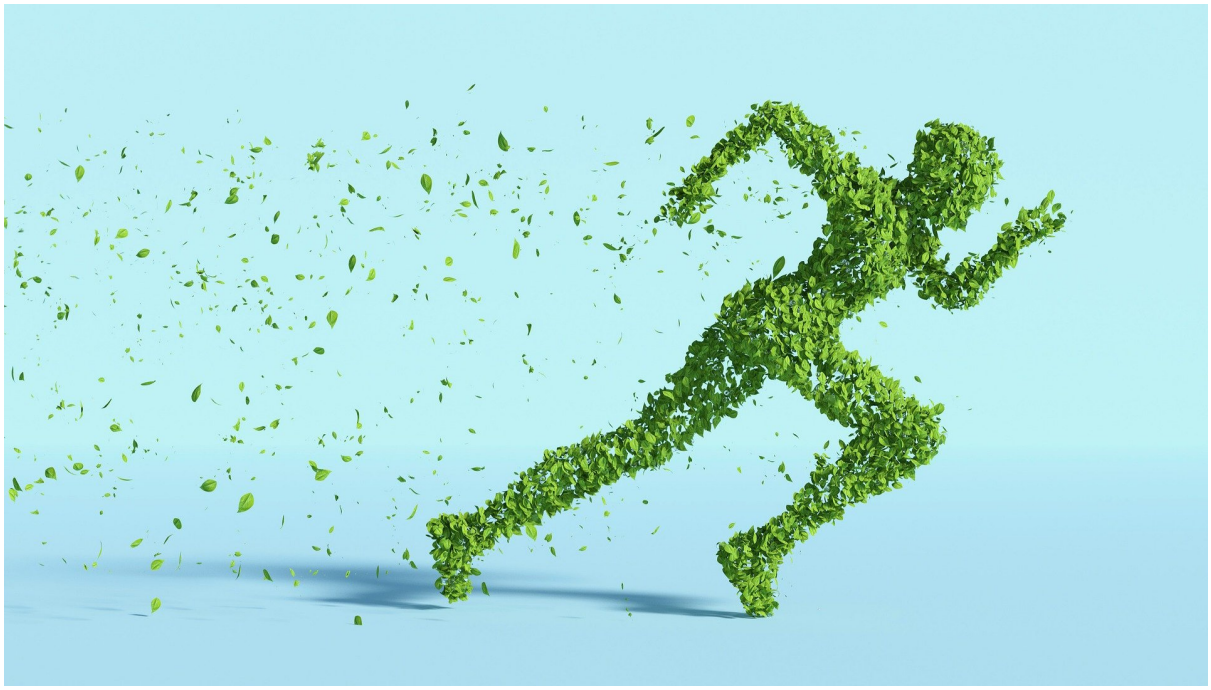


Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3

-T45-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); Marius Neuwirth (Fraunhofer ISI);
Dr. Andrea Herbst (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

Oktober 2023

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 8
1.1 Einleitung 8
1.2 Schlussfolgerungen 10

2 Methodik: Das Modell FORECAST 15
2.1 Überblick 15
2.2 Regionale Auflösung 16
2.3 Die Energie- und Emissionsbilanz als Grundlage 17
2.3.1 Emissionsbilanz und prozessbedingte Emissionen 17
2.3.2 Der stoffliche Einsatz von Energieträgern in der Energiebilanz 19

3 Szenariodefinition 21
3.1 Überblick der Szenariodefinition T45-Szenarien und Sensitivitäten 21
3.2 Neuerungen in den T45-Szenarien gegenüber den TN-Szenarien 24
3.3 Szenariodefinition aus Branchen-Perspektive 26
3.3.1 Herstellung von Eisen und Stahl 26
3.3.2 Verarbeitung Steine u. Erden (Zement und Kalk) 29
3.3.3 Grundstoffchemie 31
3.4 Annahmen und techno-ökonomische Parameter 33
3.4.1 Wirtschaftliche Entwicklung des Industriesektors 33
3.4.2 Neue Verbraucher: Batteriefabriken 35
3.4.3 Kreislaufwirtschaft und Umstellung auf Sekundärrouten 36
3.4.4 Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette 37
3.4.5 Energieeffizienz 38
3.4.6 Prozesswechsel auf klimafreundliche Produktionsverfahren 39
3.4.7 Brennstoffwechsel in Öfen und Dampferzeugung 41
3.4.8 CO_2-Abscheidung, Transport und Speicherung 44

4 Ergebnisse T45-Grundszenarien 46
4.1 Treibhausgasemissionen 46
4.1.1 Übersicht 46
4.1.2 CO_2-Abscheidung, Nutzung und Speicherung 47
4.1.3 Detaildarstellung prozessbedingte Treibhausgasemissionen 50
4.2 Energienachfrage 52
4.2.1 Übersicht 52
4.2.2 Branchenbetrachtung 64
4.2.3 Regionale Energienachfrage 69

5 Varianten T45-Red-Eff und T45-RedGas 75

5.1 Definition und Annahmen 75
5.2 Ergebnisse 76

A.1 Anhang 82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellverbund im Projekt ... 8
Abbildung 2: THG-Emissionen des Industriesektors im Jahr 2019 nach Anwendungen ... 9
Abbildung 3: Überblick der Modellstruktur von FORECAST ... 16
Abbildung 4: Ablaufschema der Kalibrierung auf NIR/CRF-Daten ... 19
Abbildung 5: Nicht-energetischer Bedarf nach AGEB (2018) ... 20
Abbildung 6: Entwicklung der Rohstahlproduktion nach Verfahren ... 27
Abbildung 7: Produktionskapazität von Rohstahl ... 28
Abbildung 8: Entwicklung der Zementproduktion ... 31
Abbildung 9: Annahmen zur Produktion von Ethylen nach Verfahren ... 32
Abbildung 10: Annahmen zur Bruttowertschöpfung der Industrie in den T45-Szenarien ... 34
Abbildung 11: Annahmen der Produktionsmengen energieintensiver Produkte ... 35
Abbildung 12: Spezifische Investition verschiedener Dampferzeuger ... 43
Abbildung 13: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors ... 46
Abbildung 14: Schematische Darstellung des CO_2-Kreislaufs ... 48
Abbildung 15: Entwicklung des CO_2-Bedarfs und CO_2-Quellen ... 48
Abbildung 16: Mögliches CO_2-Netz im Jahr 2045 inkl. Quellen und Senken ... 49
Abbildung 17: Energieverbrauch im Industriesektor ... 53
Abbildung 18: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Industriesektor ... 54
Abbildung 19: Modellierte Temperaturverteilung des Prozesswärmebedarfs (2019) ... 55
Abbildung 20: Endenergiebedarf in der Prozesswärme ... 56
Abbildung 21: Endenergiebedarf in der Dampf- und Warmwassererzeugung ... 57
Abbildung 22: Endenergiebedarf in Industrieöfen ... 58
Abbildung 23: Einsatz von Wasserstoff im Industriesektor in den T45-Grundszenarien ... 58
Abbildung 24: Direkter Einsatz von Strom im Industriesektor ... 59
Abbildung 25: Einsatz von PtG und PtL im Industriesektor in den T45-Grundszenarien ... 60
Abbildung 26: Stromäquivalente im Industriesektor nach Anwendungen ... 61
Abbildung 27: Energieintensität der industriellen Wertschöpfung ... 63
Abbildung 28: Endenergiebedarf im Subsektor Metallerzeugung ... 64
Abbildung 29: Endenergiebedarf im Subsektor Verarbeitung von Steinen und Erden ... 65
Abbildung 30: Nicht-energetischer Verbrauch fossiler Energieträger ... 67
Abbildung 31: Stoffliche Nutzung nach Energieträger in den T45-Grundstzenarien ... 68
Abbildung 32: Prozentuale Veränderung der regionalen Stromnachfrage im Industriesektor ... 70

Abbildung 33: Regionaler Hochlauf der Wasserstoffnachfrage im Szenario T45-Strom 71
Abbildung 34: Regionaler Hochlauf der Wasserstoffnachfrage im Szenario T45-H2 72
Abbildung 35: Wasserstoffnachfrage in den Regionen mit der höchsten Nachfrage 73
Abbildung 36: Prozentuale Veränderung der regionalen Methannachfrage 74
Abbildung 37: Umsetzungswahrscheinlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen 76
Abbildung 38: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors 77
Abbildung 39: Verlauf der Treibhausgasemissionen 78
Abbildung 40: Entwicklung des Endenergiebedarf im Industriesektor 79
Abbildung 41: Entwicklung des Erdgasbedarfs im Industriesektor 80
Abbildung 42: Energiebedarf ausgewählter Energieträger für Prozesswärme 2030 81
Abbildung 43: Einsatz von Wasserstoff im Industriesektor in den Sensitivitäten 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der T45-Szenarien für die Industrie 12
Tabelle 2: Verteilschlüssel und statistische Größen für die regionale Auflösung 17
Tabelle 3: Definition der T45-Grundszenarien für den Industriesektor 21
Tabelle 4: Annahmen zu Prozess- und Brennstoffwechsel im Industriesektor 24
Tabelle 5: Vermeidungshebel Metallerzeugung 28
Tabelle 6: Vermeidungshebel Subsektor Steine- und Erden 30
Tabelle 7: Vermeidungshebel Grundstoffchemie 32
Tabelle 8: Bruttowertschöpfung und Wachstum 33
Tabelle 9: Annahmen zur Kreislaufwirtschaft 36
Tabelle 10: Annahmen zum Fortschritt der Materialeffizienz in den T45-Szenarien 38
Tabelle 11: Übersicht der Annahmen zu klimafreundlichen Produktionsverfahren 40
Tabelle 12: Technologieannahmen Prozessdampf- und Warmwasser 42
Tabelle 13: Angenommene Parameter CCU/S 45
Tabelle 14: Kosten- und Mengenabschätzungen CCU/S 50
Tabelle 15: Prozessbedingte Treibhausgasemissionen in T45-Strom 51
Tabelle 16: Entwicklung der Energieintensität in den T45-Grundszenarien 62
Tabelle 17: Kreislaufwirtschaftsquoten ausgewählter Produkte 75

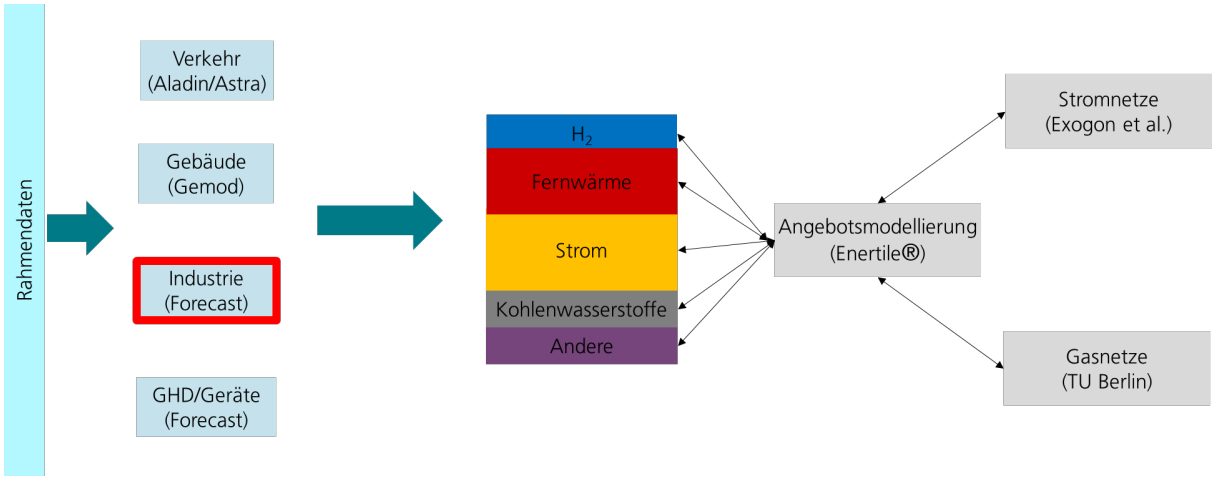
1 Zusammenfassung

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 mit 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, GHD&Geräte[1], Energieangebot, Gasnetze und Stromnetze, um eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen.

Abbildung 1: Modellverbund im Projekt



In einem ersten Schritt wurden im Jahr 2021 drei Szenarien veröffentlicht, die jeweils stark auf den Einsatz eines Energieträgers für die Dekarbonisierung setzen (TN-Szenarien, siehe www.langfristszenarien.de). Der vorliegende Bericht ist Teil einer weiterführenden Szenariorechnung, welche die bereits veröffentlichten 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 Grundszenarien, T45-Strom, T45-PtG/PtL, T45-H2, orientieren sich an ähnlichen drei Szenariowelten wie bereits die TN-Szenarien. Das Szenario T45-Strom setzt auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Das Szenario T45-H2 setzt auf eine starke

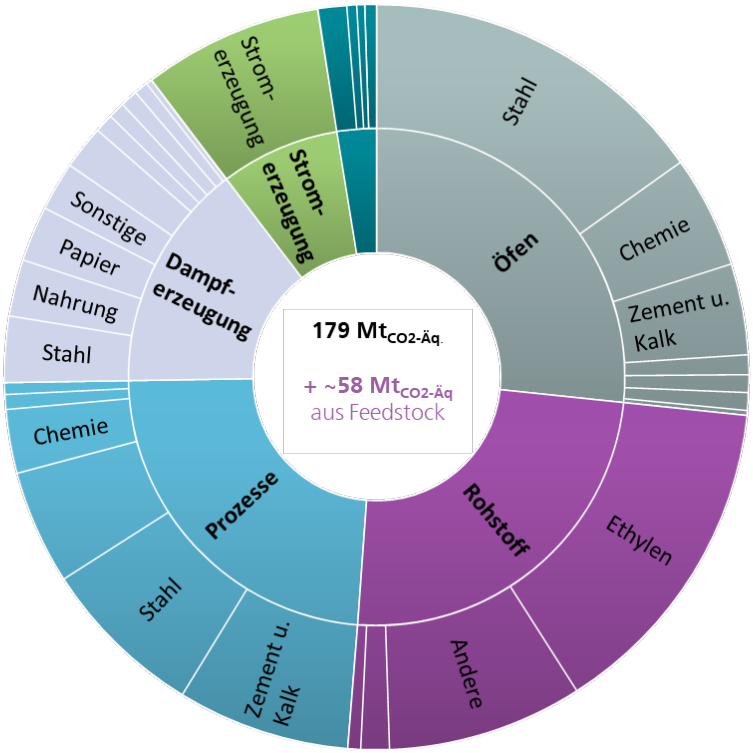
[1] Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie Haushaltsgeräte

Nutzung von Wasserstoff im Energiesystem. Das Szenario T45-PtG/PtL setzt auf eine starke Nutzung von synthetischen Kohlenwasserstoffen im Energiesystem.

Dieses Berichtsmodul enthält die Methodik und die Ergebnisse für den Bereich Industrie. Es werden zunächst Methodik, Annahmen sowie die Konkretisierung der Szenariodefinition für den Industriesektor beschrieben. Für die Quantifizierung der Szenarien wird das Sektormodell FORECAST eingesetzt. Der Modellansatz ermöglicht eine breite Berücksichtigung verschiedener Strategien zum Erreichen der nahezu CO_2-neutralen Industrie, wie beispielsweise der Einsatz CO_2-neutraler Energieträger, der Fortschritt bei Recycling und Materialeffizienz oder CCU/S. Die Ergebnisse werden für die drei Grundszenarien sowie zwei Sensitivitäten vergleichend dargestellt. Es wird besonders auf die Entwicklungen in den Sektoren Grundstoffindustrie, Eisen und Stahl sowie Zement und Kalk eingegangen, da diese mit den höchsten THG-Emissionen die Schlüsselsektoren für die Dekarbonisierung sind (siehe Abbildung 2). Die Ergebnisse der einzelnen Szenarien werden regional auf über 300 einzelne Kreise und kreisfreie Städte verteilt ((NUTS3[2])), um die strukturellen Unterschiede in der nachfolgenden Netzmodellierung zu berücksichtigen.

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

Abbildung 2: THG-Emissionen des Industriesektors im Jahr 2019 nach Anwendungen



Quelle: Fraunhofer ISI, FORECAST

[2] Nomenclature des unités territoriales statistiques

1.2 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Transformation zur nahezu treibhausgasneutral produzierenden Industrie in Deutschland auf unterschiedlichen Technologiepfaden möglich ist. Die drei T45-Grundszenarien T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2 erreichen eine THG-Minderung von etwa 96 bis 97 % im Jahr 2045 gegenüber dem Jahr 1990 (siehe Tabelle 1). Diese Transformation verlangt in allen Branchen eine grundlegende Umstellung der Energieversorgung sowie von Produktionsprozessen und Wertschöpfungsketten, besonders in der energieintensiven Grundstoffindustrie. Wichtige Voraussetzungen für eine nahezu treibhausgasneutrale Produktion sind im Folgenden zusammengefasst.

Schnelle Markteinführung von klimafreundlichen Herstellungsverfahren. Bis zum Jahr 2030 müssen in allen Branchen klimafreundliche Anlagen auf industriellem Niveau betrieben werden und bis zum Jahr 2045 der Anlagenbestand vollständig umgestellt sein. Wichtige Technologiebeispiele sind die Direktreduktion von Eisenerz als Ersatz der bestehenden Hochöfen in der Stahlherstellung, die Umstellung auf CO_2-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 Müll als Ersatzbrennstoff in den Öfen der Zementindustrie. Da alle Zementwerke in den Szenarien mit CO_2-Abscheidung ausgestattet sind, wird ein Großteil ihrer CO_2-Emissionen abgeschieden und entweder genutzt oder gespeichert.

Einsatz großer Mengen von grünem Strom, Wasserstoff und/oder PtG, andere klimaneutrale Energieträger in Nischen. Klimafreundliche Herstellungsverfahren benötigen in den meisten Fällen große Mengen CO_2-neutraler Sekundärenergieträger. Hohe Temperaturen und Energiedichten schließen den direkten Einsatz von Erneuerbaren Energien wie Solarthermie oder Geothermie in vielen Branchen aus. Diese sind 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 allen Szenarien eine wichtige Strategie, aber unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Elektrifizierung der Prozesswärme ist im Szenario T45-Strom mit 161 TWh Strombedarf für die Prozesswärme im Jahr 2045 sehr ausgeprägt, findet aber auch in den Szenarien T45-PtG/PtL und T45-H2 statt, häufig als Teilelektrifizierung mit jeweils knapp über 70 TWh. Im Szenario T45-Strom ist die Elektrifizierung die zentrale Strategie zur klimafreundlichen Bereitstellung von Prozesswärme in nahezu allen Branchen. Ausnahmen sind z. B. die Zement- und Eisenherstellung, deren direkt-elektrischen Technologien sich noch in einer frühen Entwicklungsphase befinden und entsprechend hohe technologische Unsicherheiten aufweisen.

Grüner Wasserstoff und PtG mit großem Potenzial zur CO_2-neutralen Bereitstellung von Prozesswärme. In den meisten Branchen wird der heutige Anlagenbestand in der Prozesswärme mit Erdgas befeuert. Entsprechend sind die Potenziale für eine Umstellung auf PtG sehr groß und technische sowie wirtschaftliche Herausforderungen hängen hauptsächlich mit der Verfügbarkeit von PtG zusammen. Entsprechend ist die Versorgung der Prozesswärme im Szenario T45-PtG vollständig durch PtG dominiert. PtL wird nicht genutzt, Elektrifizierung findet zu kleinen Anteilen statt. Auch die Umstellung auf eine Beheizung mit Wasserstoff ist technisch in vielen Branchen möglich, verlangt aber häufig noch Erprobung und Demonstration auf industriellem Niveau. Auch im Szenario T45-Strom spielt Wasserstoff eine wichtige Rolle in der Prozesswärme. Besonders dort, wo Energiedichten und Temperaturen sehr hoch sind und eine reine Elektrifizierung dadurch sehr aufwendig ist. Ein hybrides System mit Wasserstoff ermöglicht dann die Teilelektrifizierung. Im Szenario T45-H2 ist nahezu die gesamte Prozesswärme über Wasserstoff versorgt, was

deutschlandweit eine engmaschige Versorgung mit Wasserstoff voraussetzt. Elektrifizierung konzentriert sich auf Hochtemperaturwärmepumpen in der Nahrungsmittel- und Papierindustrie sowie ausgewählten Hochtemperaturanwendungen (z. B. Lichtbogenöfen in der Stahlerzeugung, elektrifizierte Dampfspaltöfen in der Chemie) und findet sonst zu geringeren Anteilen statt.

Grüner Wasserstoff oder PtG/PtL sind CO_2-neutrale Rohstoffe für die Chemieindustrie und Reduktionsmittel für die Stahlherstellung. Alle Szenarien benötigen große Mengen Wasserstoff oder PtG/PtL für die Versorgung der Chemieindustrie und die Stahlherstellung. In der Chemieindustrie bestimmt die Herstellung von Olefinen und Aromaten das Bild aufgrund eines sehr hohen Bedarfs an fossilen Energien. Im Jahr 2045 liegt der stoffliche Bedarf der Chemie in den T45-Grundszenarien in etwa auf heutigem Niveau von 250-280 TWh. In den 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 den Szenarien T45-Strom und T45-H2 dominiert Wasserstoff die Rohstoffversorgung mit einem Bedarf von 185 bzw. 230 TWh im Jahr 2045. Zusätzlich wird PtL in elektrischen Steamcrackern eingesetzt und resultiert in einem Bedarf von 84 bzw. 51 TWh. Das Szenario PtG/PtL nutzt ausschließlich Wasserstoffderivate für die Versorgung der Chemieindustrie, was in einem Bedarf von PtG und PtL von knapp 250 TWh alleine für die Rohstoffversorgung im Jahr 2045 resultiert. Zusammen mit dem Bedarf für die Prozesswärme werden in diesem Szenario sogar 388 TWh PtG und PtL benötigt. Noch höher ist der gesamte Wasserstoffbedarf im Szenario T45-H2 mit 437 TWh, aber auch im Szenario T45-Strom ist dieser mit 289 TWh beträchtlich.

Energie- und Materialeffizienz sowie Steigerung der Kreislaufwirtschaft vereinfachen eine klimaneutrale Energieversorgung. In allen drei T45-Grundszenarien sind ambitionierte Fortschritte bei Energie- und Materialeffizienz die Grundlage, um den Bedarf an hochwertigen klimaneutralen Energieträgern möglichst gering zu halten. Die Sensitivität T45-RedEff zeigt basierend auf dem Szenario T45-Strom, welche Auswirkungen ein langsamerer Fortschritt bei Effizienz und Kreislaufwirtschaft hätte. So benötigt die Elektrifizierung der Prozesswärme 66 TWh mehr Strom, der Wasserstoffbedarf steigt um 26 TWh und der Bedarf an PtG und PtL steigt um 64 TWh. In Summe entsteht so mehr als 150 TWh zusätzlicher Bedarf an klimaneutralen Sekundärenergieträgern. Wichtige Fortschritte bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft sind besonders bei den energieintensiven Grundstoffen nötig, die zu einem großen Teil in der Bauwirtschaft genutzt werden. Fortschritte bei Materialeffizienz führen dazu, dass in allen T45-Grundszenarien eine Stagnation oder ein leichter Rückgang bei der Produktionsmenge von Stahl, Zement, Glas und anderen Grundstoffen zu verzeichnen ist.

