, ca. 20 Regionen. Wasserstoff wird in O45-H₂ in weiteren Prozessen eingesetzt, zur Erzeugung der Prozesswärme auch in anderen Sektoren, und führt daher zu einer breiteren Verteilung der regionalen Nachfrage.

A.1 Anhang

Begleitend zum Bericht ist auf www.langfristszenarien.de ein Datenexplorer mit Annahmen und Ergebnissen der Modellrechnungen verfügbar. Die Daten der Tabellen und Diagramme des Berichts sind in Form einer Excel-Datei verfügbar.

7 Literaturverzeichnis

Afzal, Shaik; Singh, Avantika; Nicholson, Scott R.; Uekert, Taylor; DesVeaux, Jason S.; Tan, Eric C. D. et al. (2023): Techno-economic analysis and life cycle assessment of mixed plastic waste gasification for production of methanol and hydrogen. In: *Green Chem.* 25 (13), S. 5068–5085. DOI: 10.1039/D3GC00679D.

Arens, M.; Vogl, V. (2019): Can we find a market for green steel? In: *Steel Times International* 43 (4), S. 59–63.

Arpagaus, Cordin (2018): Hochtemperatur-Wärmepumpen: VDE-Verlag.

ASTIER, J.; KRUG, J.; DEPRESSIGNY, Y. (1982): Technico-economic potentialities of hydrogen utilization for steel production. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 7 (8), S. 671–679. DOI: 10.1016/0360-3199(82)90192-6.

Bazzanella, Alexis Michael; Ausfelder, Florian (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Dechema. Frankfurt.

Bringezu, Stefan; Ritthoff, Michael; Steger, Sören; Bahn-Walkowiak, Bettina (2015): Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie: Analyse des Status quo und Perspektiven.

Chan, Yeen; Petithuguenin, Laurent; Fleiter, Tobias; Herbst, Andrea; Arens, Marlene; Stevenson, Paul (2019): Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of industry. Part 1: Technology Analysis. ICF; Fraunhofer ISI. London.

Dai, Qiang; Kelly, Jarod C.; Gaines, Linda; Wang, Michael (2019): Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. In: *Batteries* 5 (2), S. 48. DOI: 10.3390/batteries5020048.

Danish Energy Agency (2020): Technology data industrial process heat. Online verfügbar unter <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-industrial-process-heat-and>.

Degen, Florian; Schütte, Marius (2022): Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. In: *Journal of Cleaner Production* 330, S. 129798. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129798.

Elsland, Rainer; Klingler, Anna-Lena; Degner, Patrick; Oswald, Yannick; Wietschel, Martin (2015): Are current regionalisation approaches sufficient to decompose electricity demand? – A German case study. ENERDAY 2015, 10th Conference on Energy Economics and Technology. Dresden.

European Commission (2014): Horizon 2020: Work Programme 2014-2015 - General Annexes. G. Technology Readiness Levels (TRL).

Fasihi, Mahdi; Efimova, Olga; Breyer, Christian (2019): Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. In: *Journal of Cleaner Production* 224, S. 957–980. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.

Fischedick, Manfred; Marzinkowski, Joachim; Winzer, Petra; Weigel, Max (2014): Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. In: *Journal of Cleaner Production* 84, S. 563–580. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.063.

Fleiter, Tobias; Haendel, Michael; Klobasa, Marian; Lux, Benjamin; Khanra, Manish; Männer, Wolfgang et al. (2024a): Flexibilisierung elektrifizierter Industrieprozesse. Eine Analyse der technischen und ökonomischen Herausforderungen aus Unternehmens- und Systemperspektive. Hg. v. Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI). Cottbus. Online

verfügbar unter https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916_KEI_Studie_FlexlPro_final_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2024.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Herbst, Andrea; Elsland, Rainer; Klingler, Anna-Lena; Manz, Pia; Eidelloth, Stefan (2018): A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. In: *Energy Strategy Reviews* 22, S. 237–254. DOI: 10.1016/j.esr.2018.09.005.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Hirzel, Simon; Neusel, Lisa; Aydemir, Ali; Schwotzer, Christian et al. (2023a): CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung. Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. ReFoPlan-Projekt 3718410030. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung; Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen University. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Manz, Pia; Neuwirth, Marius; Herbst, Andrea (2022): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 – Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Industrie. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Manz, Pia; Neuwirth, Marius; Herbst, Andrea (2023b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. T45 Welten Modul Industriesektor. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Neusel, Lisa; Hirzel, Simon; Neuwirth, Marius; Schwotzer, Christian et al. (2024b): CO₂-neutrale Prozesswärme durch Elektrifizierung und Einsatz von Wasserstoff. Policy Brief. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/policy-briefs/2024-07_policy_brief_prozesswaerme_co2-neutral_elektrifizierung_wasserstoff.pdf, zuletzt geprüft am 06.08.2024.

Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang (Hg.) (2013): Energieverbrauch und CO₂ Emissionen industrieller Prozesstechniken - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Fraunhofer ISE, PSE Projects GmbH (2024): Photovoltaics Report.

Ghenai, Chaouki (Hg.) (2012): Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment. Life Cycle Analysis of Wind Turbine.

Harthan, Ralph O.; Förster, Hannah; Brugger, Heike; Fleiter, Tobias; Deurer, Jana; Steinbach, Jan et al. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Hg. v. Umweltbundesamt.

Herbst, Andrea (2017): Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem „bottom-up“ Energienachfrage-Modell für die Industrie. Eine Fallstudie über die Stahlindustrie. Dissertation. Europa-Universität Flensburg, Flensburg. Institut für Umwelt-, Sozial- und Humanwissenschaften. Online verfügbar unter <https://www.zhb-flensburg.de/fileadmin/content/spezial-einrichtungen/zhb/dokumente/dissertationen/herbst/dissertation-andrea-herbst-touniversityflensburg08052017-forpublication.pdf>.

IEA (2018): Technology Roadmap. Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.

Isoli, Niccolo; Chaczykowski, Maciej (2017): Conceptual design of multi-source CCS pipeline transportation network for Polish energy sector. In: *E3S Web Conf.* 22, S. 69. DOI: 10.1051/e3sconf/20172200069.

Kopernikus-Geschäftsstelle, Projektträger Jülich (30.03.2021): Glasherstellung mit Grünem Wasserstoff erstmals erfolgreich getestet. Julius Heinrichs, Öffentlichkeitsarbeit Kopernikus. Online verfügbar unter https://www.kopernikus-projekte.de/aktuelles/news/glasherstellung_mit_guenem_wasserstoff_erstmalig_erfolgreich_getestet et.

Kuramochi, Takeshi; Ramírez, Andrea; Turkenburg, Wim; Faaij, André (2012): Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 38 (1), S. 87–112. DOI: 10.1016/j.pecs.2011.05.001.

Larrain, Macarena; van Passel, Steven; Thomassen, Gwenny; van Gorp, Bart; Nhu, Trang T.; Huysveld, Sophie et al. (2021): Techno-economic assessment of mechanical recycling of challenging post-consumer plastic packaging waste. In: *Resources, Conservation and Recycling* 170, S. 105607. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105607.

Lindner, Christoph; Schmitt, Jan; Fischer, Elena; Hein, Julia (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Hg. v. BKV GmbH, PlasticsEurope Deutschland e. V. und BDE Bunderverband der Deutschen Entsorgungs- Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. Conversio Market & Strategy GmbH.

Manz, Pia; Kermeli, Katerina; Persson, Urban; Neuwirth, Marius; Fleiter, Tobias; Crijns-Graus, Wina (2021): Decarbonizing District Heating in EU-27 + UK: How Much Excess Heat Is Available from Industrial Sites? In: *Sustainability* 13 (3), S. 1439. DOI: 10.3390/su13031439.

Material Economics (2018): The Circular Economy - a powerful force for climate mitigation. Material Economics.

Methanol Institute (Hg.) (2022): Carbon Footprint Of Methanol. Online verfügbar unter https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2022/01/CARBON-FOOTPRINT-OF-METHANOL-PAPER_1-31-22.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2024.

Milford, Rachel L.; Allwood, Julian M.; Cullen, Jonathan M. (2011): Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO₂ abatement in the steel and aluminium sectors. In: *Resources, Conservation and Recycling* 55 (12), S. 1185–1195. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.021.

Milford, Rachel L.; Pauliuk, Stefan; Allwood, Julian M.; Müller, Daniel B. (2013): The roles of energy and material efficiency in meeting steel industry CO₂ targets. In: *Environmental science & technology* 47 (7), S. 3455–3462. DOI: 10.1021/es3031424.

Münnich, Paul, Metz, Julia, Hauser, Philipp D.; Kohn, Andreas; Mühlpointner, Thomas (2022): Power-2-Heat. Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie. Agora Industrie. Berlin.

Neuwirth, Marius; Fleiter, Tobias; Manz, Pia; Hofmann, René (2022a): The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany. In: *Energy Conversion & Management* (accepted, not yet published).

Neuwirth, Marius; Fleiter, Tobias; Manz, Pia; Hofmann, René (2022b): The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany. In: *Energy Conversion and Management* 252, S. 115052. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115052.