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 CO_2-Emissionen. Entsprechend wird bis zum Jahr 2045 in allen Szenarien eine CO_2-Abscheidung in der gesamten Zementindustrie und in großen Teilen der Kalkwerke aufgebaut. In den Szenarien T45-H2 und T45-Strom wird CO_2 zu einem Rohstoff und für die Herstellung von High Value Chemicals in der Chemieindustrie eingesetzt. Restmengen werden unterirdisch gespeichert. Über den Einsatz von CO_2-Abscheidung in Müllverbrennungsanlagen wird der CO_2-Kreislauf teilweise geschlossen und der Bedarf an CO_2 für die stoffliche Verwendung in der Chemieindustrie kann gedeckt werden. Im Szenario T45-PtG/PtL werden sämtliche in der Zement- und Kalkindustrie abgeschiedenen CO_2-Emissionen unterirdisch gespeichert. Die insgesamt an Zement- und Kalkwerken abgeschiedenen CO_2-Emissionen sind in den Szenarien in ähnlicher Größenordnung (13 bis 15 Mt_{CO2}).

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der T45-Szenarien für die Industrie

	Einheit	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H2	T45-RedEff	T45-RedGas
Wertschöpfung	%/Jahr	1%	1%	1%	1%	1%
THG-Minderung (2030)	%	58%	56%	59%	57%	58%
THG-Minderung (2045)	%	97%	97%	96%	97%	97%
Energieeffizienz	-	++	++	++	0/+	++
Materialeffizienz und Kreislauf	-	+	+	+	0/+	+
Erdgas (inkl. stofflich) (2030)	TWh	184	222	178	191	103
Biomasse (2045)	TWh	23	26	16	15	22
Wasserstoff (2045)	TWh	289	0	437	315	298
PtG/PtL (2045)	TWh	84	388	51	148	84
Elektrifizierung PtH (2045)	TWh	161	76	72	227	153
CO_2-Abscheidung Zement/Kalk	$MtCO_2$	13	14	15	13	13
CO_2-Abscheidung Müllverbrennung (Außerhalb Industriebilanz)	$MtCO_2$	17	17	17	17	17

Die T45-Grundszenarien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich des Umbaubedarfs im industriellen Anlagenpark sowie der nötigen Energieinfrastruktur. Das Szenario T45-PtG/PtL zeigt den im Szenariovergleich geringeren Umbaubedarf am Anlagenbestand der Industrie und bei der Transportinfrastruktur. Dafür wird der Energieeinsatz vollständig auf einen sehr hochwertigen (und teuren) Energieträger umgestellt. Ausnahmen sind die Branchen Stahl und Chemie: Hier ist auch im Szenario PtG/PtL ein umfangreicher Umbau hin zu neuen CO_2-neutralen Verfahren vorhanden (Ersatz von Hochöfen und fossilen Steamcrackern).

Das Szenario **T45-H2** erfordert besonders auf Seiten der Wasserstofftransportinfrastruktur einen grundlegenden und sehr umfassenden Ausbau – bis in die Verteilebene. Der verlangte Umbau des Anlagenbestandes ist umfassender als im Szenario T45-PtG/PtL, da die Umstellung auf Wasserstoff z. B. den Austausch von Brennern in einer Vielzahl von Industrieöfen und Dampfkesseln verlangt.

Das Szenario **T45-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 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.

Die regionalen Analysen zeigen, dass es sehr große Unterschiede in der Ausprägung der Szenarien zwischen den 401 Regionen gibt. Die Szenarien sind in ihrer Ausprägung in vielen Regionen deutlich extremer als im Bundesdurchschnitt. Regional ist die Industriestruktur durch wenige sehr große Standorte geprägt, die dann einen sehr großen Einfluss auf den Energiebedarf haben. Entsprechend stellen regionale Unterschiede hohe Herausforderungen an lokale Infrastrukturen. Diese wurden für besonders herausgehobene Standorte (Stahl- und Chemieindustrie) dargestellt, können auf lokaler und regionaler Ebene auch andere Branchen und Produktionsstätten betreffen. Die Wasserstoffnachfrage in den Szenarien T45-Strom und T45-H2 ist durch die großen Verbraucher getrieben, so dass ca. 20 Regionen mit energieintensiven Prozessen (v.a. Stahl und Petrochemie) den Großteil der Wasserstoffnachfrage ausmachen. Da in allen Szenarien die Stromnachfrage in Deutschland bis 2045 ansteigt, führt dies in den meisten

Regionen zu einer steigenden Stromnachfrage bis 2045, in einigen Regionen bis zu einem zehnfach höheren Strombedarf. Dies gilt insbesondere, wenn der heutige industrielle Strombedarf auf niedrigem Niveau ist und die Szenarien eine starke Elektrifizierung von Prozesswärmeanwendungen berücksichtigen.

Auch das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes (entsprechend Novelle 2021) im Jahr 2030 kann erreicht werden, verlangt aber schnelle Fortschritte bei den Schlüsseltechniken. Bis zum Jahr 2030 erreichen die Szenarien T45-Strom sowie T45-H2 knapp das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes, welches für den Industriesektor eine Minderung von 58 % gegenüber 1990 vorgibt. Das Szenario T45-PtG/PtL liegt mit 56 % Minderung knapp unter dieser Zielmarke. Der Fehlbetrag liegt im zu erwartenden Bereich der Unsicherheit. Er zeigt aber, dass die in T45-PtG/PtL verfolgte Strategie des massiven Imports von synthetischen Energieträgern ein Risiko für die Zielerreichung darstellt. Entscheidend für die Zielerreichung sind schnelle Fortschritte bei Schlüsseltechniken mit großen Vermeidungspotenzialen. Diese sind im Folgenden beschrieben.

- Der Umbau der Stahlindustrie ermöglicht bereits bis zum Jahr 2030 große Mengen CO_2-intensive Kohle durch Erdgas und Wasserstoff zu ersetzen. In allen Szenarien sind bis zum Jahr 2030 bereits substantielle Produktionskapazitäten von etwa 10 Millionen Tonnen Rohstahl pro Jahr von der Hochofenroute auf das Verfahren der Direktreduktion umgestellt. Dies entspricht knapp einem Drittel der heutigen Produktionskapazität und verlangt schnelle Investitionsentscheidungen. Ein Vergleich mit Ankündigungen der Stahlhersteller sowie mit dem technischen Modernisierungsbedarf zeigt, dass diese Größenordnung möglich ist. In den Szenarien T45-H2 und T45-Strom werden die Direktreduktionsanlagen in einer Übergangsphase hybrid – mit Wasserstoff und Erdgas betrieben – wodurch Flexibilitätspotentiale entstehen und Unsicherheiten der Investitionen reduziert werden können. Im Szenario T45-PtG/PtL werden die Anlagen ausschließlich mit einer Mischung aus Erdgas und PtG versorgt.
- Der großindustrielle Einsatz von Strom, Wasserstoff oder PtG in der Prozesswärme als Ersatz von Erdgas ist Voraussetzung für die Zielerreichung. Die Szenarien T45-Strom und T45-H2 zeigen bis 2030 bereits deutliche Anteile von Strom und Wasserstoff in der Größenordnung von 50 TWh für die Versorgung der Prozesswärme in nahezu allen Branchen gegenüber etwa 13 TWh (Strom) im Jahr 2019. Dieser Ausbau verlangt nicht nur 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 nicht wettbewerbsfähig gegenüber dem Einsatz von Erdgas. In der Transformationsphase kann eine hybride Erzeugung von Prozessdampf über Strom und Erdgas (langfristig Strom und Wasserstoff/PtG) 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)).
- Eine deutliche Beschleunigung des Gasausstiegs ist möglich und führt zu großen Einsparungen. Die T45-Grundszenarien zeigen nur einen langsam sinkenden Einsatz von Erdgas, der sich im Jahr 2030 noch auf 184 bis 222 TWh beläuft. Das Szenario T45-RedGas zeigt die Möglichkeiten eines beschleunigten Gasausstiegs durch zusätzliche Maßnahmen, eine starke Reaktion auf Preissignale und einen schnelleren Wechsel auf Strom und Wasserstoff. Dadurch ist bis zum Jahr 2030 eine Halbierung des Erdgasverbrauchs gegenüber dem Jahr 2019 möglich und damit ein deutlich stärkerer Rückgang als im Szenario T45-Strom. Dafür werden knapp 30 TWh zusätzlicher Strom und Wasserstoff bis 2030 benötigt, was angesichts des ohnehin notwendigen Hochlaufs Erneuerbarer Energieträger im T45 Strom

sehr ambitioniert ist. Zudem ist ein deutlicher Wechsel von Erdgas zu Heizöl zu beobachten. Langfristig, bis zum Jahr 2045 zeigt das Szenario ein T45-Strom ähnliches Bild.

- Deutliche Fortschritte hin zu einer energie- und materialeffizienten Kreislaufwirtschaft vereinfachen die Zielerreichung, sind aber nicht hinreichend. Im Szenario T45-RedEff wird das Sektorziel im Jahr 2030 aufgrund langsamerer Fortschritte bei Energie- und Materialeffizienz sowie Kreislaufwirtschaft knapp verfehlt, unter sonst gleichen Annahmen wie im Szenario T45-Strom. Entsprechend wären größere Mengen CO_2-neutraler Strom oder Wasserstoff und ein nochmals beschleunigter Anlagenaustausch als im Szenario T45-Strom nötig, um das Ziel zu erreichen.
- Schneller Ausbau der Erneuerbaren im Stromsektor sowie die Verfügbarkeit großer Mengen von grünem Wasserstoff bzw. PtG sind Voraussetzung. Anders als in den Sektoren Gebäude und Verkehr ist eine Elektrifizierung der Prozesswärme in vielen Anwendungen nicht mit großen Effizienzgewinnen verbunden. Entsprechend besteht die Gefahr, dass eine Elektrifizierung (oder der Einsatz von Wasserstoff oder PtG) 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.

Eine Bewertung der Zielerreichung im Jahr 2030 ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Alle Szenarien enthalten Annahmen zur Produktionsentwicklung energieintensiver Branchen. Andere 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 2022) ist eine Zielerreichung im Jahr 2030 sehr unwahrscheinlich (Siehe auch Fleiter und Rehfeldt 2022). Zentrale Herausforderungen sind die höheren laufenden Kosten CO_2-neutraler Verfahren, der Infrastrukturausbau, die effektive Umsetzung von CO_2-Preissignalen entlang der Wertschöpfungsketten und die Reduzierung von Unsicherheiten bezüglich großer strategischer Investitionen in CO_2-neutrale Verfahren. Insbesondere geht es für die kommenden Jahre darum, eine klare Perspektive für den wirtschaftlichen, groß-industriellen Betrieb CO_2-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

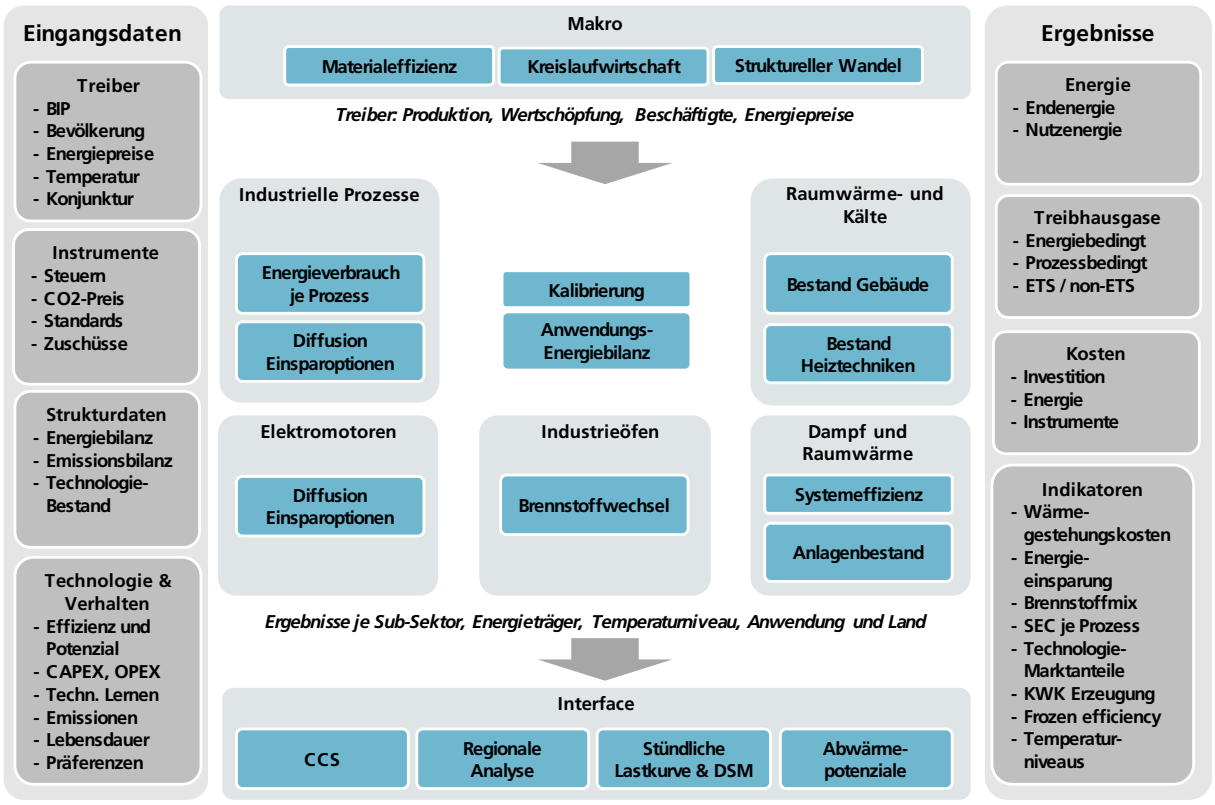
2.1 Überblick

Zur Berechnung der Szenarien für den Industriesektor wird das Modell FORECAST eingesetzt (Fleiter et al. 2018). FORECAST ist ein Bottom-up-Energienachfragemodell. Es bildet die Technologiestruktur der Industrie ab und berechnet Energieverbrauch und Emissionen sowie Kosten auf Prozessebene. FORECAST-Industry ist hierarchisch aufgebaut und 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 separat modelliert. Eingangsdaten für die Modellierung sind übergreifende Aktivitätsgrößen wie die Wirtschaftsleistung je Branche, Energie- und CO_2-Preise, Annahmen zu Instrumenten, Strukturdaten wie Energie- und THG-Bilanzen sowie techno-ökonomische Daten der abgebildeten Technologien (siehe Abbildung 3). Zur Parametrisierung wird auf statistische Daten, empirische Studien, Literatur und Einschätzungen von Fachleuten zurückgegriffen, welche die Datenbasis des Modells bilden.

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 CO_2-arme bzw. CO_2-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.
- **CO_2-Abscheidung, -Speicherung und Nutzung (CCS)**: Hohe Prozessauflösung erlaubt Zuordnung von CO_2-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 3: Überblick der Modellstruktur von FORECAST



Quelle: Fleiter et al. (2018) & 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 Ergebnisdatensatz 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 Subsektor[3] 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

2.3.1 Emissionsbilanz und prozessbedingte Emissionen

Das eingesetzte Modell FORECAST ist auf die Definition und Systemgrenze der Endenergie entsprechend der Energiebilanzen Deutschlands (AGEB) abgestimmt. Dies betrifft die Wahl der Systemgrenze[4] und die Verteilung auf Energieträger und Industriesektoren. Für die Berichterstattung von Treibhausgasemissionen sind die offiziellen Angaben im Nationalen Inventarbericht (NIR) (United Nations Climate Change (UNCC) 2017) relevant. Dieser folgt dem international gültigen „common reporting format" (CRF) der UN. Auch das 2030-Sektorziel der Industrie infolge des Klimaschutzgesetzes (Novelle 2021) ist nach der NIR-Systematik definiert. Entsprechend werden Ergebnisse zu den THG-Emissionen in diesem Bericht auch auf die NIR-Systematik kalibriert.

Aufgrund teilweise unterschiedlicher Definitionen in NIR und AGEB (z. B. zur Subsektorzuordnung der Dampferzeugung) müssen die Ergebnisse des Modells FORECAST in einem separaten Arbeitsschritt auf die NIR-Systematik umgerechnet werden. Dies betrifft außerdem Emissionen aus

[3] Statistisches Bundesamt (Destatis). Regionaldatenbank Genesis, Betriebe und Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen. Tabelle 42111-02-03-4. accessed on 14.05.2020

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

der Produktverwendung (insbesondere Fluorkohlenwasserstoffe, FKWs), die aus der Modellbetrachtung ausgeklammert sind. Zudem besteht eine unterschiedliche Zuordnung von Emissionen der Stahlherstellung zu energetischen (FORECAST) oder prozessbedingten (CRF) Emissionen. Hinzu kommt die Bilanzierung der gesamten Chemieindustrie und der Erzeugung von Prozessdampf in den CRF-Tabellen als 'Andere' – etwa 60 % der gesamten Emissionen der Industrie sind so aggregiert, was einen Vergleich auf Branchenebene erschwert. Hinzu kommen Emissionen von Industriekraftwerken, die in AGEB teilweise dem Umwandlungssektor zugerechnet werden.

Durch diese Unterschiede entsteht im Jahr 2019[5] eine Lücke zwischen dem NIR bzw. den zugehörigen Datentabellen (CRF) und den Modellergebnissen bzw. den nach AGEB berechneten THG-Emissionen[6]. Das Vorgehen zur Kalibrierung lässt sich in neun Schritten zusammenfassen (Abbildung 4):

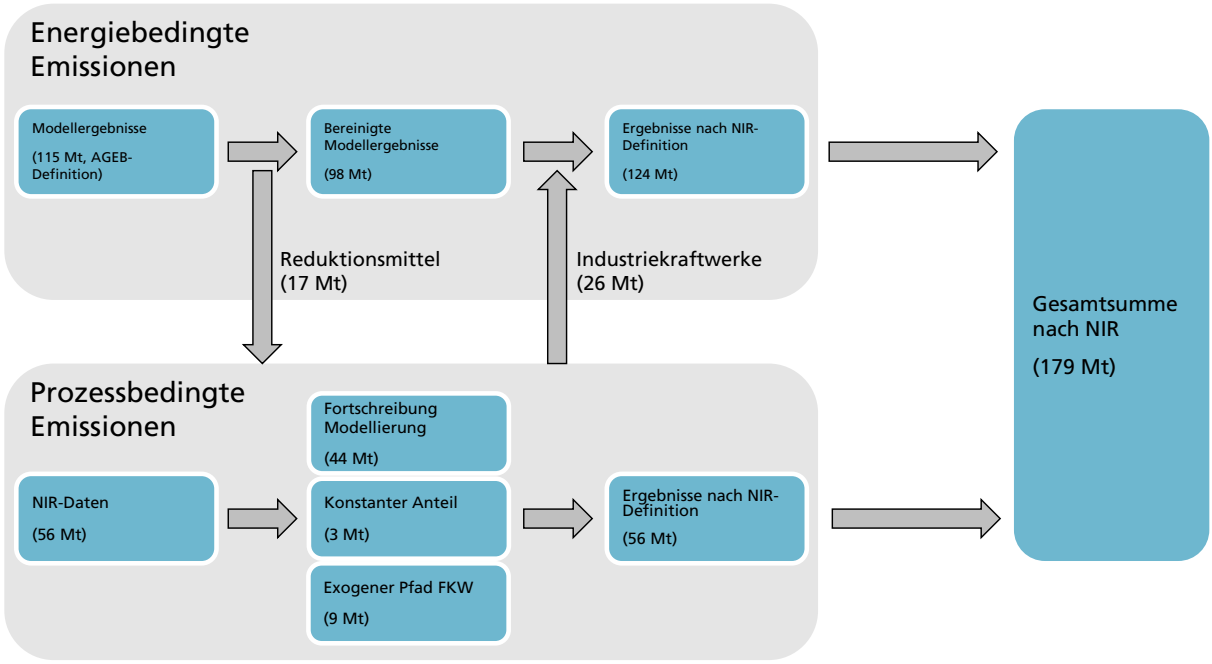
- Energiebedingte Emissionen (Werte für 2019)
    - Modellierte Werte je Energieträger (in Summe 115 Mt, AGEB-Definition) sind Grundlage.
    - Emissionen aus Reduktionsmittelnutzung der Eisen- und Stahlindustrie (17 Mt) werden anteilig nach Energieträgernutzung abgezogen.
    - Entstehende Summe (98 Mt) wird mit NIR-Daten (124 Mt) verglichen, Differenz (26 Mt, maßgeblich Industriekraftwerke) wird ausgewiesen.
    - Diese Differenz wird auf Basis der Berechnungen im Angebotssektor im Szenariozeitraum abgeschmolzen.
- Prozessbedingte Emissionen (Werte für 2019)
    - NIR/CRF-Daten sind Grundlage (56 Mt) darin sind Emissionen aus der Reduktionsmittelnutzung der Eisen- und Stahlindustrie (17 Mt) enthalten.
    - Entwicklung bis 2045 folgt den in FORECAST modellierten Pfaden.
    - Nicht im Modell enthaltene Emissionsquellen werden konstant gehalten (3 Mt).
    - Fluorkohlenwasserstoffe (FKW, 9 Mt) folgen exogen definiertem Minderungspfad entsprechend europäischer Ziele (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015)[7].
- Gesamtsumme
    - Die Addition von prozess- und energiebedingten Emissionen ergibt die Gesamtsumme (179 Mt).

5 Aufgrund der üblichen Laufzeit der Projekte können nicht immer die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung aktuellsten Statistiken verwendet werden. In diesem Fall war zwar das statistische Jahr 2020 bereits während der Bearbeitung verfügbar, wurde aber aufgrund der durch die Corona-Pandemie unsichere Einordnung nicht verwendet. Mit 2019 wurde das letzte "unauffällige" Jahr genutzt. Mittlerweile sind viele Statistiken für 2021 und 2022 veröffentlicht (z. B. AGEB Energiebilanz, Inventarbericht, einige Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe).

6 Die Differenz in Höhe von etwa 34 Mt setzt sich vor allem aus Emissionen der Produktverwendung (12 Mt), unterschiedlicher Bilanzierung der Reduktionsmittel (17 Mt, nur Verschiebung zwischen Kategorien) und THG-Emissionen von Industriekraftwerken (etwa 22 Mt) zusammen.

7 Diese Entwicklung ist eine exogene Annahme. Im untersuchten Szenario sind aufgrund der verwendeten Definition des Sektors Industrie keine Maßnahmen hinterlegt, die diese Entwicklung erzeugen würden. Die Realisierung dieser Annahme erfordert also weitere Maßnahmen.

Abbildung 4: Ablaufschema der Kalibrierung auf NIR/CRF-Daten



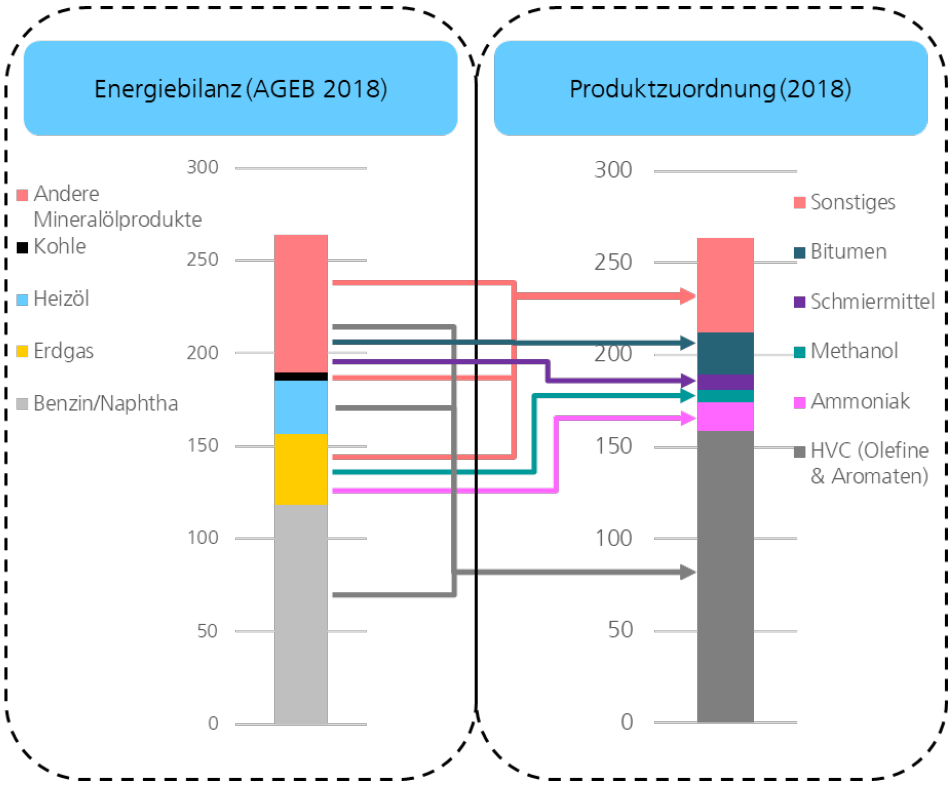
2.3.2 Der stoffliche Einsatz von Energieträgern in der Energiebilanz

Der nicht-energetische Bedarf wurde bottom-up mit Kenntnis über den stofflichen Einsatz in den Hauptprodukten Ammoniak, Methanol und Olefine der Grundstoffchemie errechnet. Zur vollständigen Abbildung des nicht-energetischen Bedarfs erfolgte eine Erweiterung der Methodik, um die bestehende Lücke zur Energiebilanz der AGEB zu schließen. Die Berechnung des bottom-up Ansatzes wurde um Aromaten erweitert und deckt nun alle Plattformchemikalien (High Value Chemicals, HVC) ab. Die verbleibende Lücke zur Energiebilanz konnte durch Abgleich mit anderen, detaillierteren Energiebilanzen (bspw. Eurostat) durch Zuordnung auf weitere Produkte wie Bitumen und Schmieröle reduziert werden. Um dennoch den nicht-energetischen Bedarf vollständig zu berücksichtigen, wurde diese Menge anteilig skaliert und bei der Modellierung im Zeitverlauf entsprechend fortgeführt.

Für den Status Quo (dargestellt in Abbildung 5) bedeutet das, dass von insgesamt 263 TWh an nicht-energetischem Bedarf in 2018 (263 TWh) etwa 185 TWh auf Heizöl, Erdgas, sowie Benzin/Naphtha entfallen. Diese sind fast vollständig (181 TWh) bottom-up zuweisbar. Ein Teil der verbliebenen 80 TWh konnte schwer substituierbaren Kohlenwasserstoffprodukten (Bitumen, Schmierstoffe) durch die Methodikerweiterung zugewiesen werden. Es herrscht schlussendlich je nach Energiebilanz noch eine Unsicherheit der Produktzuordnung von „andere Mineralölprodukte“ zu „Sonstige“ von etwa 35-50 TWh.

Abbildung 5: Nicht-energetischer Bedarf nach AGEB (2018)

Anteilig nach Energieträger und Zuordnung auf entsprechende Produktanteile.



3 Szenariodefinition

3.1 Überblick der Szenariodefinition T45-Szenarien und Sensitivitäten

Es werden drei Grundszenarien berechnet, die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 und nach Möglichkeit die Sektorziele des Klimaschutzgesetzes (Novelle 2021) bis zum Jahr 2030 erreichen. Die T45-Grundszenarien leuchten den Lösungsraum in der Dimension der Technologieschwerpunkte aus. Sie unterscheiden sich danach, wie stark sie die jeweiligen Lösungen Elektrifizierung (T45-Strom), Wasserstoff (T45-H2) oder synthetische Kohlenwasserstoffe (T45-PtG/PtL) einsetzen. Zusätzlich werden zwei Sensitivitäten berechnet: T45-RedEff und T45-RedGas. Diesen Sensitivitäten sind gezielte Änderungen einzelner Annahmen hinterlegt. Im T45-RedEff wurde weniger ambitionierter Effizienzfortschritt angenommen und T45-RedGas erfährt einen beschleunigten Gasausstieg. Die beiden Sensitivitäten bauen auf dem Grundszenario T45-Strom auf und werden entsprechend nur zu diesem Szenario verglichen.

Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien zu erlauben, sind alle Annahmen zu Randbedingungen wie THG-Ziele, Energiepreise und wirtschaftliche Entwicklung 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 Circular Economy wurde in allen Szenarien (außer T45-RedEff) ein ambitionierter Fortschritt angenommen, der von einer Beschleunigung gegenüber den vergangenen Trends ausgeht. CCU/S wird zur Abscheidung von CO_2-Emissionen in der Zement- und Kalkindustrie zugelassen, da diese ansonsten nur schwierig oder nicht vermeidbar sind. Unterschiede zwischen den Szenarien sind auf die Energieversorgung der Industrie beschränkt. Tabelle 3 gibt einen Überblick der Szenariodefinition für die T45-Grundszenarien.

Tabelle 3: Definition der T45-Grundszenarien für den Industriesektor

	T45-*Strom*	**T45-*PtG/PtL***	**T45-*H2***
Ziel THG Minderung 2045	Mindestens 95 % gegenüber 1990 für den Industriesektor (Nach Klimaschutzgesetz vom August 2021)		
Ziel THG Minderung 2030	Mindestens 58 % Minderung (Nach Klimaschutzgesetz vom August 2021)		
Wirtschaftswachstum	Kontinuierlich, ~1 % pro Jahr		
Biomasse	Energetischer Einsatz bleibt niedrig, auf Nutzung von Produktionsabfällen konzentriert		
Energie-, Materialeffizienz und Kreislauf	Ambitionierter Fortschritt		
CCS und CCU	Fokus Zement- und Kalkwerke		
Prozess-, Brennstoff- und Rohstoffwechsel	Priorität direktelektrisch	Priorität PtG	Priorität Wasserstoff

Entsprechend der Szenariodefinition unterscheiden sich die drei T45-Grundzenarien deutlich in den Kategorien Prozess-, Rohstoff- und Brennstoffwechsel. Tabelle 4 fasst die Annahmen je Branche und Technologiefeld zusammen.

Der Wechsel auf einen CO_2-neutralen Energieträger erfordert in vielen Fällen einen umfangreichen Neu- oder Umbau von Anlagen sowie neue Prozessketten. In diesem Fall wird der Begriff Prozesswechsel genutzt. Entsprechend gibt es auch in der Kategorie Prozesswechsel deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien. Im Folgenden sind die hinterlegten Technologie-Optionen kurz beschrieben. Eine tiefergehende Beschreibung und Diskussion der Annahmen findet sich im Abschnitt 3.3.

Im **Szenario T45-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 Ammoniak. 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. Im Bereich der Dampferzeugung sind Elektrodenkessel am Markt verfügbar und stellen die zentrale Lösung zur Dampferzeugung im Szenario T45-Strom dar. Hochtemperaturwärmepumpen unterstützen im Temperaturbereich unter 200°C.

Im **Szenario T45-PtG/PtL** wird davon ausgegangen, dass CO_2-neutrales Gas auf Strombasis (PtG) (geringfügig) ab 2027 und in größerem Umfang (2040: 50 % Beimischung) im weiteren Verlauf der Modellierung verfügbar ist und dem Erdgasnetz in steigenden Anteilen beigemischt wird, um so bis zum Jahr 2045 fossiles Erdgas vollständig zu ersetzen. Da Erdgas heute in den meisten Branchen der dominante Energieträger ist, wird PtG im Szenario T45-PtG/PtL energetisch sowie stofflich in allen Anwendungen bevorzugt eingesetzt. Dort, wo andere Optionen hohe Effizienz- oder Kostenvorteile aufweisen, ergänzen diese den Einsatz von PtG (z. B. Niedertemperaturwärme über Wärmepumpen, Teilelektrifizierung in Industrieöfen). Direkte Elektrifizierung ist damit auch in T45-PtG/PtL ein wichtiger Vermeidungshebel. PtG wird zudem als Rohstoff in der Grundstoffchemie genutzt sowie als Reduktionsmittel und Energieträger für die Herstellung von Primärstahl über die Eisenerz-Direktreduktion. Hier sind jeweils umfangreiche Neuinvestitionen nötig. In anderen Bereichen wie der Ammoniakherstellung oder der Prozesswärmeerzeugung ist der Aufwand für die Umstellung seitens der Industrie häufig sehr niedrig. Auf den Einsatz von Wasserstoff in der Industrie kann so im Szenario T45-PtG/PtL verzichtet werden. PtL wird nur stofflich eingesetzt, da der Aufwand für die Umstellung der energetischen Nutzung von Erdgas auf PtL höher wäre (auch fossile flüssige Energieträger werden in der Industrie heute nur noch vereinzelt eingesetzt) und gleichzeitig die Betriebskosten von PtL höher als bei PtG liegen würden.

Im **Szenario T45-H2** wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff bis 2045 über eine großflächige Infrastruktur an allen Industriestandorten verfügbar ist. Wasserstoff ist 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. 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 im Szenario T45-H2 eine Teilelektrifizierung statt. Besonders dort, wo Prozesse weniger hohe Temperaturen und Energiedichten verlangen.

Die **Abscheidung und Speicherung bzw. Nutzung von CO_2** wird in allen Szenarien genutzt, um nach Bemühungen der primären Vermeidung (Materialeffizienz, neue Zementsorten) verbleibende, schwierig zu mindernde Emissionen der Zement- und Kalkherstellung zu adressieren. In den Szenarien T45-Strom sowie T45-H2 wird zusätzlich CO_2 für die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie zur Herstellung von Methanol/Olefinen benötigt. Entsprechend wird in diesen beiden Szenarien eine Nutzung von CO_2 unterstellt (CCU) in Kombination mit einer (offshore) Speicherung von überschüssigen Mengen (CCS). Im Szenario T45-PtG/PtL wird der CO_2-Bedarf bereits über das im PtG enthaltende CO_2 gedeckt, weshalb hier eine (offshore) Speicherung des abgeschiedenen CO_2 der Zementwerke angenommen wird (CCS).

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 Befeuerung mit Wasserstoff und Strom oder mit PtG und Strom spielen in den Szenarien eine wichtige Rolle.

Tabelle 4: Annahmen zu Prozess- und Brennstoffwechsel im Industriesektor

	Ggf. Sektor	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H2
Prozesswechsel	**Ethylen/ Olefine**	Methanol-to-Olefins/Aromates (MTO/ MTA) mit Rohstoff H_2 El. Steamcracker (PtL/bio)	Methanol-to-Olefins/ Aromates (MTO/MTA) mit Rohstoff CH_4 El. Steamcracker (PtL/bio)	Methanol-to-Olefins/ Aromates (MTO/MTA) mit Rohstoff H_2 El. Steamcracker (PtL/bio)
	Ammoniak	H_2 für Synthesegas anstatt CH_4-Dampfreformierung	Dampfreformierung auf Basis PtG	H_2 für Synthesegas anstatt CH_4-Dampfreformierung
	Stahl	H_2-DRI (+ Erdgas im Übergang)	CH_4-DRI	H_2-DRI (+ Erdgas im Übergang)
	Zement u. Kalk	Teil-Elektrifizierung Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCUS	PtG Brennstoff Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCS	H2 Brennstoff Ersatzbrennstoffe, Biomasse CCUS
Brennstoffwechsel Prozesswärme	**Glas**	Hybride Systeme: Elektrische Schmelzwannen und Zufeuerung H2	Gasbrenner (geringfügig Teilelektrifizierung)	H2-Beheizung (geringfügige Teilelektrifizierung)
	Öfen	Elektrifizierung und/oder H2-Befeuerung wo vorteilhaft	Gasbefeuert und Teilelektrifizierung wo vorteilhaft	Umrüstung auf H_2-Brenner und Teilelektrifizierung wo vorteilhaft
	Dampf	Elektrische Kessel, Wärmepumpen und geringfügig H2-Brenner	Gaskessel + KWK sowie Teilelektrifizierung	H_2-Kessel + Teilelektrifizierung
	Niedertemperatur	Wärmepumpe, Fernwärme, elektr. Kessel	Wärmepumpe, Fernwärme, Gaskessel	Wärmepumpe, Fernwärme, H_2-Kessel
CCS u. CCU		CCUS: CO_2 aus Zement- u. Kalkherstellung als Rohstoff für Methanol + Speicherung offshore	CCS bei Zementwerken und Speicherung offshore	CCUS: CO_2 aus Zement- u. Kalkherstellung als Rohstoff für Methanol + Speicherung offshore

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

Die Definition der T45-Szenarien baut auf den bereits veröffentlichten TN-Szenarien auf (Fleiter et al. 2023), wurde jedoch grundlegend überarbeitet. Im Folgenden sind die wichtigsten Änderungen zusammengefasst.

Weniger starke Ausprägung der Technologiepfade: Die TN-Szenarien folgen einer sehr starken Ausprägung der jeweiligen Technologiepfade (unter Berücksichtigung technischer Hürden). Die neuen T45-Szenarien hingegen sind weniger stark in die jeweiligen Richtungen ausgeprägt und nähern sich gegenseitig an. Entsprechend wird 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 noch nicht stattfindet (anders als in den Sektoren Verkehr und Gebäude).

Ziele des Klimaschutzgesetzes 2021: Die drei T45-Grundszenarien berücksichtigen die Ziele des Klimaschutzgesetzes als Randbedingungen. Entsprechend erreichen die T45-Szenarien

annahmegemäß das Sektorziel für die Industrie im Jahr 2030 mit 118 Mio. t $CO_{2\text{-Äqu.}}$ sowie nahezu THG-Neutralität bereits im Jahr 2045. Umgesetzt werden die Ziele durch eine beschleunigte Marktdiffusion von neuen Prozessen und CO_2-neutraler Energieversorgung. Dadurch wird im Vergleich zu den TN-Szenarien das Ambitionsniveau hinsichtlich Transformationsgeschwindigkeit deutlich erhöht, besonders im Zeitraum bis 2030.

Rezession durch die Coronakrise: Die Wirtschaftskrise als Folge des Corona-Lockdowns im Frühjahr 2020 ist über eine Aktualisierung der Statistiken zu Produktionsmengen und Wertschöpfung berücksichtigt. Mittelfristig mit Perspektive 2030 ist in allen Szenarien angenommen, dass eine vollständige wirtschaftliche Erholung stattfindet und die Wirtschaft wieder auf dem ursprünglichen Wachstumspfad zurückkehrt

Ukraine-Krieg und Gaskrise: Der Ukraine-Krieg hat schwerwiegende Auswirkungen auf die Energieversorgung Europas, die für die kommenden Jahre nicht vorherzusagen sind. Die T45-Szenarien berücksichtigen einen starken Anstieg beim Gaspreis sowie anderen Energieträgern, wie im Frühjahr 2022 gesehen. Um die Möglichkeiten eines schnellen Gasausstiegs im Industriesektor auszuloten, wurde die Sensitivität T45-RedGas definiert. Diese untersucht die Wirkungen zusätzlicher Maßnahmen für einen beschleunigten Gasausstieg.

Darüber hinaus wurden Branchen- und Technologieannahmen grundlegend überarbeitet und in vielen Fällen an neue Entwicklungen und Erkenntnisse angepasst. Die wichtigsten Neuerungen sind folgende:

- **Vielfältiger Brennstoffmix im Zementsektor**: Stärkere Rolle von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen (Biomasse/PtG/Müll), um über CCS u.a. mit Hilfe biogener Rohstoffe (BECCS) negative Emissionen zu ermöglichen
- **Weniger schnelle Diffusion bei neuen CO_2-armen Zementsorten:** Die Marktdiffusion neuer Zementsorten ist weniger ambitioniert, da diesbezüglich kaum Fortschritt zu beobachten ist und Hemmnisse weiterhin sehr hoch sind. Darüber hinaus ist der zusätzliche Nutzen neuer Zementsorten geringer, wenn CCUS-Infrastruktur großflächig ausgebaut ist.
- **Kombinierte CCUS Strategie:** Früherer Einstieg und in allen Szenarien eine Kombination aus CCS und CCU
- **Eisenerz-Direktreduktion nutzt Erdgas im Übergang**: Schnellere Diffusion schon bis 2030 und Einsatz in hybriden Systemen mit Erdgas und Wasserstoff im Übergang.
- **Ambition bei Recycling und Materialeffizienz etwas moderater:** Besonders bei der Marktdiffusion von Sekundärstahl zeigen die T45-Szenarien zwar noch eine deutliche Steigerung, diese ist allerdings nicht mehr so schnell wie noch in den TN-Szenarien. Diese etwas vorsichtigere Annahme spiegelt Unsicherheiten bei der Verfügbarkeit von Stahlschrott wider.
- **Biomasseeinsatz bleibt auf heutigem Niveau**: Einsatz von Biomasse in Zementproduktion und ausgewählten anderen Branchen etwa auf heutigem Niveau (~30TWh)
- **Elektrische Steamcracker mit Beitrag zu einer CO_2-neutralen Grundstoffchemie**: Alle T45-Szenarien berücksichtigen den Einsatz von elektrischen Steamcrackern mit grünem Naphtha, da bereits Entwicklungen in diese Richtung stattfinden und in Kombination mit CCUS bei der Müllabscheidung CO_2-Neutralität erreicht werden kann. Ihr Anteil an der Produktionsmenge von Olefinen beträgt 30 % in T45-Strom, 10 % in T45-H2 und 80 % in T45-PtG/PtL
- **Neuer Energiebedarf für Batterieproduktion in Deutschland:** Die T45-Szenarien berücksichtigen den möglichen zukünftigen Energieverbrauch durch Batteriefabriken in Deutschland. Batterieproduktion ist ein energieintensiver Prozess und die umfassende Marktdiffusion batterieelektrischer Antriebe im Verkehrssektor in allen Szenarien hat einen hohen Bedarf an Batterien zur Folge.

- **Überarbeitung Energieeinsatz als Rohstoffbedarf der Grundstoffchemie:** Die Grundstoffchemie hat einen sehr hohen stofflichen Bedarf nach Energieträgern wie Naphtha oder Erdgas. Für die Berechnung der T45-Szenarien wurde die verfügbare Statistik grundlegend aufgearbeitet und zusätzliche Bedarfe über Olefine hinaus aufgenommen. Dies führt zu einem etwa 100 TWh höherem nichtenergetischen Bedarf als in den TN-Szenarien. Siehe Abschnitt 2.3.2.

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 CO_2-intensivsten Branchen in Deutschland. Unter dem Aggregat „Rohstahl" können die verschiedenen Stahlqualitäten und Legierungen zusammengefasst werden, die sich in der Weiterverarbeitung zwar noch massiv in unterschiedliche Produkte aufspalten. Allerdings entsteht der Großteil des Energiebedarfs und der THG-Emissionen 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 (siehe Abschnitt 4.2.1.4). Dies ist auf die energieintensive Erzeugung von Roheisen aus Eisenerz zurückzuführen, mit spezifischen Energiebedarfen um 18 $GJ/t_{Roheisen}$[8]. 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.

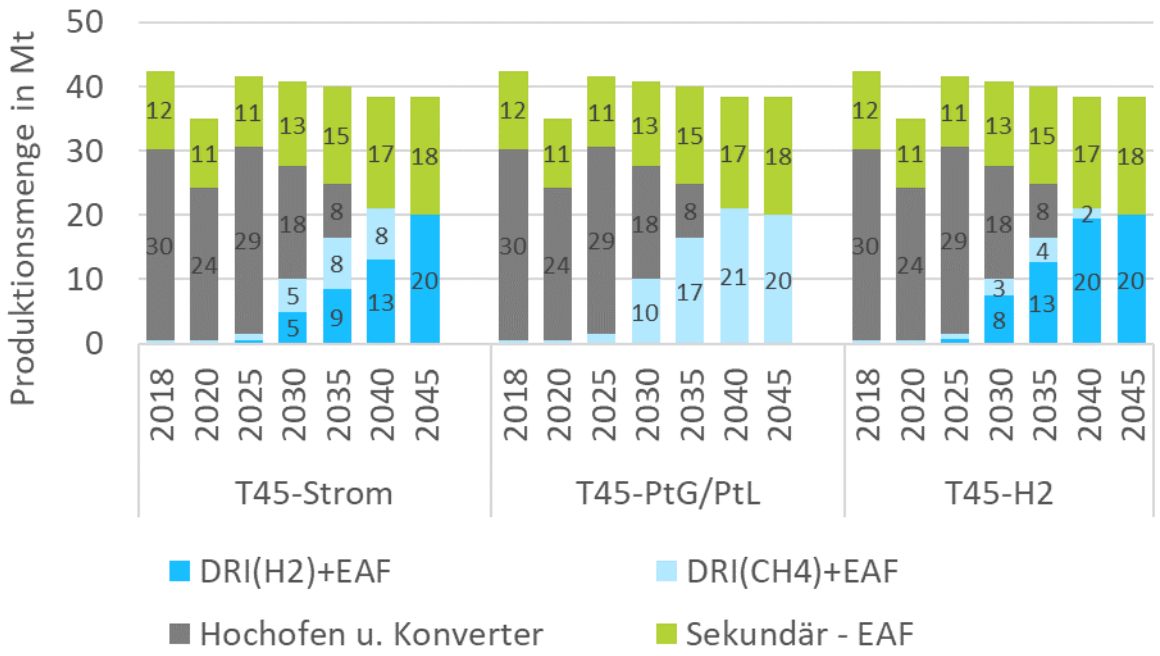
Da aufgrund der Abhängigkeit des konventionellen Hochofenverfahrens zur Reduktion von Eisenerz von Koks und Kohle inkrementelle Verbesserungen der Material- und Energieeffizienz langfristig keine hinreichende Dekarbonisierung erreichen kann, liegt der Fokus aller Transformationspfade der T45-Grundszenarien auf dessen Substitution. Dazu werden zwei komplementäre Strategien verfolgt (Abbildung 6): Der Anteil der Sekundärroute wird – im Rahmen der angenommenen Potentiale, die sich aus Schrottverfügbarkeit und -qualität zusammensetzen – maximiert. Dadurch wird der Bedarf an Stahl bis 2045 zu 47 % (2019: 29 %) gedeckt und die besonders energieintensive Roheisenerzeugung minimiert. Ab 2025 wird die weiterhin benötigte Primärerzeugung zunächst graduell durch Direktreduktion (mit Wasserstoff oder Erdgas) ersetzt. 2030 werden 10 Mt/a Rohstahl über diese Route produziert (36 % der Primärerzeugung) und bis 2040 ist die Primärerzeugung im Hochofen vollständig verdrängt[9].

8 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.

9 Dies entspricht auch weitestgehend einem Ende der Kohlenutzung im Industriesektor. Geringe verbleibende Mengen werden in den nachfolgenden Jahren ersetzt.

Abbildung 6: Entwicklung der Rohstahlproduktion nach Verfahren

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2.



Die Annahmen zur Marktdiffusion von neuen Direktreduktionsanlagen lassen sich anhand des Modernisierungsbedarfes der Hochöfen sowie der Projektankündigungen von Herstellern plausibilisieren.