Pérez-Fortes, Mar; Schöneberger, Jan C.; Boulamanti, Aikaterini; Tzimas, Evangelos (2016): Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment. In: *Applied Energy* 161, S. 718–732. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.067.

Pfeifer, Herbert; Nacke, Bernard; Beneke, Franz (Hg.) (2011): Praxishandbuch Thermoprozessstechnik. Band II: Anlagen Komponenten Sicherheit: Vulkan-Verlag GmbH.

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2020): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. In: *RESCUE-Studie. Climate Change, Dessau-Roßlau*. Accessed 6.

Rehfeldt, M.; Worrell, E.; Eichhammer, W.; Fleiter, T. (2020): A review of the emission reduction potential of fuel switch towards biomass and electricity in European basic materials industry until 2030. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120, S. 109672. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109672.

Rehfeldt, Matthias; Bussmann, Simon; Fleiter, Tobias; Rissman, Jeffrey (2024): Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Hg. v. Agora Industrie. Online verfügbar unter https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2023/2023-20_IND_Electrification_Industrial_Heat/A-IND_329_04_Electrification_Industrial_Heat_WEB.pdf.

Rehfeldt, Matthias; Fleiter, Tobias; Worrell, Ernst (2018): Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. In: *Journal of Cleaner Production* 187, S. 98–110. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.179.

Rubin, Edward S.; Davison, John E.; Herzog, Howard J. (2015): The cost of CO₂ capture and storage. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40, S. 378–400. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.05.018.

Schneider, Clemens; Samadi, Sascha; Holtz, Georg; Kobieta, Georg; Lechtenböhmer, Stefan; Witecka, Wido (2019): Klimaneutrale Industrie. Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende.

Smith, Collin; Hill, Alfred K.; Torrente-Murciano, Laura (2020): Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. In: *Energy Environ. Sci.* 13 (2), S. 331–344. DOI: 10.1039/C9EE02873K.

Stemmermann, P.; Schweike, U.; Garbev, K.; Beuchle, G.; Möller, H. (2010): Celitement—a sustainable prospect for the cement industry. In: *Cement International* 8 (5), S. 52–66.

Stork, Michiel; Beer, Jeroen de; Lintmeijer, Niki; Ouden, Bert den (2018): Chemistry for Climate: Ating on the need for speed - Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050. Hg. v. Ecofys und VNCI Berenschot. Utrecht.

Umweltbundesamt; BMWi (2019): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2013): Das Energie-Sparschwein. Informationen zum Wärmeschutz und zur Heizenergieeinsparung für Eigenheimbesitzer und Bauherren.

van Delft, Y.; Kler, R. de (2017): Matching processes with electrification technologies. Final report of the E-match project. Hg. v. ECN.

Vogl, Valentin; Åhman, Max; Nilsson, Lars J. (2018): Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. In: *Journal of Cleaner Production* 203, S. 736–745. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279.

Volk, Rebekka; Stallkamp, Christoph; Steins, Justus J.; Yogish, Savina Padumane; Müller, Richard C.; Stapf, Dieter; Schultmann, Frank (2021): Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study. In: *J of Industrial Ecology* 25 (5), S. 1318–1337. DOI: 10.1111/jiec.13145.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2021): Stahlschrott-Außenhandel. Statistischer Bericht 2021. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Online verfügbar unter <https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2111-Statistischer-Bericht-Stahlschrott.pdf>, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

Wissenschaftliche Dienste (Hg.) (2022): Studien zu Ökobilanzen von Gebäudedämmstoffen. Deutscher Bundestag.

Worldsteel Association (2019): Steel Statistical Yearbook. Concise version. Worldsteel Association. Online verfügbar unter [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7aa2a95d-448d-4c56-b62b-b2457f067cd9/SSY19 %20concise%20version.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7aa2a95d-448d-4c56-b62b-b2457f067cd9/SSY19%20concise%20version.pdf), zuletzt geprüft am 2021.

Ylva Kloo, Alexander Scholz, Svenja Theisen (2023): Wege zu einer Netto-Null-Chemieindustrie. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH.

ZEP (2011): The costs of CO2 transport: post-demonstration CCS in the EU. European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. Brussels.

Zettl, Elisabeth; Hawthorne, Craig; Joas, Reinhard; Lahl, Uwe; Litz, Benjamin; Zeschmar-Lahl, Barbara; Joas, Anke (2014): Analyse von Ressourceneffizienzpotenzialen in KMU der chemischen Industrie. In: *VDI ZRE Publikationen*.