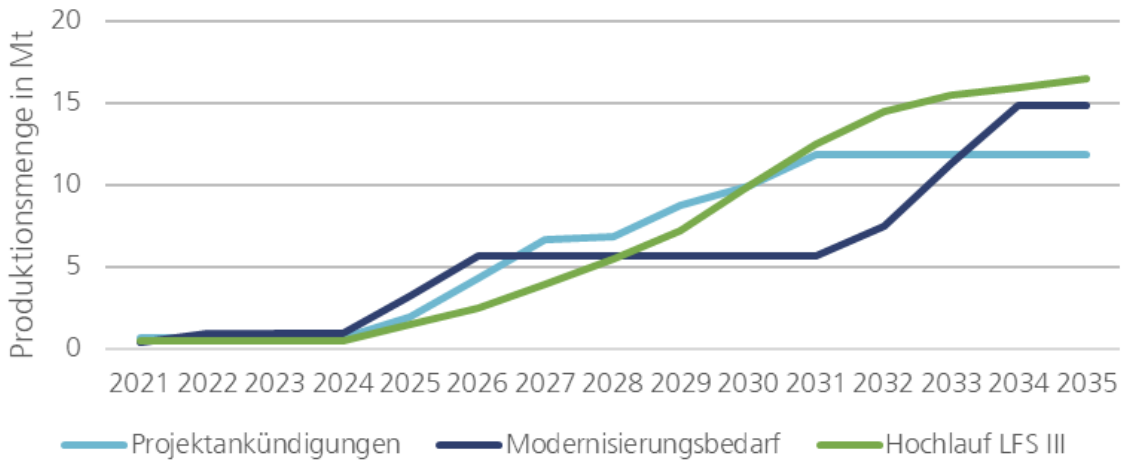
Eine Neuzustellung bestehender Hochöfen ist eine relativ große Investition, die bei Umstellung auf die Direktreduktion vermieden werden kann. Entsprechend sind Modernisierungszeiträume Möglichkeitsfenster für die Umstellung. Bei einem Modernisierungszyklus von 22 Jahren ergibt sich bei der derzeitigen Altersstruktur der Hochöfen in Deutschland der in Abbildung 7 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 resultierende Markthochlauf passt relativ gut zu 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 11,3 Mt DRI Produktionskapazität bis zum Jahr 2030 angekündigt, was eine ähnliche Größenordnung wie die Szenarioannahme von 10 Mt im Jahr 2030 ist. Berücksichtigte Ankündigungen:

- Duisburg: ThyssenKrupp: 0,4 Mt (2025); 3 Mt (2030)
- Bremen: ArcelorMittal: 2,4 Mt (2027); 3,5 Mt (2030)
- Salzgitter: Salzgitter: 1,9 Mt (2027); 3,8 Mt (2030)
- Hamburg: ArcelorMittal: 0,1 Mt (2025); 1 Mt (2030)

Abbildung 7: Produktionskapazität von Rohstahl

Vergleich von angenommenem Markthochlauf mit Modernisierungsbedarf und Projektankündigungen.



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 Ersteres aufgrund der unklaren Senken kaum beeinflusst werden kann, kann Letzteres insbesondere auch durch das Mischen mit Eisenschwamm verbessert werden. Jedoch reicht eine Verbesserung der Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von Schrotten nicht aus, um bis 2045 einen Sekundärroutenanteil von 47 % (18 Mt) zu erreichen. Auch die Nutzung in Gießereien und/oder der Schrottexport müssten reduziert werden. Derzeit werden rund 35 % des inländischen Altschrottaufkommens zu gleichen Teilen für den Guss genutzt oder exportiert.

Tabelle 5: Vermeidungshebel Metallerzeugung

T45-Grundszenarien.

	T45-*Strom*	**T45-*PtG/PtL***	**T45-*H2***
Materialeffizienz	Reduktion Nachfrage nach Rohstahl und Walzstahl: 10 % ggü. Referenzentwicklung		
Kreislauf	Anteil Sekundärstahl steigt von rd. 30 % (2015) auf knapp 50 % in 2045		
Prozesswechsel	H_2-DRI (Übergang CH_4-DRI) 2030:10 Mt DRI	2030:10 Mt CH_4-DRI	H_2-DRI (Übergang CH_4-DRI) 2030:10 Mt DRI

Jedoch gehen mit der Reduktion dieser Materialflüsse Zielkonflikte einher. Trotz des geringeren Produktionsvolumens im Vergleich zu Stahlherstellung ist die Gießerei-Industrie eine relevante Branche mit hoher Wertschöpfung und strategischer Bedeutung (Umsatz von 11,5 Mrd. € (2021)).

Auf internationaler Ebene belegt Deutschland Platz 5 beim Produktionsvolumen, in Europa Platz 1. Hauptabnehmer ist der Fahrzeugbau. 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 Sekundärroutenanteil ermöglicht, der globale (bzw. europäische) Anteil jedoch nicht notwendigerweise steigt.

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 Zementklinker[10].

Die Energieversorgung der Zement- und Kalkindustrie war 2015 fossil geprägt. Die in diesem Jahr produzierte Menge von 31,2 Mt Zement (VDZ 2018) basiert stabil auf einer Prozesswärmeerzeugung durch Braun- und Steinkohle und nicht-erneuerbaren Ersatzbrennstoffen mit einem geringen biogenen Anteil. Zu den energiebedingten CO_2-Emissionen aus dem Verbrennen fossiler Energieträger kommen prozessbedingte Emissionen, die durch die notwendige Entsäuerung des Kalksteins entstehen. Insgesamt erzeugt eine Tonne Zement etwa 0,6 t CO_2, 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.

Um diese Aktivitäten dennoch mit einer nahezu treibhausgasneutralen Industrie 2045 kompatibel zu gestalten, ist eine Mischung von Strategien notwendig. Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette, Energieträgerwechsel, neue Verfahren und Produkte, und CO_2-Abscheidung. Tabelle 6 fasst diesbezügliche Annahmen zusammen.

Die Zementproduktion sinkt bis 2045 durch Materialeffizienz und Substitution in der Bauwirtschaft um knapp 10 % von 34 Mt im Jahr 2019 auf 31 Mt im Jahr 2045. Die verstärkte Nutzung von Zementsorten mit geringem Klinkeranteil führt dazu, dass der Rückgang bei der Klinkerproduktion mit 24 % gegenüber 2019 höher als bei der Zementproduktion ausfällt. Da das Brennen von Klinker der mit Abstand emissionsintensivste Prozessschritt ist, wird hierdurch bereits eine substantielle CO_2-Minderung erreicht. Allerdings ist der Sektor so noch weit von der CO_2-Neutralität entfernt.

Bedingt durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung und geringerem Bedarf in der Stahlerzeugung sinkt die Produktion von Kalk (zur Rauchgasreinigung) bis 2030 um etwa 25 % (1,5 Mt).

[10] 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.

N*eue Bindemittel* ersetzen bis 2045 10 % der Klinkerproduktion, also etwa 2 Mt. 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 T45-Grundszenarien genügen diese Maßnahmen allein nicht zu einer weitgehenden Dekarbonisierung des Subsektors.

Tabelle 6: Vermeidungshebel Subsektor Steine- und Erden

T45-Grundszenarien.

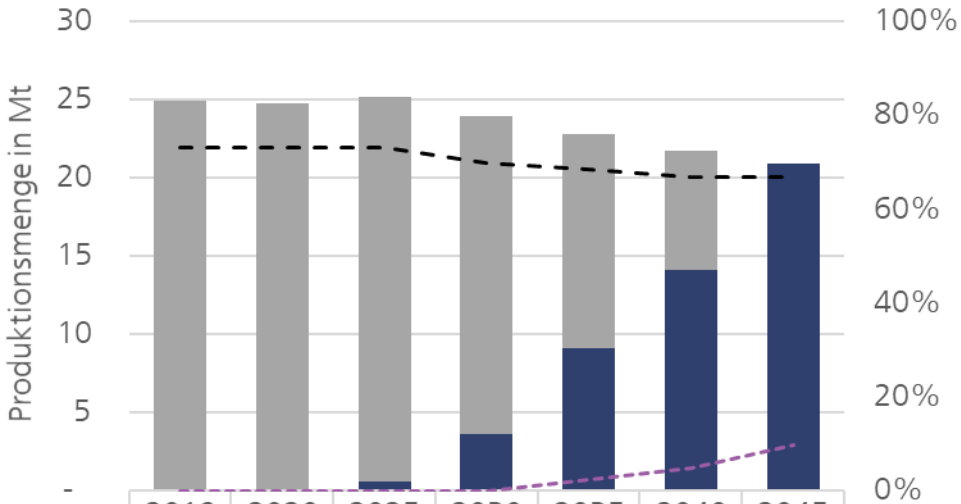
	T45-*Strom*	**T45-*PtG/PtL***	**T45-*H2***
Materialeffizienz	Produktion Zement: -8 % ggü. 2019 (bis 2045) Produktion konventioneller Klinker: -16 % ggü. 2019 (bis 2045) Produktion Kalk: -30 % ggü. 2019 (bereits bis 2030)		
Kreislauf	-		
Materialeinsatz / neue Produkte	Geringe Anteile neue Bindemittel (~10 %) Klinkerfaktor von 73 % in 2015 auf 67 % in 2045		
Brennstoffwechsel	Teilelektrifizierung, Ersatzbrennstoffe, Biomasse	EE-Methan, Ersatzbrennstoffe, Biomasse	Wasserstoff, Ersatzbrennstoffe, Biomasse
CCS /CCU	CO_2-Abscheidung bis 2045 an allen Zementwerken und nahezu allen Kalkwerken		

Obschon diese Annahmen die energiebedingten Emissionen hinreichend adressieren, verbleibt der große Block der prozessbedingten Emissionen. Kernthema hierbei ist der Einsatz von Kalkstein als Rohstoff. Daher wird als wichtiges Element die Abscheidung von CO_2 (CCU/S) in allen Szenarien benötigt. In den Szenarien T45-Strom und T45-H2 wird das abgeschiedene CO_2 in der Chemieindustrie für die Herstellung von Olefinen verwendet. Im Szenario T45-PtG/PtL wird das abgeschiedene CO_2 unterirdisch (offshore) 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 CO_2-Abscheidung und mit den bekannten/berücksichtigten Technologien nicht möglich ist. Lediglich die abzuscheidende Menge und die mögliche Verwendung[11] variieren.

[11] Die mögliche Verwendung kann allerdings einen großen Einfluss auf die wirtschaftlichen Bedingungen haben, da der stoffliche Kohlenstoffbedarf der Chemie- und Stahlindustrie nicht-fossiles CO_2 letztlich zum Wertstoff macht. Es ist allerdings nicht absehbar, ob und wie sich daraus in den Szenarien T45-H2 und T45-Strom ein selbsttragendes Geschäftsmodell entwickeln kann.

Abbildung 8: Entwicklung der Zementproduktion

Für T45-Strom (T45-H2 und T45-PtG/PtL identisch).



	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Klinker ohne CO2-Abscheidung	25	25	25	20	14	8	0
Klinker mit CO2-Abscheidung	-	-	1	4	9	14	21
Klinkerfaktor	73%	73%	73%	70%	68%	67%	67%
Neue Bindemittel	0%	0%	0%	0%	2%	5%	10%

3.3.3 Grundstoffchemie

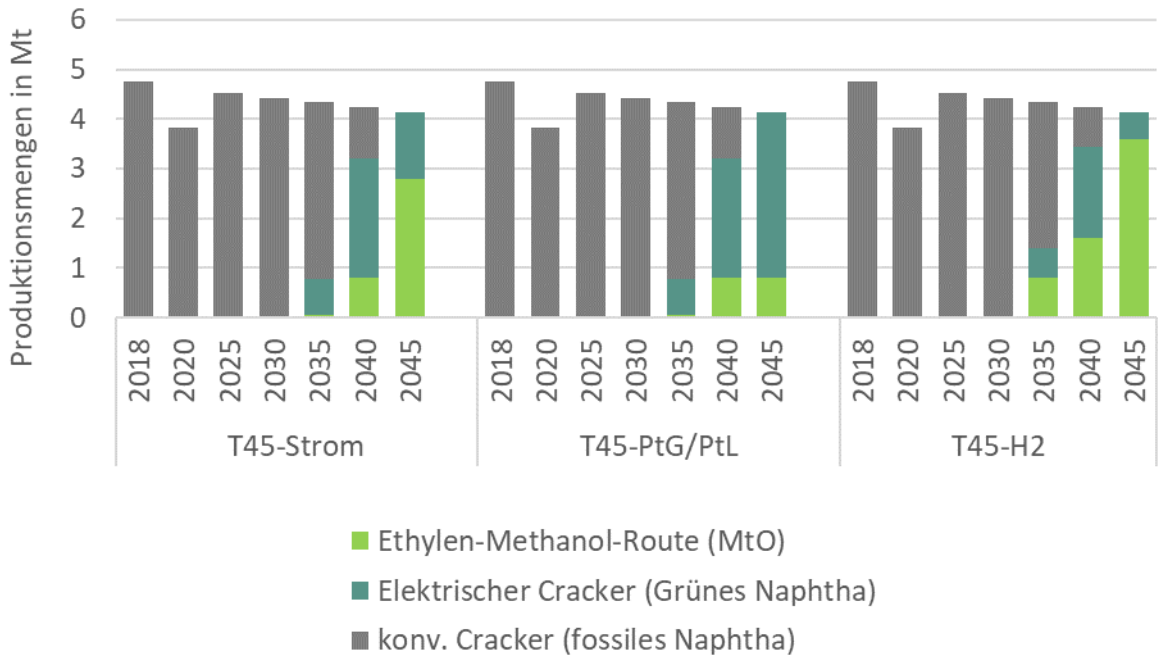
Während die Chemieindustrie insgesamt durch eine hohe Heterogenität und eine Vielzahl an Produkten gekennzeichnet ist, entsteht der größte Teil des Energiebedarfes und der direkten Emissionen der Grundstoffchemie in wenigen energieintensiven Massenprodukten. Die wichtigsten sind Ammoniak, Methanol und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

Für die Entwicklung des nicht-energetischen Bedarfs ist die zukünftige Entwicklung der Produktionsmengen in der Chemieindustrie der wichtigste Treiber. Abbildung 9 zeigt den zeitlichen Verlauf der Ethylenproduktion und die Anteile der jeweiligen Technologie stellvertretend für alle HVC (Olefine & Aromaten) der drei T45-Grundszenarien. 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. Alle Szenarien zeigen einen Einsatz beider Verfahren, allerdings mit unterschiedlichen Anteilen.

[12] Olefine sind ein Sammelbegriff für petrochemische Kohlenwasserstoff-Erzeugnisse unterschiedlicher Kettenlänge. Dazu gehören 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. Die Modellierung nutzt Ethylen als Vergleichsgröße (Proxy) zur Abbildung des Energiebedarfs und der Emissionen.

Abbildung 9: Annahmen zur Produktion von Ethylen nach Verfahren

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2.



Durch die überwiegende Nutzung von Wasserstoff als Feedstock in T45-Strom und T45-H2 erfolgt der Einsatz elektrischer Steamcracker als Übergangstechnologie zur Vermeidung energiebedingter Emissionen bei der Dampferzeugung und verbleibt zu einem Anteil von 12 % bis 25 % aufgrund des Bedarfs schwer ersetzbarer Grundstoffe wie Bitumen und Schmierölen. Im Szenario T45-PtG/PtL ist der elektrischer Steamcracker wegen des wesentlich geringeren finanziellen und technischen Umstellungsaufwands durch die Ähnlichkeit der synthetischen und fossilen Energieträger die vorherrschende Technologie.

Tabelle 7: Vermeidungshebel Grundstoffchemie

T45-Grundszenarien

	Ggfs. Sektor	T45-*Strom*	T45-*PtG/PtL*	T45-*H2*
Material-effizienz		Reduktion und Ersatz Kunststoffverbrauch: 13 % (Ethylen), Reduktion Düngerbedarf: -10 % (Ammoniak)		
Kreislauf		Kunststoffrecycling: + 15-%-Punkte		
Prozess-wechsel	**High Value Chemicals (Olefine + Aromaten)**	H_2-HVCs (70 %) El. Steamcracker + PtL (30 %)	Methan-HVCs (20 %) El. Steamcracker + PtL (80 %)	H_2-HVCs (90 %) El. Steamcracker + PtL (10 %)
	Ammoniak	EE-H_2	PtG	EE-H_2
Brennstoff-wechsel	**Dampf**	Priorität Strom	Priorität PtG	Priorität H_2

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 CO_2-neutralen Sekundärenergieträgern (Strom, Wasserstoff, PtG) reduzieren. In der Dampferzeugung liegt der Schwerpunkt der Energieversorgung auf den entsprechenden Prioritäten der drei T45-Grundszenarien.

3.4 Annahmen und techno-ökonomische Parameter

3.4.1 Wirtschaftliche Entwicklung des Industriesektors

Grundlegende Rahmendaten der Industrie sind die Entwicklung der Wertschöpfung und der Produktionsmengen wichtiger energieintensiver Produkte der Grundstoffindustrie. Die Gesamtwertschöpfung der Industrie wächst im Modellierungszeitraum (2020 bis 2045) durchschnittlich um 1 % pro Jahr überwiegend in den nicht-energieintensiven Subsektoren Fahrzeug- und Maschinenbau und sonstigen Wirtschaftszweigen (siehe Tabelle 8). In der energieintensiven Grundstoffindustrie wächst die Wertschöpfung etwas langsamer zwischen 0,3 % und 0,6 % pro Jahr[13].

Tabelle 8: Bruttowertschöpfung und Wachstum

Je Subsektor in allen T45-Grundszenarien [Mrd. €2015].

Mrd€2018	2018	2020	2030	2040	2045	CAGR[1] 2015-2045
Fahrzeugbau	121	108	142	161	172	1.3%
Sonstige Wirtschaftszweige	107	97	123	133	139	1.0%
Maschinenbau	91	82	108	123	131	1.4%
Ernährung und Tabak	51	45	58	64	67	1.0%
Metallbearbeitung	48	42	51	54	56	0.6%
Sonstige chemische Industrie	32	28	37	41	43	1.1%
Grundstoffchemie	29	24	30	32	33	0.5%
Gummi- u. Kunststoffwaren	27	24	30	32	33	0.8%
Papiergewerbe	11	9	12	12	13	0.7%
NE-Metalle, -gießereien	10	9	11	12	12	0.6%
Verarbeitung v. Steine u. Erden	9	7	9	9	9	0.3%
Metallerzeugung	7	6	7	7	7	0.5%
Glas u. Keramik	6	6	7	7	7	0.6%
Bergbau	2	2	2	2	2	-0.7%
Summe	**549**	**490**	**626**	**690**	**725**	**1.0%**

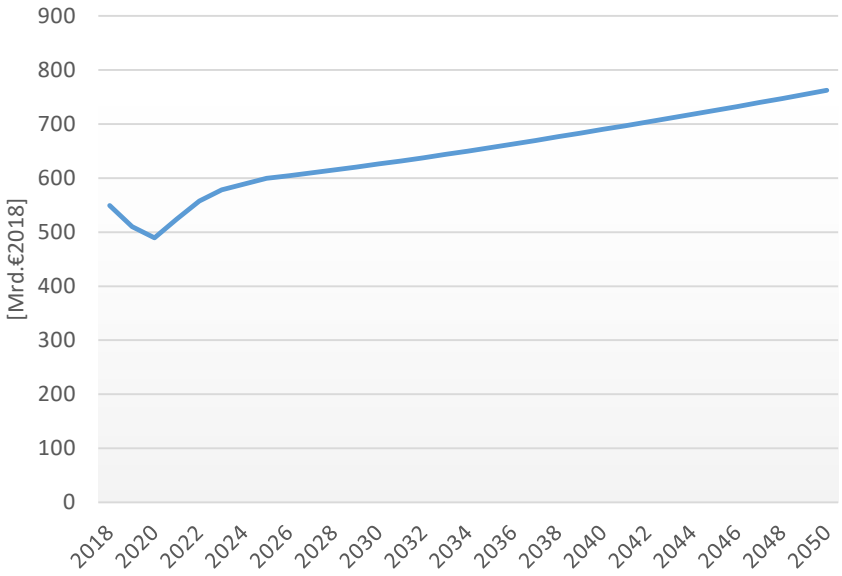
1: CAGR: „Compound Annual Growth Rate", jährliche Wachstumsrate
Quelle: Destatis 2020, Szenarioannahmen Fraunhofer ISI

Grundlage der Annahmen bildet die Herbstprognose der Bundesregierung 2021, die nach einem Rückgang des BIP in 2020 von einer Erholung 2021 und 2022 und danach von einem stabilen Wachstum ausging. Auswirkungen des Überfalls Russlands auf die Ukraine sind in diesen Annahmen mithin nicht berücksichtigt, da diese zum Zeitpunkt der Rechnung noch sehr unsicher waren. Der Rückgang des BIP von etwa 5 % in der Gesamtwirtschaft 2020 wirkte sich auf die verarbeitende Industrie stärker aus (~10 %). Für diesen Teilbereich wird in der den T45-Szenarien

13 Siehe dazu auch 4.2.1.4.

zugrundeliegenden Wertschöpfung von einer Erholung bis 2025 ausgegangen (Abbildung 10). Die Annahme der Wertschöpfung ist bedingt durch die angewendete Methodik (siehe Abschnitt 2) besonders relevant für die nicht-energieintensiven Subsektoren (Maschinenbau, Fahrzeugbau, sonstige Wirtschaftszweige).

Abbildung 10: Annahmen zur Bruttowertschöpfung der Industrie in den T45-Szenarien

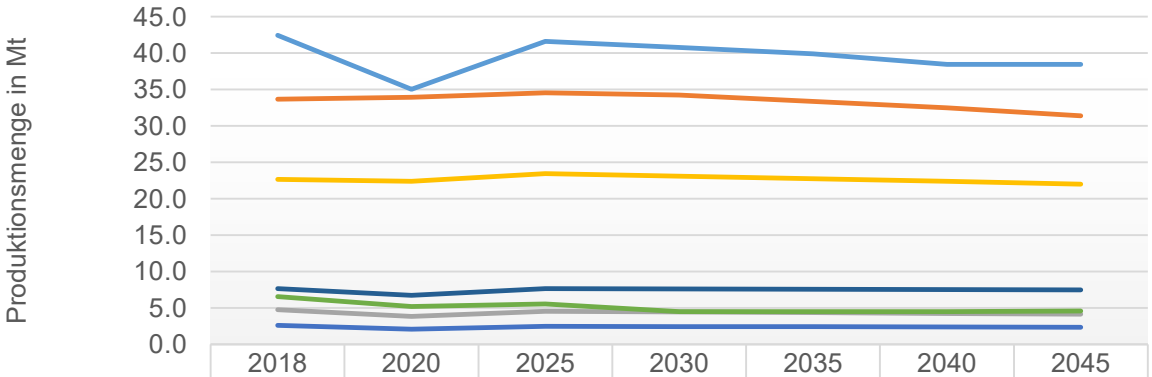


Für energieintensive Subsektoren sind die unterstellten physischen Produktionsmengen der hauptsächliche Treiber von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen. Abbildung 11 zeigt die Annahmen zur Produktion von ausgewählten THG-intensiven Produkten der Grundstoffindustrien. Demnach wird für einige Produkte, im Gegensatz zur Entwicklung der Wertschöpfung für die Branchen (s. o.), ein leichter durch ambitionierte Materialeffizienz bedingter Rückgang angenommen, insgesamt entwickeln sich die Produktionsmengen jedoch relativ kontinuierlich. Statistische Daten reichen je nach Verfügbarkeit bis zum Jahr 2020 oder 2021. Entsprechend ist bei vielen Produkten bereits der Einbruch im Jahr 2020 berücksichtigt. Dies ist besonders deutlich bei der Stahlherstellung. Mittelfristig wurde angenommen, dass die Produktionsmengen sich wieder 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. Allen drei T45-Grundszenarien liegen die gleichen Annahmen zur Produktion zugrunde.

Abbildung 11: Annahmen der Produktionsmengen energieintensiver Produkte

Gleiche Annahmen für alle T45-Grundszenarien. Daten für das Jahr 2020 sind Annahmen, da zum Zeitpunkt der Modellrechnung noch keine statistischen Produktionsdaten verfügbar waren.



	2018	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Rohstahl	42.4	35.0	41.6	40.8	39.9	38.4	38.4
Zement	33.7	33.9	34.5	34.2	33.4	32.5	31.4
Ethylen	4.8	3.8	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1
Papier	22.7	22.4	23.4	23.1	22.7	22.4	22.0
Ammoniak	2.6	2.1	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3
Kalk	6.6	5.2	5.5	4.5	4.5	4.5	4.6
Glas	7.7	6.7	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5

3.4.2 Neue Verbraucher: Batteriefabriken

Als neue Verbraucher werden Batteriefabriken berücksichtigt. Sie werden 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 – in 2045 entfallen etwa 30 % des Energiebedarfs des Subsektors (T45-Strom: 37 TWh) auf sie. Auch für die gesamte verarbeitende Industrie entsteht – bezogen auf ein einzelnes Produkt bzw. eine einzelne Produktgruppe – eine relevante Bedeutung, etwa in der Größenordnung der Zuckerproduktion, der Herstellung von Kalk oder des energetischen Aufwands für Ammoniak. Dennoch liegt der erwartete Energiebedarf im Vergleich zur gesamten Industrie bei etwa 1 % bis 2 %.

Ausgehend vom Batteriebedarf für Elektromobilität wird eine Annahme zur Entwicklung der Batterieproduktion getroffen. Die Berechnung nutzt den im Verkehrssektor der T45-Szenarien berechneten Bedarf an Batterien für Neufahrzeuge als Grundlage (in T45-Strom 2030: 207 GWh, 2040: 260 GWh, 2045: 275 GWh) – demnach werden bilanziell alle inländisch genutzten Fahrzeuge mit national produzierten Batterien versorgt[14]. Für die Produktion der Batterien wird ein spezifischer Energiebedarf von 42 kWh je kWh Batteriekapazität angenommen, der sich zur Hälfte auf Strom und Wärme aufteilt (Degen und Schütte 2022). Aus Multiplikation resultiert ein Energiebedarf zwischen 5 TWh (T45-PtG/PtL) und 10 TWh (T45-Strom und T45-H2) in 2030 und 9 TWh (T45-H2) und 12 TWh (T45-Strom) in 2045.

Diese Annahmen unterliegen großen Unsicherheiten und geben daher nur eine Größenordnung des zu erwartenden Energiebedarfs an. Bei der technologischen Entwicklung sind Effizienzgewinne denkbar, die den Energiebedarf in der Herstellung deutlich senken könnten. Hinzu kommen nachfrageseitige Einflüsse (Selbstversorgungsgrad, Handelsbilanz Fahrzeuge, Tiefe der

[14] Dabei wird die grobe Annahme getroffen, dass Ex- und Importe von batterierelevanten Fahrzeugen ausgeglichen sind.

Wertschöpfung vor Ort), die nicht Gegenstand von Szenariovariationen waren, aber starken Einfluss auf mögliche Bandbreiten des gesamten Energiebedarfs der Fertigung haben.

3.4.3 Kreislaufwirtschaft und Umstellung auf Sekundärrouten

Für die Herstellung von Materialien wie Stahl, Aluminium, Papier, Glas und Kunststoffe liegt der Energieverbrauch der Sekundärroute mitunter ein Vielfaches unter dem der Primärroute. Entsprechend weist der weitere Ausbau der Kreislaufwirtschaft ein großes Potenzial zur Dekarbonisierung der Industrie auf. Im Modell FORECAST werden Primär- und Sekundärroute ausgewählter CO_2-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 Sekundärroute, 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 einen weiteren Ausbau relativ niedrig. In allen Szenarien wird die Sekundärroute von Stahl und Kunststoffen deutlich ausgebaut, da hier große THG-Minderungspotenziale liegen. Besonders die Steigerung des Anteils von Elektrostahl von etwa 30 % in 2015 auf 50 % im Jahr 2045 hat eine hohe CO_2-Minderung zur Folge, da die Primärroute über den Kohle- und Kokseinsatz im Hochofen sehr CO_2-intensiv ist. Dies wird von den Annahmen gestützt, dass die Produktion von hochwertigem Sekundärstahl den industriellen Maßstab erreicht hat und in Hochleistungsstahlsegmenten (z. B. Luftfahrt und Automobil) eingesetzt werden kann. Derartige Anlagen sind zum aktuellen Zeitpunkt in Entwicklung (z. B. Voestalpine) und sollen zukünftig flexible Kombinationen der Rohmaterialzuführung (Roheisen, Schrott, Eisenschwamm) ermöglichen. Des Weiteren wird von einer steigenden Schrottverfügbarkeit basierend auf dem steigenden Stahlverbrauch der letzten Jahrzehnte sowie verbesserter Sammel- und Sortierungsverfahren ausgegangen.

Tabelle 9: Annahmen zur Kreislaufwirtschaft

T45-Grundszenarien

Produkt	Recyclingquoten bis 2045
Stahl	Sekundärstahl von 30 % auf 50 %
Kunststoffe/Ethylen	Kunststoffrecycling: +15-%-Punkte
Glas	Steigerung Flachglasrecycling
Papier	Altpapierrecycling von 77 % auf 82 %
Aluminium	Steigerung Sekundäraluminium von 54 % auf 73 %

Bei den meisten Produkten ist die Produktion über die Sekundärroute auf Basis von Recyclingmaterialien weniger Energie- und CO_2-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 CO_2-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 CO_2-Emissionen in der Herstellungsphase ausgewählt wurden.

Tabelle 9 fasst die zentralen Annahmen zum Fortschritt der Kreislaufwirtschaft für Produkte mit besonders hohen CO_2-Emissionen zusammen. Während der Umbau zu einer umfassenden Kreislaufwirtschaft viele weitere Produkte und Branchen betrifft, wird der Schwerpunkt in dieser Studie auf besonders CO_2-intensive Produkte gelegt. So werden die größten Hebel zur CO_2-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 CO_2-intensiven Materialien entlang der Wertschöpfungsketten sowie in den unterschiedlichen Verbrauchsbereichen ein hohes ungenutztes Potenzial zur Minderung der CO_2-Emissionen sowie des Energieverbrauchs auf. CO_2-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 über 50 CO_2-intensiven Produkten szenarioabhängig definiert. Damit ist es möglich, Materialeffizienz deutlich konkreter zu berücksichtigen, als dies alleine mit wirtschaftlichen Aktivitätsgrößen der Fall wäre. Für alle T45-Szenarien wurden hier die gleichen Annahmen getroffen, die je Produkt in Tabelle 10 zusammengefasst sind. Strategien zur Erhöhung der Materialeffizienz sind vielfältig und können je nach Sektor oder Produkt sehr unterschiedlich ausfallen, weshalb der hier hinterlegte Materialeffizienzfortschritt aggregiert als Produktionsrückgang gegenüber der Referenz für die wichtigsten Produkte dargestellt wird.

Die getroffenen Annahmen basieren auf der Auswertung und Einschätzung von relevanten Studien (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 15 % angenommen. Somit ist die in allen Szenarien hinterlegte Produktionsmenge der Produkte im Jahr 2045 um 7 % bis 15 % niedriger als im Jahr 2019. Für ausgewählte Produkte sind weitere szenario-inhärente Trends berücksichtigt. So geht der Bedarf an Kalk stärker zurück, da der Einsatzzweck im Hochofen und in der Rauchgasentschwefelung bei Kohlekraftwerken entfällt. Auch die Ammoniakherstellung sinkt stärker, da ein sinkender Kunstdüngereinsatz in der Landwirtschaft angenommen wurde.

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 CO_2-intensiven Produkte werden in der Bauwirtschaft eingesetzt. Entsprechend ist dies der Schlüsselsektor, um eine effektive Materialeffizienzstrategie mit hoher CO_2-Wirkung umzusetzen.

Tabelle 10: Annahmen zum Fortschritt der Materialeffizienz in den T45-Szenarien

Die Prozentwerte geben an, um wie viel die Produktionsmenge einzelner Produkte gegenüber dem Jahr 2019 als Reaktion von Materialeffizienzanstrengungen sinkt.

Produkt	Rückgang Produktion in 2045 ggü. 2019	Hintergrund
Rohstahl	10 %	Nachfragereduktion: Effizientere Produktverwendung und Materialsubstitution, z. B. in der Automobilindustrie
Aluminium	<5 %	Nachfragereduktion; ausgenommen Kupfer (steigender Bedarf elektrische Leiter für z. B. Motoren kompensiert Effizienzfortschritt)
Papier	10 %	Nachfragereduktion: Trend zu papierlosen Anwendungen
Behälterglas	15 %	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Produktgestaltung
Zement	8 %	Nachfragereduktion durch Materialeffizienz in der Bauwirtschaft
Klinker[1]	16 %	Rückgang Klinkeranteil in der Zementproduktion von 0,73 in 2015 auf 0,67 in 2045 und entsprechender Anstieg bei alternativen Zumahlstoffen (1 = 100 % Klinker im Zement)
Kalk	30 %	Rückgang maßgeblich durch Kohleausstieg, zum Teil durch Stahltransformation
Ammoniak	10 %	Nachfragereduktion Mineraldünger (Präzisionslandbau, verbesserte Stickstoffaufnahme)
Kunststoffe, Ethylen	13 %	Nachfragereduktion Massenkunststoffe (z. B. Verpackungen)
Fleisch/Molkerei	30 %	Rückgang aufgrund geänderter Ernährungsgewohnheiten

1: Insgesamt sinkt die Klinkerproduktion um 24 %, davon 16 % durch Materialeffizienz und 8 % durch Substitution mit neuen Bindemitteln.
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.[15] Entsprechend der empirischen Literatur zur Diffusion von Effizienztechniken wird im Modell die Amortisationsdauer der Investitionen als zentrales Wirtschaftlichkeitskriterium angesetzt.

Allen T45-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.

3.4.6 Prozesswechsel auf klimafreundliche Produktionsverfahren

Die Umstellung auf eine nahezu CO_2-neutrale Produktion erfordert in den T45-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 CO_2-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 CO_2-arme oder potenziell CO_2-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 11 gibt einen Überblick der berücksichtigten Verfahren, der zugehörigen Referenztechnik, dem CO_2-Minderungspotenzial sowie eine Einordnung zur technischen Reife entsprechend des „Technology Readiness Level“ (TRL[16]). Investitionen werden bezogen auf die Produktionskapazität angegeben und sind als Größenordnung zu verstehen, da es große Unsicherheiten und gleichzeitig 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 CO_2-armen Verfahren beruhen auf dem Einsatz von CO_2-neutralen Sekundärenergieträgern wie Strom oder Wasserstoff. Zu direkter Elektrifizierung zählt die elektrisch beheizte Glasschmelzwanne. Andere Verfahren nutzen CO_2-neutral hergestellten Wasserstoff als Energieträger und Reduktionsmittel (Stahl: H_2-DRI) und Rohstoff (Chemie: H_2-Methanol, H_2-Ammoniak). Andere Ansätze verfolgen Materialsubstitutionsstrategien. Diese umfassen die Markteinführung neuer Zementsorten (CO_2-armer Zement), die geringere Anteile des problematischen Rohstoffs Kalkstein nutzen und zum Teil einen geringeren energetischen Aufwand erfordern.

[15] Für eine Übersicht der abgebildeten Effizienztechniken wird verwiesen auf Fleiter et al. 2013.

[16] 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).

Für eine ausführlichere Diskussion der technischen Reife der einzelnen Technologien wird auf den Bericht zu den TN-Szenarien verwiesen (Fleiter et al. 2023).

Tabelle 11: Übersicht der Annahmen zu klimafreundlichen Produktionsverfahren

Branche	Neues Verfahren	Referenz-Verfahren	TRL	THG-Min-derung ggü. Ref [%][1]	Spezifischer Energie-verbrauch [GJ/t]	Spez. Investitionen [Euro/t Kapazität][4] 2030	Spez. Investitionen [Euro/t Kapazität][4] 2045	Quellen
Chemie	H_2 als Rohstoff für Ammoniak Synthesegas	Dampf-reformierung (Rohstoff Erdgas)	8-9	Bis 100 %	6,2 (elektrisch) 25,2 (Rohstoff)	27[3]	27[3]	(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 %[2]	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 erdölbasierten Raffinerieprodukten (Naphtha)	8-9	<0 bis > 100 %[2]	5,0 (elektrisch) 87,9 (Rohstoff)	282	231	(Bazzanella und Ausfelder 2017; Stork et al. 2018)
	Elektrische Steamckracker	Steamcracker mit erdölbasierten Raffinerieprodukten (Naphtha)	5-6	Bis zu 100 % der direkten Emissionen (Scope 1)	36 (energetisch) 110 (Rohstoff)	425 (nur Austausch Ofen)	425	(van Delft und Kler 2017)
Stahl	H_2-DRI + EAF	Hochofen-Route	7	Bis ~95 %	13	415 bis 1000[5]	415 bis 1000	(Vogl et al. 2018; Fischedick et al. 2014; ASTIER et al. 1982; Arens und Vogl 2019);
	PtG-DRI + EAF	Hochofen-Route	9	Bis ~95 %	13	415 bis 1000	415 bis 1000	Annahme wie H2-DRI
Zement	CO_2-armer Zement (-30 %, hoher Belit-Anteil)	Portland Zement (Alit-basiert)	8-9	25-30 %	3,3	44[3]	24[3]	(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
Glas	Elektrisch beheizte Glaswanne (Flachglas)	Erdgas (Regenerativ-Brenner)	6-7	80 %	10	188	154	(Rehfeldt et al. 2020) (Pfeifer et al. 2011)
	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: Annahme: Wasserstoff/PtG und Strombedarf wird mit erneuerbaren Energien gedeckt.
2: Je nach Herkunft und Verbleib des im Produkt gebundenen CO_2. In dieser Studie wird das benötigte CO_2 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).
3: Investitionen beziehen sich auf eine Modernisierung bestehender Anlagen, keinen vollständigen Neubau.
4: 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.
5: Größenordnung von 1.000 Euro/t Rohstahlkapazität in mehreren Projektankündigungen in Deutschland genannt.

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 Literaturauswahl in Tabelle 11). In allen T45-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).

3.4.7 Brennstoffwechsel in Öfen und Dampferzeugung

Die Vermeidungsstrategie Brennstoffwechsel beschreibt den Wechsel von fossilen auf CO_2-neutrale Energieträger bei überwiegend gleichen technischen Anlagen und Verfahren. Je nach Branche, Verfahren und Technik ist Brennstoffwechsel mit wenig Aufwand und Kosten verbunden, kann aber auch nur mit sehr umfangreichem Neubau von Anlagen realisierbar sein. 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 CO_2-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. CO_2-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 Dampfkesseln 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 sind[17]), 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 T45-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 erdgasbefeuerter Anlagen durch direkte Elektrifizierung. Für elektrische oder Wasserstoff-befeuerte Öfen, die nicht separat in Tabelle 11 aufgeführt sind, sondern als Querschnittstechnik modelliert werden, werden Fixkosten von im Mittel 400 €/kW installierte thermische Leistung, 20 Jahre Lebensdauer und 4.000 Volllaststunden pro Jahr angenommen.

Tabelle 12: 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	Thermische Effizienz
KWK	BHKW (Erdgas, Biomasse)	500	10	25	41 %
	Erdgas-Gasturbine	450	18	25	40 %
	Erdgas-Gas- und Dampfturbine	1528	46	25	40 %
	Dampfturbine (alle Energieträger)	800	24	40	59 %
	Brennstoffzelle	3373	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 %
	Kompressions-wärmepumpe	449	4	20	283 %
	Fernwärme	76	1	40	100 %

[17] Zum Beispiel in der Kupferbearbeitung, in Härtereien oder Temperaturführung an Stahlflachprodukten (Banderwärmung).

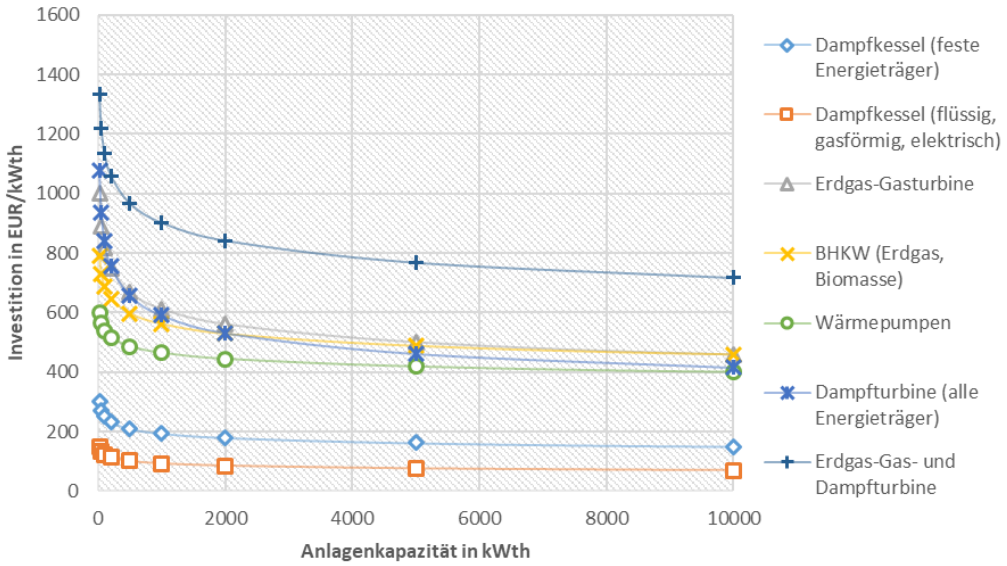
Für die Modellierung des Brennstoffwechsels in der Dampferzeugung sind u. a. Annahmen zu Investitionen, Betriebskosten, Lebensdauer und Nutzungsgrad der unterschiedlichen Technologieoptionen nötig. Diese sind in Tabelle 12 für eine beispielhafte Anlage mit 5 MW thermischer Leistung zusammengefasst. Im Modell FORECAST wird berücksichtigt, dass sich die spezifischen Investitionen entsprechend der Anlagengröße deutlich ändern und bei kleineren Anlagen deutlich höher sind (siehe Abbildung 12).

Im Bereich der Niedertemperatur sind Wärmepumpen (Vorlauftemperatur >90 °C) mit hoher Leistung eine sehr relevante CO_2-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 MW[18] erreicht (Arpagaus 2018). Das TRL wird auf 7 bis 9 geschätzt. Maßgebliche Hemmnisse für den breiten Einsatz sind wirtschaftlicher Natur (Verhältnis Erdgas-Strompreis), die bislang eine Hochskalierung für größere Leistungen verhindert haben. In den T45-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 und decken Leistungsbereiche bis über 60 MW ab. Unter bestimmten Bedingungen unter Ausnutzung ihrer spezifischen Vorteile (Regelbarkeit, Effizienz, Eignung als Backupsystem) 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.

Abbildung 12: Spezifische Investition verschiedener Dampferzeuger

In Abhängigkeit von der Anlagengröße.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

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

3.4.8 CO_2-Abscheidung, Transport und Speicherung

Alle 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. Gleichzeitig ist die Wirksamkeit von primären Vermeidungsmaßnahmen z. B. durch eine Umstellung auf Materialien mit geringeren CO_2-Fußabdruck in der Bauwirtschaft sehr unsicher. CO_2-Abscheidung und Speicherung (CCS) oder Nutzung (CCU) wird hier einen Beitrag zur THG-Neutralität leisten.

Die Erreichung einer CO_2-Neutralität birgt speziell im Industriesektor besondere Herausforderungen. Zusätzlich zu energiebedingten Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger fallen in bestimmten Industrieprozessen schwer vermeidbare prozessbedingte Emissionen an. Deren größte Quellen, die Zement- und Kalkindustrie, werden aus diesem Grund auf dem Weg der Transformation kaum ohne CO_2-Abscheidung Klimaneutralität erreichen. Für einen langfristigen und nachhaltigen Umgang mit diesen abgeschiedenen CO_2-Mengen gibt es verschiedene Möglichkeiten: Zum einen stellt die Speicherung in geologischen Lagerstätten, beispielsweise ehemaligen und bereits ausgeschöpften Erdgasfeldern, eine Möglichkeit dar. Zum anderen wird CO_2 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 CO_2 in die Atmosphäre sicherzustellen und erfordert eine detaillierte Bilanzierung. Für die industrielle Nutzung von abgeschiedenem CO_2 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 CO_2 und gegebenenfalls Kompensierung durch Abscheidung von nicht-fossilem CO_2 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 ist, wobei die Zukunftsentwicklung der Kosten der Luftabscheidung noch unsicher ist (Fasihi et al. 2019).

Speziell die Herstellung von Methanol und High Value Chemicals (HVC) bietet alternative Prozessrouten, die in großem Umfang CO_2 im Zusammenhang mit grünem Wasserstoff als Rohstoffe nutzen und zur Kreislaufführung beitragen können.

Die Vermeidung von Emissionen durch die konventionelle Herstellung von Methanol und Olefinen (z. B. Ethylen) kann durch Umstellung auf alternative Prozessrouten und Nutzung grünen Wasserstoffs erfolgen. Hierdurch werden bei der Herstellung der genannten Produkte nicht nur Emissionen vermieden, sondern CO_2-Emissionen aus anderen Branchen können in großem Maßstab chemisch gebunden und CO_2 als Rohstoff genutzt werden. Der Umstieg bei der Herstellung von HVC zur Methanol-to-Olefins Prozessroute führt dabei zu steigendem Bedarf an Methanol als Zwischenprodukt. Diese Notwendigkeit eines großskaligen Zubaus an Methanolkapazitäten führt zu starkem Anstieg des Bedarfs an zusätzlichem Wasserstoff und CO_2. Hierfür ist zu berücksichtigen, dass Konzeption und Aufbau entsprechender Infrastrukturen unerlässlich sind, um Quellen (Zement- & Kalkwerke) und Senken (Chemiewerke und Raffinerien) zu verbinden und benötigte Mengen bereitzustellen.

In Tabelle 13 sind die entsprechenden Technologieannahmen zusammengefasst. Für die Schätzung der Transportkosten werden für den Neubau in der Literatur Kosten von 800 bis 900 T€ (Isoli und Chaczykowski 2017) pro Kilometer Leitungslänge eines CO_2-Transportnetzes genannt. Gleichzeitig werden in der Industrie deutlich höhere Preise genannt, die eher in der Größenordnung von 2-3

M€ liegen. Für die Modellierung wurden 2 Mio. € angenommen. Die Umwidmung von bestehenden Erdgas-Leitungen kann deutlich günstiger sein. Da es jedoch große Unsicherheiten hinsichtlich der Konkurrenz zwischen CO_2, Erdgas und Wasserstoff um die Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes gibt, werden für das gesamte CO_2-Leitungsnetz die Kosten für den Neubau angenommen. Mögliche Umwidmungen können die nötigen Investitionen entsprechend deutlich senken.

Als laufende Kosten für den CO_2-Transport wurden 5 €/t CO_2 angenommen (ZEP 2011).[19] Die Kosten zur Abscheidung des benötigten CO_2 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 €/tpa und für Langzeitbetrachtungen eine Degression der Kosten auf 80 €/tpa. an. Für die Speicherung wurden im Mittel 10 €/t CO_2 angenommen (ZEP 2011).

Tabelle 13: Angenommene Parameter CCU/S

CO_2-Abscheidung, Transport und Speicherung.

	Wert	Einheit
Kosten CO_2-Abscheidung bei Zement- und Kalkwerken[1]	120	€/tpa CO_2
Spez. Investitionen Transportnetz - Neubau	2	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

[19] Die angenommene Größenordnung bei den Transportkosten deckt sich auch mit anderen Studien. Hinsichtlich der Kosten zum CO_2-Transport werden in ZEP 2011 für eine CO_2-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 CO_2. Diese Größenordnung wird auch von Rubin et al. 2015 bestätigt.

4 Ergebnisse T45-Grundszenarien

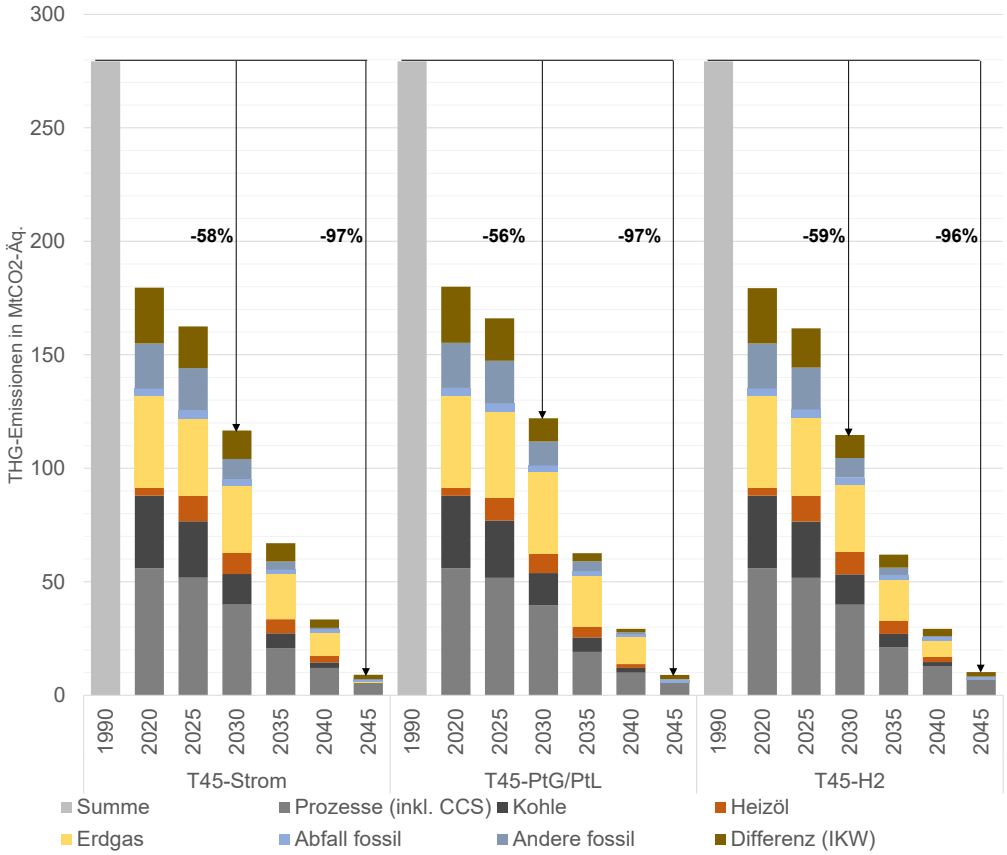
4.1 Treibhausgasemissionen

4.1.1 Übersicht

In den T45-Grundszenarien (T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2) wird mit 96 % Minderung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors das Ziel der weitgehenden Treibhausgasneutralität bis 2045[20] erreicht (Abbildung 13). Es verbleiben geringe energiebedingte Mengen aus der Verbrennung fossilen Abfalls (~1 $Mt_{CO2-Äq.}$) sowie prozessbedingte Emissionen (5-8 $Mt_{CO2-Äq.}$) aus verschiedenen kleinteiligen Quellen, darunter Produktverwendung, Elektronik, chemische Produkte (Lösungsmittel, Ruß, Schmierstoffe) und Keramik und Glas[21].

Abbildung 13: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2. Emissionsbilanzierung entsprechend der Definition des 2030-Sektorziels der Industrie: Prozessbedingte Emissionen kalibriert auf NIR 2019; energiebedingte Emissionen kalibriert auf AGEB je Energieträger und Differenz AGEB/NIR (maßgeblich Industriekraftwerke, IKW) separat ausgewiesen.



[20] Mindestens 95 % gegenüber 1990 gemäß KSG 2021. Der absolute Abstand zum Ziel (noch zulässig: 14 $Mt_{CO2-Äq.}$) beträgt 2045 zwischen 2 und 3 $Mt_{CO2-Äq.}$.

[21] 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.

Das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2030 (<118 $Mt_{CO2-Äq.}$) wird in den Szenarien T45-Strom (116,6 $Mt_{CO2-Äq.}$) und T45-H2 (114,7 $Mt_{CO2-Äq.}$) erreicht. Das Szenario T45-PtG/PtL (122,0 $Mt_{CO2-Äq.}$) verfehlt das Sektorziel 2030 um 4 $Mt_{CO2-Äq.}$. Allerdings ist in allen Szenarien nach 2030 eine weitere – sich in vielen Bereichen beschleunigende – Reduktion der Treibhausgasemissionen vorhanden, so dass das Szenario T45-PtG/PtL bereits im Jahr 2031 (114 $Mt_{CO2-Äq.}$) die Zielmarke von 2030 unterschreitet. Die gegenüber den Szenarien T45-Strom und T45-H2 vorhandenen Mehremissionen werden in T45-PtG/PtL durch starke Beimischung von CO_2-neutralen Energieträgern im Zeitverlauf abgebaut.

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 Übergang – steigende Material- und Energieeffizienz und verstärkte Kreislaufwirtschaft. Bis 2030 sinken durch diese Einflüsse die energiebedingten Treibhausgasemissionen auf 65 % bis 74 % des Niveaus von 2019 – bis 2040 auf 16 % bis 29 %. Insbesondere die Treibhausgasemissionen aus der Kohlenutzung sinken bis 2030 in allen T45-Grundszenarien deutlich (auf 42 % der Treibhausgasemissionen von 2020) – eine direkte Folge der geringeren Hochofenaktivität (siehe 3.4.6 und 4.2.2.1). Hingegen entstehen 2030 noch 73 % (T45-PtG/PtL: 89 %) der Treibhausgasemissionen von 2020 aus der Erdgasnutzung – dies vor allem durch die Erzeugung von Prozesswärme als Dampf und in Industrieöfen (siehe 4.2.1.2). Im Zuge der Preissteigerungen ab 2022 vor allem für Erdgas, ist eine begrenzte Ausweichbewegung zu Heizöl und eine damit einhergehende Steigerung der Emissionen aus dieser Quellgruppe bis 2030 (~270 % der Werte 2020) zu beobachten. Mit dem Nachlassen der Preissignale geht auch die Heizölnutzung wieder zurück (siehe 4.2.1.2). Dieser Effekt ist in T45-RedGas stärker ausgeprägt (siehe 5.2).

Im Bereich der prozessbedingten Treibhausgasemissionen sind maßgebliche Treiber für den Rückgang die Abscheidung und Nutzung oder Speicherung von CO_2 aus der Zement- und Kalkherstellung, die Umstellung der Ammoniakproduktion auf grünen Wasserstoff, die Umstellung der Primärstahlerzeugung[22], und das reduzierte Inverkehrbringen und Verwenden von Fluorkohlenwasserstoffen (FKW). Bis 2030 sinken durch diese Einflüsse die prozessbedingten Treibhausgasemissionen auf 72 % bis 73 % des Niveaus von 2019 – bis 2040 auf 26 % bis 29 %.

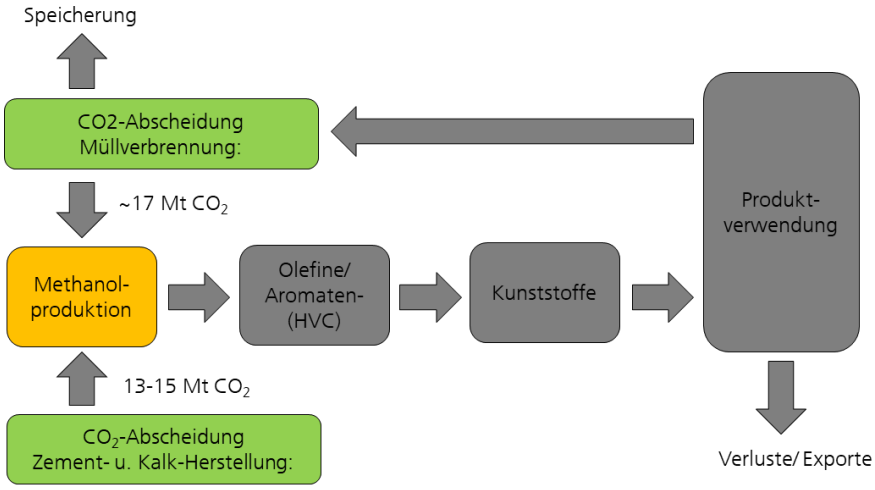
4.1.2 CO_2-Abscheidung, Nutzung und Speicherung

Alle Szenarien berücksichtigen die Abscheidung von CO_2 aus der Zement- und Kalkindustrie. Im Szenario T45-PtG/PtL wird das CO_2 in offshore Lagerstätten gespeichert, die über ein Leitungsnetz mit den CO_2 Quellen der Zement- und Kalkwerke verbunden sind. In den Szenarien T45-Strom und T45-H2 benötigt die Chemieindustrie große Mengen CO_2 zur Herstellung von Olefinen und Aromaten (High Value Chemicals). Dieser CO_2-Befarf wird in beiden Szenarien über die Abscheidung von Emissionen aus Zement- und Kalkwerken sowie Müllverbrennungsanlagen gedeckt. Nicht genutzte Emissionen werden offshore gespeichert. Alle T45-Szenarien benötigen somit ein umfassendes CO_2-Leitungsnetz.

[22] In der Inventarlogik werden relevante Teile der Treibhausgasemissionen der Hochofenroute als prozessbedingt kategorisiert.

Abbildung 14: Schematische Darstellung des CO_2-Kreislaufs

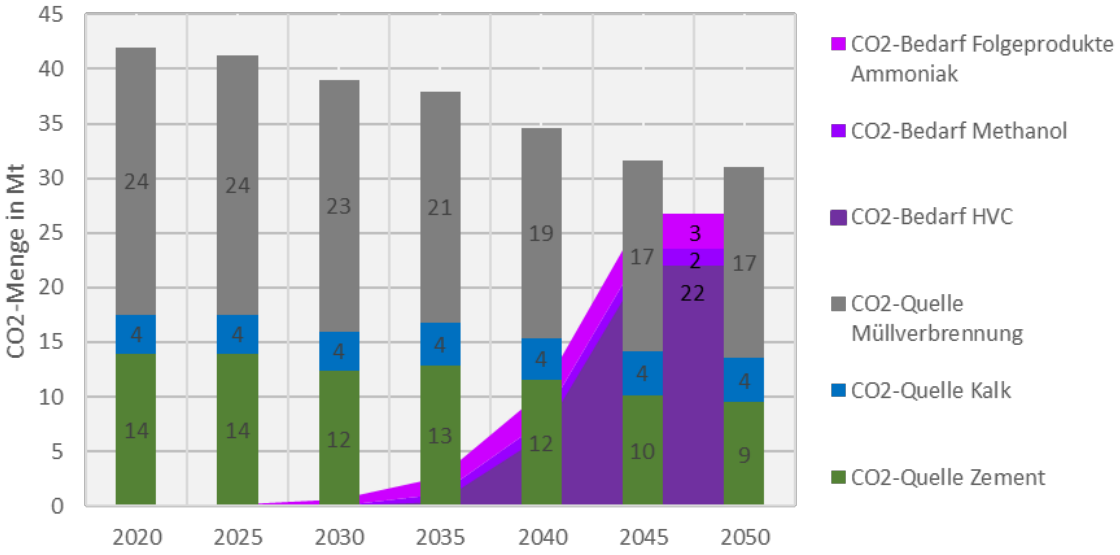
2045 im Szenario T45-Strom.



Die resultierende zeitliche Entwicklung der Emissionen sowie des Hochlaufs der CO_2-Abscheidung ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Analysen der Szenarien zeigen einen jährlichen CO_2-Bedarf von 27-33 Mt im Jahr 2045. Allein zur Herstellung von Methanol werden Mengen von 24-30 Mt CO_2 benötigt. Dieser Bedarf spiegelt eine rasant ansteigende Produktionsmenge von Methanol wider, da es als Zwischenprodukt für die CO_2-neutrale Herstellung von HVCs genutzt wird. Als Quellen für das benötigte CO_2 reichen die verbleibenden Emissionen aus Kalk- und Zementwerken von 13 mt bis 15 Mt nicht aus. Als zusätzliche Quelle ist die Abscheidung und Nutzung aus der Müllverbrennung berücksichtigt. Mit etwa 17 Mt verbleibender CO_2-Emissionen schließt sie die Lücke und kann zum Schließen des Kohlenstoffkreislaufs beitragen (Abbildung 15). Der Kreislaufschluss ist dabei unter Berücksichtigung von Entsorgung, Lebensdauer und Verluste sowie Speicherung eine Bedingung zur langfristigen CO_2-Neutralität von CCU.

Abbildung 15: Entwicklung des CO_2-Bedarfs und CO_2-Quellen

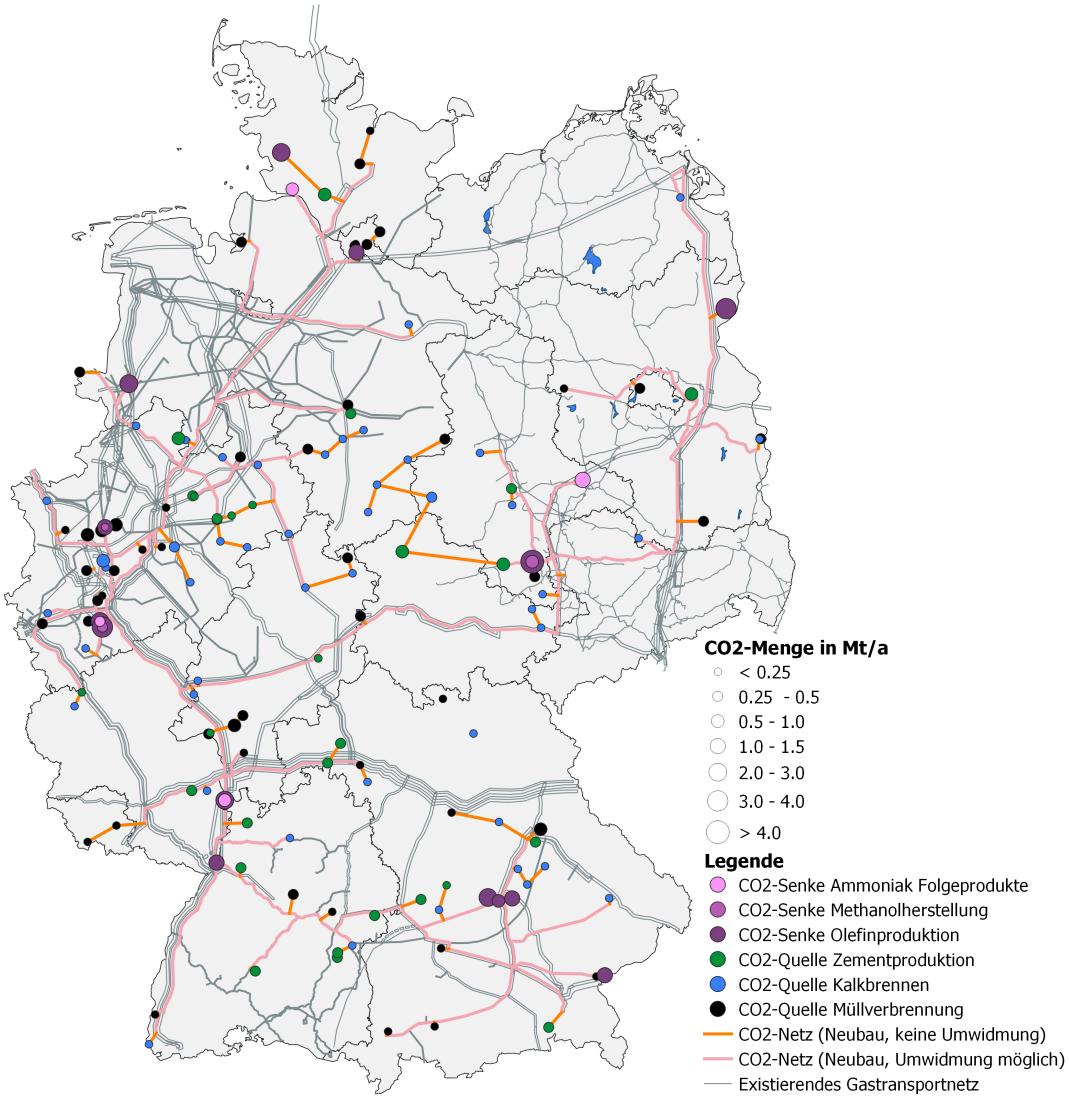
Für Szenario T45-Strom.



Für das Jahr 2045 stellt Abbildung 16 eine mögliche Infrastruktur unter Berücksichtigung der heutigen räumlichen Industriestruktur dar. Bei dieser Konzeptionierung wurde keine detaillierte

Netzplanung durchgeführt. Für den Aufbau einer CO_2-Infrastruktur ist ein kompletter Neubau angenommen, da Konkurrenz zum Bedarf an Erdgas- und Wasserstoffinfrastruktur im Übergang der Transformation sehr unsicher ist. Generell folgen die Pipelines des CO_2-Netzes den Trassen des heutigen Erdgastransportnetzes. Die Darstellung ist daher nicht als Analyse zur Projektionen einzelner Standorte und eines Detailnetzes zu verstehen, sondern zeigt den Bedarf einer solchen Infrastruktur aufgrund der breiten regionalen Verteilung und den Einfluss auf die Systemkosten. Die CO_2-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 Methanol-to-Olefins Prozessroute erfolgt an den 14 Standorten der heutigen Methanolherstellung und Steamcracker an Raffinerien und Chemieparks. Generell herrscht bei diesen Annahmen Unsicherheit, da sich durchaus andere Standortkonstellationen ergeben können.

Abbildung 16: Mögliches CO_2-Netz im Jahr 2045 inkl. Quellen und Senken



Für die überschlägige Schätzung der Gesamtlänge des Leitungsnetzes wurden entsprechend der Karte in Abbildung 16 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 4500 km potenziell aus Umwidmung des Erdgasnetzes bereitgestellt werden können. Bei der Berechnung der entstehenden Kosten ist ein kompletter Neubau angenommen. Eine Umwidmung eines Teiles der Leitungen würde entsprechend die Kosten deutlich senken. Um eine höhere Aussagekraft über eine realistische Netzlänge zu erhalten, müsste eine detaillierte Netzplanung durchgeführt werden.

Tabelle 14: Kosten- und Mengenabschätzungen CCU/S

CO_2-Abscheidung und Transport im Szenario T45-Strom.

	Einheit	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H2
CO_2-Bedarf	Mt CO_2/a	27	6	33
CO_2-Abscheidung aus Zement- und Kalkwerken (prozessbedingt)	Mt CO_2/a	13	15	14
CO_2-Abscheidung aus Müllverbrennungsanlagen	Mt CO_2/a	17	17	17
Pipeline Länge Gesamt	km	6.000	2800	6.000
Davon ggfs. mögliche Umwidmung	km	4.500	2500	4.500

4.1.3 Detaildarstellung prozessbedingte Treibhausgasemissionen

In allen T45-Szenarien werden prozessbedingte Treibhausgasemissionen auf Prozess- bzw. Produktebene berechnet und den Quellkategorien des Nationalen Inventarberichts (Umweltbundesamt 2022) zugeordnet. Diese Aufteilung ist nicht immer – z. B. bei der Zuordnung der Treibhausgasemissionen der Stahlherstellung – eindeutig. Unter Berücksichtigung der Besonderheiten der Bilanzierung (siehe 2.3.1) können aber Entwicklungspfade der prozessbedingten Treibhausgasemissionen auf hohem Detailgrad angegeben werden (Tabelle 15). Darin enthalten sind im Startjahr 2019 große Emissionsquellen der nichtmetallischen Mineralien (Zement, 13,3 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$ und Kalk, 4,5 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$), Chemie (Ammoniak, 4,1 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$) und Metalle (Stahl, 17 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$) und viele weitere kleine Quellen, die in Summe 2019 etwa 6 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$ ausmachten. Hinzu kommen – im Rahmen der Inventarlogik – Treibhausgasemissionen aus Produktverwendung, die der Industrie zugerechnet werden (2019: 11,9 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$). 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 auf nur noch 14 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$. Durch CCU/S der Treibhausgasemissionen aus der Zement- und Kalkproduktion werden diese bilanziell ausgeglichen[23].

Die 2045 verbleibenden Treibhausgasemissionen der anderen Quellen in Höhe von 6,5 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$ sind bestimmt durch die Verwendung von Lösungsmitteln und prozessbedingten Treibhausgasemissionen aus der Glas- und Keramikherstellung (~3 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$) 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 daher nicht notwendig unvermeidbar.

Die Entwicklung ist in allen T45-Szenarien weitgehend ähnlich, in Tabelle 15 wird nur T45-Strom dargestellt.

[23] Hier nicht dargestellt, siehe 4.1.2.

Tabelle 15: Prozessbedingte Treibhausgasemissionen in T45-Strom

Bezeichnungen in Klammern geben Quellkategorie gemäß Inventarbericht an. Quellkategorien ohne Vermeidungsstrategie sind mit "*" markiert – diese sind konstant gehalten oder lediglich an der Produktionsaktivität skaliert. Angaben in $Mt_{CO2-Äq.}$. Die Angaben bei Zementklinker und Kalk sind vor der CO_2-Abscheidung und Speicherung oder Nutzung.

Sektor	Produktgruppe	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Nichtmetallische Mineralien	Zementklinker (2.A.1)	13.3	13.5	13.6	13.1	12.3	11.6	10.9
	Kalk (2.A.2)	4.5	4.2	3.8	3.3	3.1	3.2	3.2
	*Glas (2.A.3)	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	*Keramik (2.A.4a)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Chemie	Ammoniak (2.B.1)	4.1	3.8	3.7	3.4	2.2	1.0	0.0
	Salpetersäure (2.B.2)	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0
	Adipinsäure (2.B.3)	0.2	0.0	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	0.0
	*Soda ash (2.B.7)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	*Petrochemie und Ruß (2.B.8)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3
	*Fluorchemikalien (2.B.9)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Metalle	Stahl (Teil von 2.C.1)	17.0	15.8	16.6	12.2	5.3	1.7	0.0
	*Eisenlegierungen (2.C.2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Aluminium (2.C.3)	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5
	*Magnesium (2.C.4)	0.0	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	0.1
	*Zink (2.C.6)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Produktverwendung und Elektronik	*Schmierstoffe (2.D.1)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	*Paraffinwachs (2.D.2)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	*Lösungsmittel NMVOC (2.D.3)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
	FKWs (2.F)	9.3	8.7	5.9	3.0	0.0	0.0	0.0
	*Elektronik (2.E.1)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	*Andere Produktverwendung (2.G)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	*Andere (2.H)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	SUMME in $Mt_{CO2-Äq.}$	**55.9**	**53.6**	**51.0**	**42.2**	**30.0**	**24.4**	**20.9**

4.2 Energienachfrage

4.2.1 Übersicht

Die resultierende Energienachfrage des Industriesektors ist in Abbildung 17 im Szenariovergleich gezeigt. Sie umfasst sowohl den Endenergieverbrauch wie auch den stofflichen Einsatz von Energieträgern in der (Petro-)chemischen Industrie.

Der gesamte Energieeinsatz sinkt in allen T45-Grundszenarien leicht von 928 TWh auf 850 TWh (T45-PtG/PtL) bis 875 TWh (T45-H2). 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 oder leicht steigen.

Der Energiebedarf differenziert sich in den T45-Szenarien gemäß der jeweilig namensgebenden Schwerpunktsetzung auf. T45-Strom elektrifiziert sowohl direkt als auch indirekt. T45-PtG/PtL nutzt große Mengen synthetische Brennstoffe (synthetisches Methan und andere Kohlenwasserstoffe). T45-H2 nutzt überwiegend Wasserstoff sowohl für energetische als auch stoffliche Zwecke. Im Detail bedeutet das:

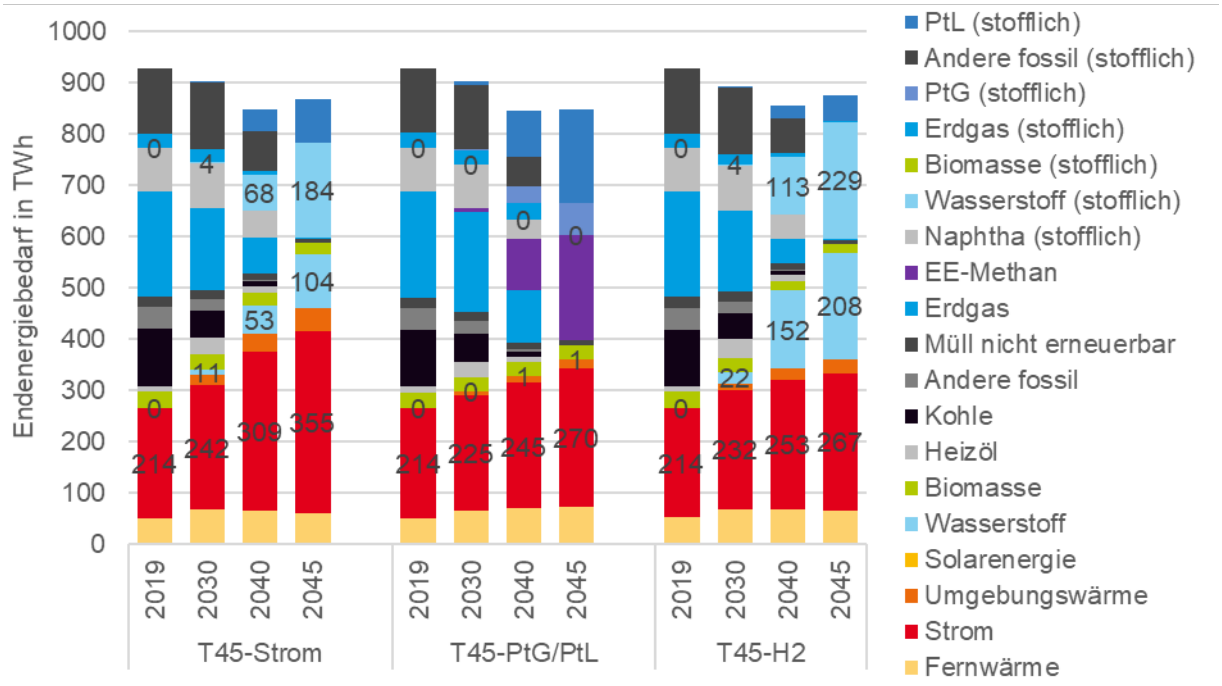
In T45-Strom steigt der Strombedarf von 2019 (214 TWh) bis 2030 auf 309 TWh und 2045 355 TWh – also um 65 % – an. Hinzu kommt eine indirekte Elektrifizierung über die Nutzung von 288 TWh Wasserstoff (davon 184 TWh stofflich) und 84 TWh synthetische Kohlenwasserstoffe (stofflich). Ergänzt wird der Endenergiebedarf durch einen leicht wachsenden Sockel Fernwärme (2045: 61 TWh), leicht sinkende Biomassenutzung (2045: 23 TWh) und deutlich vergrößerte Nutzung von Umgebungswärme in Wärmepumpen (2045: 45 TWh). In Summe sind dadurch 96 % des Energiebedarfs durch direkt oder indirekt strombasierte Technologien gedeckt.

In T45-PtG/PtL steigt der Strombedarf von 2019 (214 TWh) bis 2030 nur leicht auf 225 TWh und 2045 auf 270 TWh – also um 26 % – an. Hinzu kommt eine starke indirekte Elektrifizierung über die Nutzung von 451 TWh synthetische Kohlenwasserstoffe (davon 205 TWh als synthetisches Methan energetisch und 245 TWh stofflich). Ergänzt wird der Endenergiebedarf durch einen wachsenden Sockel Fernwärme (2045: 73 TWh), leicht sinkende Biomassenutzung (2045: 26 TWh) und vergrößerte Nutzung von Umgebungswärme in Wärmepumpen (2045: 16 TWh). In Summe sind dadurch 96 % des Energiebedarfs durch direkt oder indirekt strombasierte Energieträger gedeckt.

In T45-H2 steigt der Strombedarf von 2019 (214 TWh) bis 2030 nur leicht auf 232 TWh und 2045 auf 267 TWh – also um 25 % – an. Hinzu kommt eine starke indirekte Elektrifizierung über die Nutzung von 437 TWh Wasserstoff (davon 229 TWh stofflich) und 51 TWh synthetische Kohlenwasserstoffe (stofflich). Ergänzt wird der Endenergiebedarf durch einen wachsenden Sockel Fernwärme (2045: 66 TWh), sinkende Biomassenutzung (2045: 16 TWh) und vergrößerte Nutzung von Umgebungswärme in Wärmepumpen (2045: 27 TWh). In Summe sind dadurch 97 % des Energiebedarfs durch direkt oder indirekt strombasierte Energieträger gedeckt.

Abbildung 17: Energieverbrauch im Industriesektor

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2. Dargestellt ist die Summe aus Endenergieeinsatz nach AGEB und stofflichem Energieträgereinsatz.



4.2.1.1 Endenergiebedarf (ohne stoffliche Nutzung)

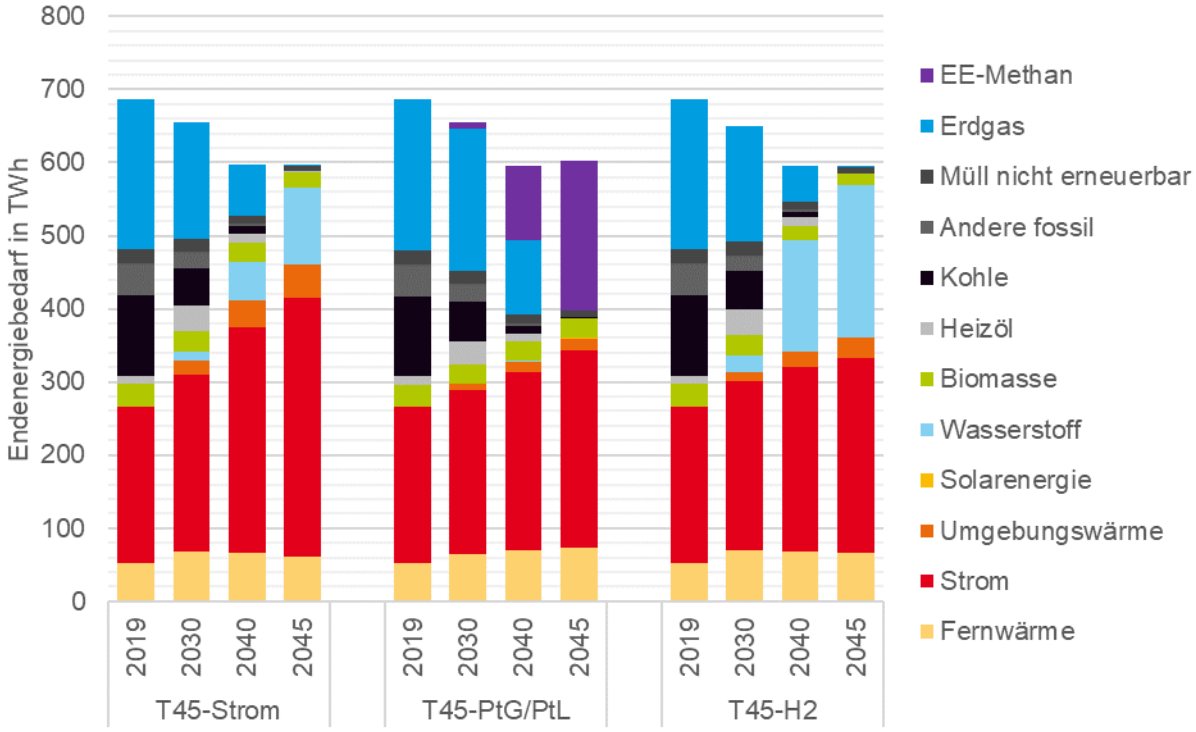
In Abgrenzung zur gesamten Nachfrage (in Abbildung 17) wird bei der Betrachtung der rein energetischen Nutzung (Abbildung 18) die Ausdifferenzierung der Szenarien deutlicher[24]: Zwar verringert sich der Endenergiebedarf bis 2045 in allen Szenarien von 687 TWh auf etwa 600 TWh. Der unterschiedliche Grad der Elektrifizierung (T45-Strom: 60 %, T45-PtG/PtL: 45 %, T45-H2: 45 % – 2019: 31 %) bildet aber ein markantes Unterscheidungskriterium. In den geringer elektrifizierten Szenarien wird die so entstehende Lücke von etwa 100 TWh durch Wasserstoff oder EE-Methan gedeckt. Damit nehmen Gase dort eine gegenüber 2019 bilanziell vergleichbare Rolle ein – mit deutlich verschobenen Anwendungen (siehe dazu auch Abbildung 20 bis Abbildung 22). Fossile – insbesondere feste – Energieträger werden bis 2040 weitgehend ersetzt, maßgeblich durch die Umstellung der Rohstahlerzeugung getrieben. Als Reaktion auf aus der Energiekrise resultierende Preissignale steigt die Nutzung von Heizöl nur zwischenzeitlich an (2019: 11 TWh, 2030: 31-36 TWh, 2040: 10-13 TWh).

Im Rahmen dieser Szenarien kann die Struktur des Endenergiebedarfs 2045 folgendermaßen beschrieben werden: Es existiert eine robuste Bedarfsstruktur von etwa 260 TWh Strom, 100 TWh Gase und 120 TWh andere (Biomasse, Fern- und Umgebungswärme, Müll) Energieträger. Diese wird je nach Szenario durch zusätzliche ~ 100 TWh Strom, Wasserstoff oder EE-Methan ergänzt.

[24] Die Differenz der beiden Darstellungen – die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie – ist in Abbildung 31 dargestellt.

Abbildung 18: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Industriesektor

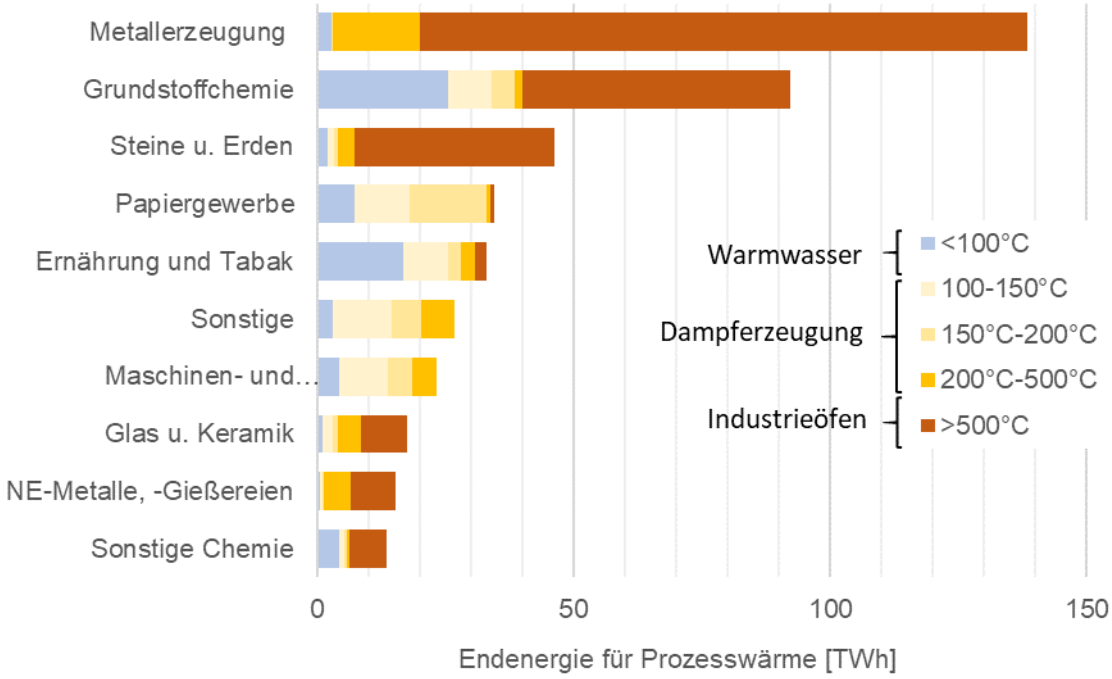
Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2. Dargestellt ist die Summe aus Endenergieeinsatz nach AGEB ohne stofflichen Energieträgereinsatz.



4.2.1.2 Energieträgerwechsel in der Prozesswärme

Die Prozesswärmeerzeugung ist durch die zur Durchführung der Produktionsverfahren benötigte Temperatur bestimmt. In den T45-Szenarien der Industrie werden sieben Temperaturniveaus unterschieden, die in drei Bereiche (Warmwasser, Dampferzeugung und Industrieöfen) gruppiert werden (Abbildung 19). Der Hochtemperaturbereich der Industrieöfen dominiert in den besonders energieintensiven Branchen Metallerzeugung, Grundstoffchemie und (Verarbeitung von) Steinen und Erden – zwischen 55 % (Grundstoffchemie) und 86 % (Metallerzeugung), zusammen werden dort 210 TWh über 500 °C (67 TWh darunter) benötigt[25]. Ähnlich hohe Bedeutung haben Hochtemperaturbedarfe in der sonstigen chemischen Industrie, Nicht-Eisen-Metallen und Gießereien sowie Glas und Keramik (je um 55 %). In anderen Subsektoren wird Prozesswärme überwiegend (>90 %) als Warmwasser und Dampf bereitgestellt.

Abbildung 19: Modellierte Temperaturverteilung des Prozesswärmebedarfs (2019)



Wasserstoff ist insbesondere in Hochtemperaturanwendungen, die konventionell mit Erdgas betrieben werden und eine hohe Energiedichte sowie Temperaturen benötigen ("Industrieöfen") vorteilhaft gegenüber einer direkten Elektrifizierung. Ob eine direkte Elektrifizierung grundsätzlich möglich ist, muss oft konkret am Standort entschieden werden – dies bedeutet oft Neubau von Anlagen und kann logistische Herausforderungen erzeugen[26].

Die Energieträgernutzung zur Erzeugung von Prozesswärme trägt stark zur Ausdifferenzierung der T45-Grundszenarien bei (Abbildung 20). Darüber hinaus ist sie mit 441 TWh (2019) – davon 81 % fossil – die größte Anwendung. Darin enthalten sind alle Subsektoren, insbesondere aber die

[25] Diese Berechnungen sind eine Mischung aus auf einzelne Prozesse bezogene Bedarfe und subsektorweiten Temperaturprofilen. Sie enthalten daher einen Anteil von Schätzungen und sind nicht als auf die TWh genau zu verstehen.

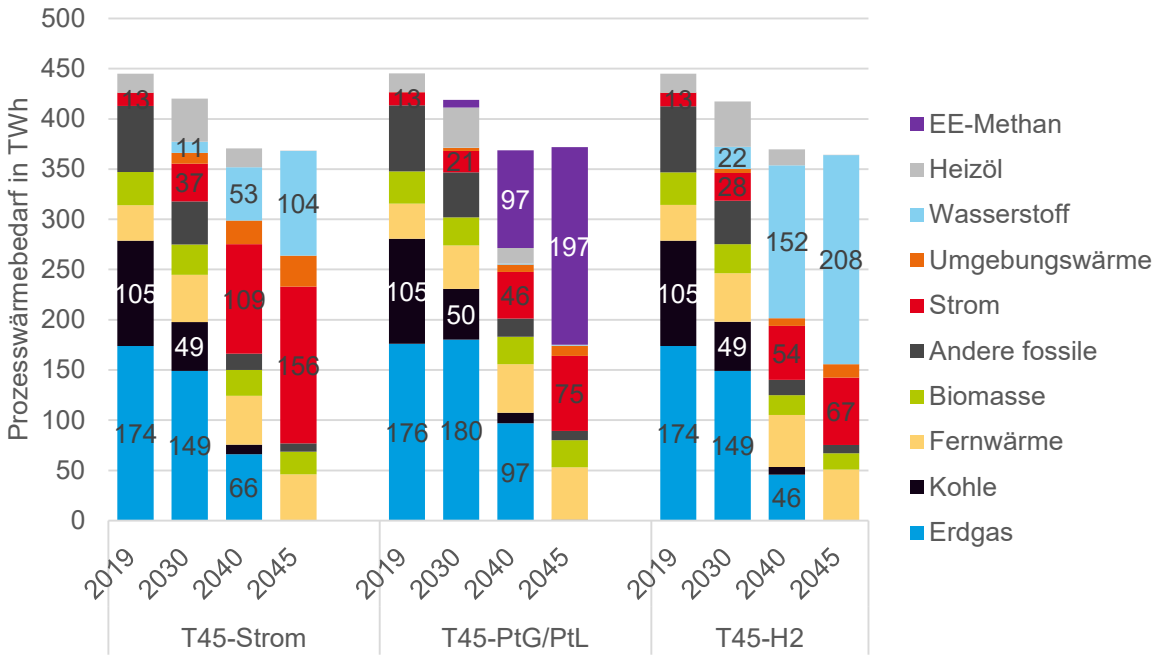
[26] Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Standortinterne und standortexterne Faktoren. Standortintern kann der verfügbare Bauraum in bestehenden Gebäuden oder die insgesamt verfügbare Fläche der direkten Elektrifizierung Grenzen setzen, da mit heute verfügbarer Technik oft größere Bauräume (zum 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.

energieintensiven Grundstoffindustrien (Eisen und Stahl, Nicht-Eisen-Metalle, Nicht-metallische Mineralien, Chemie und Papierherstellung). Die für diese Subsektoren dargestellten Dekarbonisierungsstrategien (siehe 4.2.2) wirken daher auch auf diese Auswertungsebene – so wird die Kohlenutzung maßgeblich durch den Umstieg vom Hochofen auf die Direktreduktion in der Roheisenerzeugung reduziert.

Die Entwicklung der gesamten Endenergienachfrage der T45-Szenarien wird stark durch die der Prozesswärmebereitstellung – diese umfasst etwa 60 % der Nachfrage – bestimmt: Starke Elektrifizierung in T45-Strom auf 156 TWh in 2045 (Anteil von 42 % an der Nachfrage nach Prozesswärme), ergänzt durch 104 TWh Wasserstoff (28 %) und 108 TWh andere Energieträger (Fernwärme, Umgebungswärme, Biomasse, fossiler Müll, 29 %). Dem gegenüber steht in T45-PtG/PtL starke Nutzung von EE-Methan (197 TWh, 53 %), ergänzt durch Elektrifizierung (75 TWh, 20 %) und andere Energieträger (98 TWh, 26 %). T45-H2 setzt einen Schwerpunkt auf die energetische Nutzung von Wasserstoff (208 TWh, 57 %), ergänzt durch Elektrifizierung (67 TWh, 18 %) und andere Energieträger (89 TWh, 24 %). Für alle T45-Szenarien gilt, dass zwischen 2020 und 2030 der Einsatz von Heizölen – bedingt durch höhere Erdgaspreise und dadurch ausgelöste Ausweichbewegungen – ansteigt (von etwa 14 TWh auf 35-41 TWh).

Abbildung 20: Endenergiebedarf in der Prozesswärme

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2. Kombination aus Hochtemperatur (Industrieöfen) und Nieder- und Mitteltemperatur (Dampf und Warmwasser).



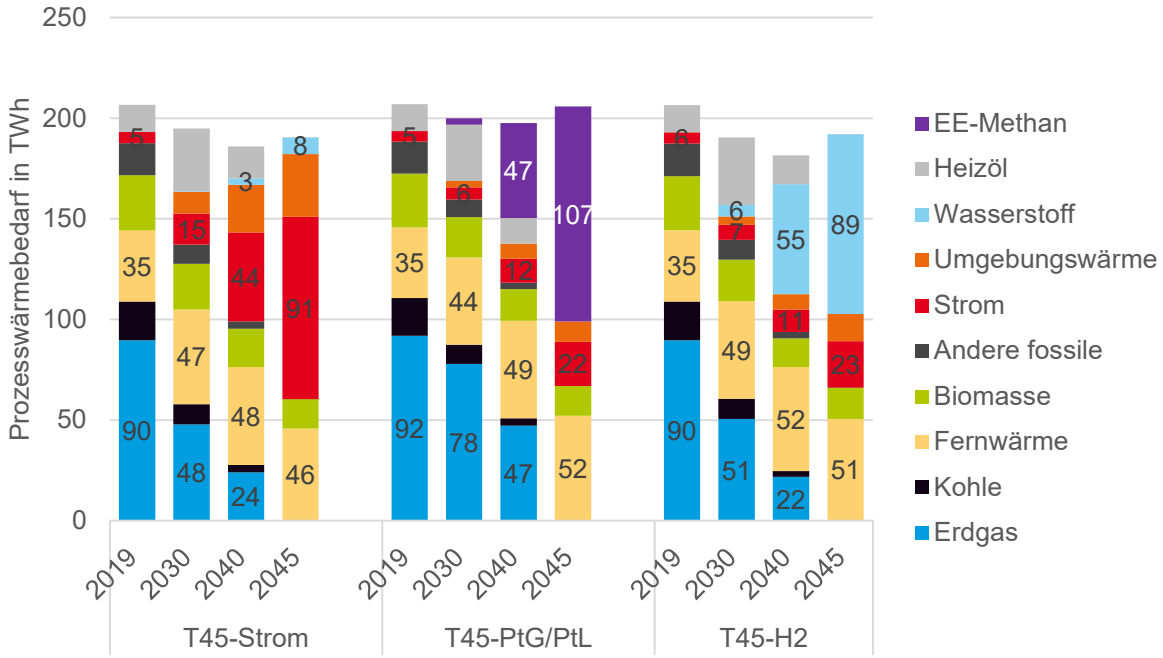
Eine Unterteilung der Prozesswärme in Hoch- und Niedertemperatur ermöglicht die Abgrenzung deutlich unterscheidbarer Erzeugungstechnologien. Im **Temperaturbereich unter 500 °C**, davon der Großteil unter 200 °C, dominiert die Bereitstellung von Prozesswärme in Form von Dampf und Warmwasser (Abbildung 21). Mit 203 TWh betrifft dies 47 % der gesamten Prozesswärme – davon 67 % fossil. Die Lieferung von Wärme hat in diesem Technologiebereich eine größere Bedeutung (2019: 35 TWh, 17 %), 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.

Der Transformationspfad und die Ausdifferenzierung der T45-Grundszenarien im Ganzen ist der Dampferzeugung ähnlich (stärkere direkte Elektrifizierung in T45-Strom, Einsatz von Wasserstoff

und EE-Methan in T45-H2 und T45-PtG/PtL). Eine Besonderheit ist hier, dass ein großer Teil des Wärmebedarfs durch Wärmepumpen adressierbar ist. In T45-Strom werden so 2045 27 % (52 TWh) durch Umgebungswärme (und Strom als Antrieb der Wärmepumpen) bedient. Zusammen mit Fernwärme decken diese beiden – in ihrem Temperaturbereich beschränkten – Technologien knapp die Hälfte des Energiebedarfs ab. Wasserstoff spielt nur eine geringfügige Rolle in T45-Strom. Eine geringere direkte Elektrifizierung (betrifft auch Wärmepumpen) in T45-H2 und T45-PtG/PtL wird durch Wasserstoff/EE-Methan (89 TWh und 107 TWh) kompensiert.

Abbildung 21: Endenergiebedarf in der Dampf- und Warmwassererzeugung

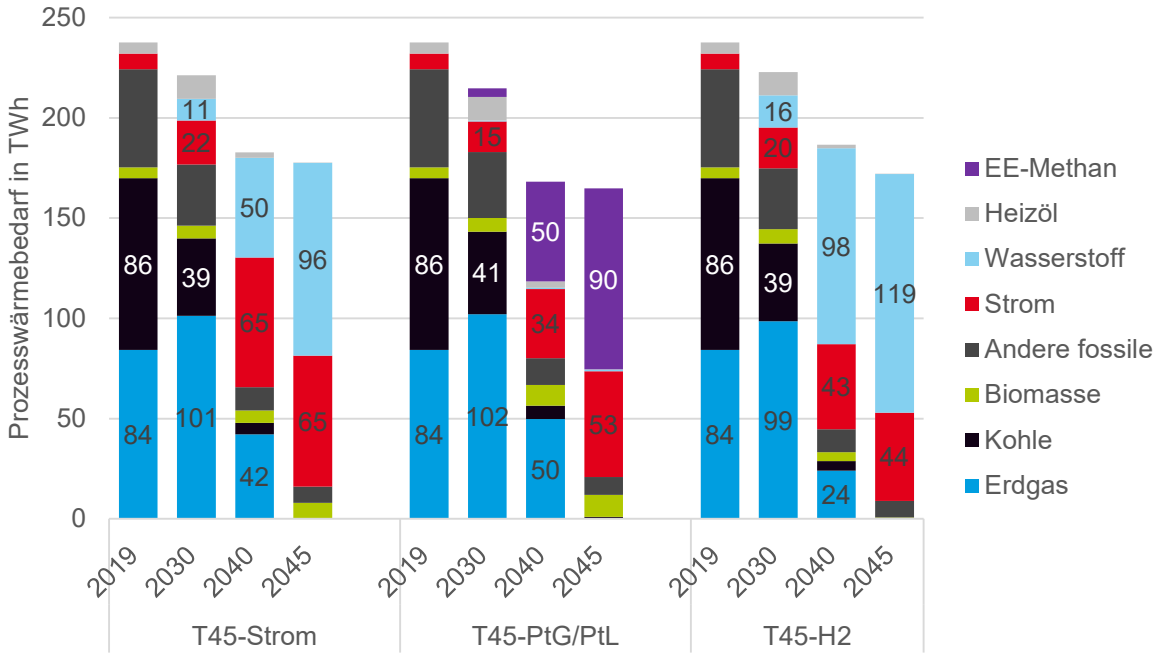
Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2. Temperaturbereich bis 500 °C, davon >75 % unter 200 °C.



Im **Hochtemperaturbereich über 500 °C** wird eine große Vielfalt an unterschiedlichen Industrieö fen genutzt. Dadurch spielt in allen Szenarien die Nutzung Wasserstoff/EE-Methan eine größere Rolle (zwischen 98 und 119 TWh in 2045). In allen Szenarien ist aber auch eine stark ansteigende direkte Elektrifizierung (zwischen 43 und 63 TWh in 2045) – ausgehend von einem geringen Niveau (8 TWh in 2019) – vorhanden. 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 – im Übergang wird in den T45-Grundszenarien mehr Erdgas (2030: etwa 100 TWh, +16 TWh gegenüber 2019) in Industrieöfen eingesetzt.

Abbildung 22: Endenergiebedarf in Industrieöfen

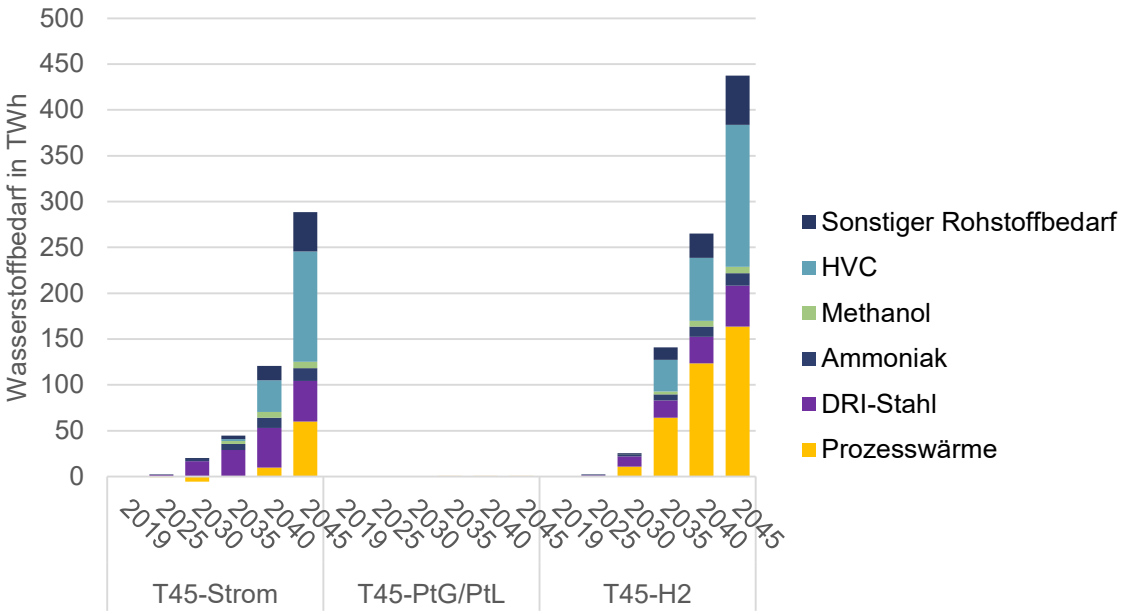
Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2. Temperaturbereich über 500 °C.



4.2.1.3 Verwendung von Wasserstoff, Strom und PtG/PtL

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

Abbildung 23: Einsatz von Wasserstoff im Industriesektor in den T45-Grundszenarien



Wasserstoff wird im Szenario T45-Strom für Anwendungen eingesetzt, die sich nicht oder nur schlecht direkt elektrifizieren lassen (Abbildung 23). Der hohe Bedarf für die Versorgung der chemischen Industrie mit CO_2-neutralen Feedstocks dominiert die Gesamtmengen langfristig und

erreicht bis 2045 etwa 185 TWh. Größter Nachfrager ist die Produktion von Olefinen und Aromaten (High value chemicals - HVC, siehe auch Abschnitt 4.2.2.3). Auch die Stahlindustrie hat durch die Umstellung auf die Direktreduktion einen hohen Wasserstoffbedarf von über 40 TWh und ist bis 2035 der größte Wasserstoffverbraucher. Zusätzlich gibt es einen eher verteilten Einsatz von Wasserstoff in der Prozesswärme (siehe Abschnitt 4.2.1.2).

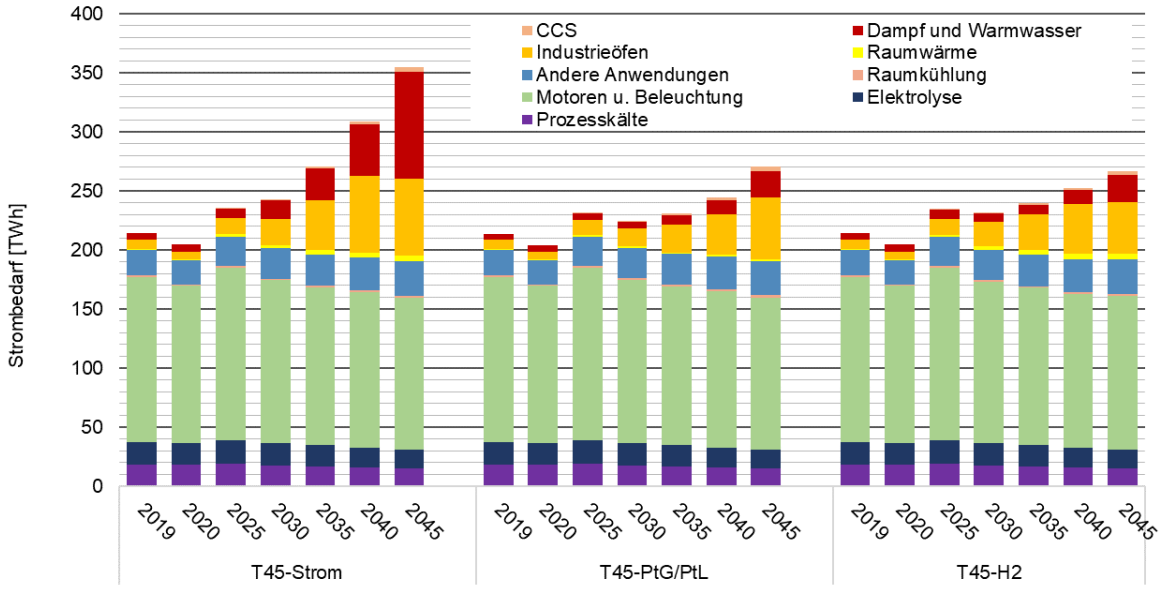
Im Szenario **T45-H2** wird über diese notwendig erscheinende Nutzung hinausgegangen. Wasserstoff ist in diesem Szenario nicht nur dort attraktiv, wo kaum Alternativen bestehen, sondern auch in anderen Bereichen wettbewerbsfähig. Dazu gehören Industrieöfen, die im Szenario T45-Strom stärker direkt elektrifiziert werden (2045: +23 TWh H2-Bedarf gegenüber T45-Strom) und die breite Nutzung in der Dampferzeugung (2045: +81 TWh H2-Bedarf gegenüber T45-Strom). Dabei wird maßgeblich direkte Elektrifizierung ersetzt (darunter auch Wärmepumpen). 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 ist als ein Maximalszenario zum zukünftigen Wasserstoffbedarf zu betrachten.

Dass die mögliche zukünftige Bandbreite beim Einsatz von Wasserstoff noch sehr groß ist, zeigt das Szenario **T45-PtG/PtL**: Hier findet kein direkter Einsatz von Wasserstoff statt.

Strom steigt in seiner Bedeutung als Energieträger in allen T45-Szenarien, sowohl relativ wie absolut (siehe Abbildung 24). Die heutige Stromnutzung wird durch Anwendungen wie Elektromotoren, Pumpen, Kompressoren, Druckluft etc. bestimmt. Der Stromverbrauch für diese Anwendungen nimmt im Szenarioverlauf kontinuierlich ab. Hier werden steigend wirkende Effekte durch das angenommene Wirtschaftswachstum von etwa 1 % pro Jahr durch Effizienzgewinne überkompensiert. Insgesamt steigt der Stromverbrauch dennoch, da in allen Szenarien zumindest eine Teilelektrifizierung der Prozesswärme stattfindet, die z. B. im T45-H2 einen Strombedarf von etwa 70 TWh aufweist. Im Szenario T45-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 auf insgesamt über 350 TWh.

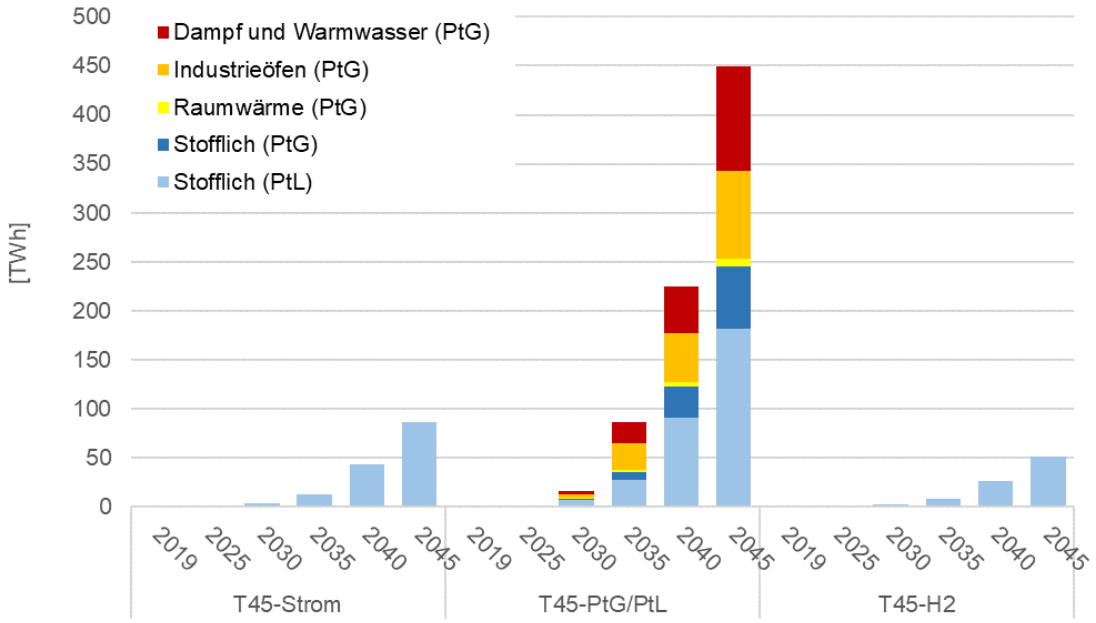
Abbildung 24: Direkter Einsatz von Strom im Industriesektor

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2.



Die CO_2-neutralen Energieträger PtG und PtL spielen besonders im Szenario T45-PtG/PtL eine zentrale Rolle und ersetzen den Wasserstoffbedarf der anderen Szenarien vollständig. Der Bedarf nach PtG und PtL steigt darin bis zum Jahr 2045 auf etwa 450 TWh. Hiervon entfallen etwa 200 TWh auf die Prozesswärme und gut 250 TWh auf die stoffliche Nutzung in der Grundstoffchemie (siehe auch Abschnitt 3.3.3). Größter einzelner Posten ist die Nachfrage nach synthetischen Kohlenwasserstoffen für die Herstellung von Olefinen und Aromaten in der Chemie – hier ersetzen diese Erdgas und Raffinerieprodukte auf Basis von Erdöl. In den Szenarien T45-Strom und T45-H2 werden geringere Mengen PtL für die chemische Industrie verwendet (komplementär mit wasserstoffbasierter Produktion). Dort entsteht eine Nachfrage nach PtL von 50 TWh (T45-Strom) bis etwa 80 TWh (T45-H2). Dieses wird für die Herstellung von Olefinen und Aromaten benötigt, die auch in diesen Szenarien teilweise über elektrische Steamcracker betrieben wird.

Abbildung 25: Einsatz von PtG und PtL im Industriesektor in den T45-Grundszenarien



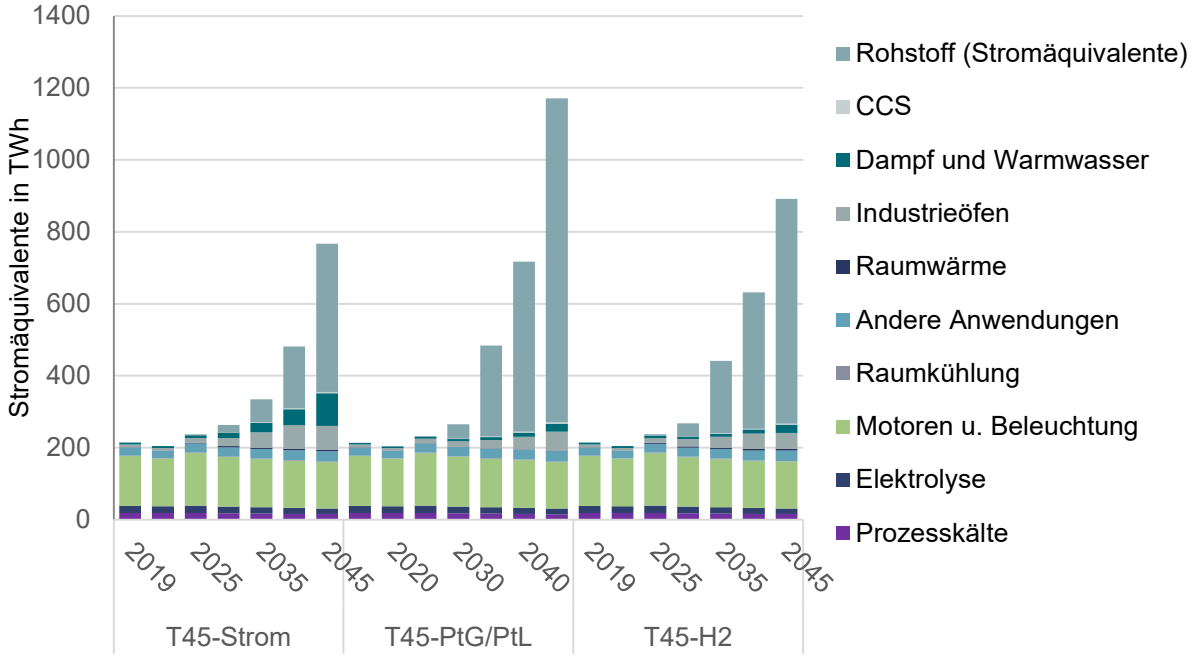
Ob direkt oder indirekt, alle Szenarien zeigen einen deutlichen Anstieg des Bedarfs an "Stromäquivalenten" (Abbildung 26). Diese – nur virtuelle und nicht in die Gesamtbilanzierung eingehende – Größe zeigt den gesamten Stromverbrauch inkl. der Bereitstellung anderer Sekundärenergieträger wie Wasserstoff und PtG sowie PtL.

Für eine erste Schätzung werden einfache Umwandlungsfaktoren angenommen (Faktor 1,43 für Wasserstoff, Faktor 2 für EE-Methan). Der Bedarf dieser Stromäquivalente ist nach Anwendungen aufgeschlüsselt. Er beläuft sich 2019 auf 214 TWh, maßgeblich für klassische Anwendungen wie Motoren und Beleuchtung, Prozesskälte, Raumwärme und -kälte sowie Elektrolyse. Während dieser Block bis 2045 in allen Szenarien auf 161-163 TWh sinkt, kommen neue Anwendungen hinzu. Darunter die direkte Elektrifizierung von Prozesswärme in Industrieöfen und Dampferzeugung (vgl. Abbildung 20 bis Abbildung 22), die von 13 TWh (2019) bis 2045 auf 156 TWh (T45-Strom), 75 TWh (T45-PtG/PtL) oder 67 TWh (T45-H2) ansteigt. Der 2045 in allen Szenarien größte Block aber ist die indirekte Elektrifizierung – die Herstellung von strombasierten Gasen – die zwischen 412 TWh (T45-Strom) und 900 TWh (T45-PtG/PtL) benötigt (T45-H2: 625 TWh). Der Strombedarf für die Abscheidung von CO_2 ist mit knapp 4 TWh geringfügig. Dies dient lediglich einer einfachen

Abschätzung der Größenordnung - im Berichtsmodul zum Energieangebot wird die Erzeugungsseite genauer betrachtet.

Abbildung 26: Stromäquivalente im Industriesektor nach Anwendungen

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2. Inklusive theoretischem Stromverbrauch für die Herstellung von Wasserstoff/PtG als Stromäquivalente. Für die Berechnung des potenziellen Stromverbrauchs für die Erzeugung von Wasserstoff/PtG wurde eine Umwandlungseffizienz der Prozesskette von 70 % (Wasserstoff) bzw. 50 % (PtG) 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 allen T45-Grundszenarien[27] sinkt die Energieintensität von 1,4 kWh/€ (2019) bis 2045 auf 0,9 kWh/€ (Abbildung 27, Tabelle 16). 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 2019 und 2045 um 37 % (CAGR[28] 0,8 %). Die energieintensiven Grundstoffe (im Bereich >3 kWh/€) wachsen aber unterdurchschnittlich (z. B. Metallerzeugung 15 %, CAGR 0,3 %; Grundstoffchemie 20 %, CAGR 0,4 %), Branchen mit hoher Wertschöpfung aber vergleichsweise geringer Energieintensität (im Bereich <0,5 kWh/€) wachsen stärker (z. B. Fahrzeugbau 51 %, CAGR 1 %; Maschinenbau 55 %, CAGR 1,1 %).

Darüber hinaus steigen Energie- und Materialeffizienz sowie Kreislaufwirtschaft insbesondere der energieintensiven Branchen, es wird daher pro € 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

[27] Die Unterschiede zwischen T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2 sind – aufgrund der für alle als identisch angenommene Wertschöpfung – lediglich durch die geringfügig unterschiedlichen Endenergiebedarfe bedingt und vernachlässigbar.

[28] 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 potentiell 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/€ (-1,7 % bis 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 T45-Grundszenarien fortgeführt bzw. – trotz der teilweisen Erreichung technischer Grenzen – mit -1,5 % pro Jahr leicht übertroffen[29].

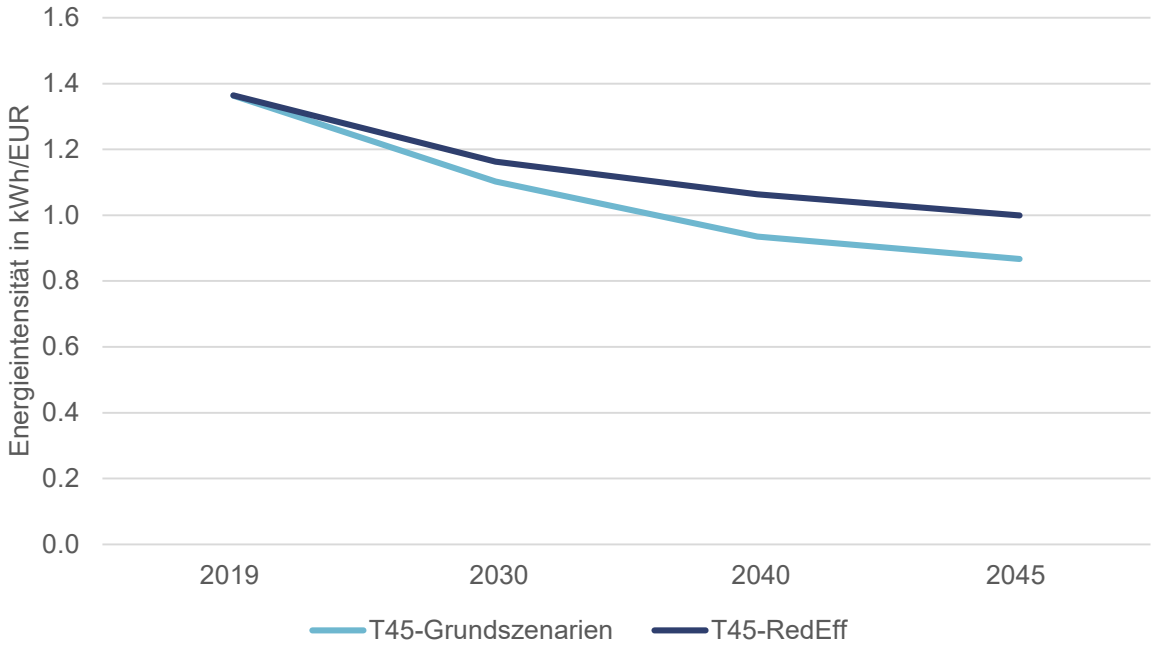
Tabelle 16: Entwicklung der Energieintensität in den T45-Grundszenarien

[kWh/€]	2019	2045			CAGR 2020-2045		
		T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H2	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H2
Bergbau	2,01	1,94	1,88	1,92	-0,1 %	-0,2 %	-0,1 %
Ernährung und Tabak	1,15	0,77	0,78	0,76	-1,4 %	-1,3 %	-1,4 %
Fahrzeugbau	0,30	0,25	0,25	0,25	-0,5 %	-0,6 %	-0,5 %
Glas u. Keramik	3,69	2,86	2,91	2,62	-0,8 %	-0,8 %	-1,1 %
Grundstoffchemie	5,44	3,37	4,08	3,52	-1,6 %	-1,0 %	-1,4 %
Gummi- u. Kunststoffwaren	0,83	0,53	0,52	0,53	-1,5 %	-1,5 %	-1,5 %
Maschinenbau	0,23	0,19	0,19	0,19	-0,7 %	-0,7 %	-0,7 %
Metallbearbeitung	0,60	0,66	0,65	0,70	0,3 %	0,3 %	0,5 %
Metallerzeugung	25,14	14,94	13,67	14,94	-1,7 %	-2,0 %	-1,7 %
NE-Metalle, -gießereien	3,47	2,52	2,49	2,51	-1,1 %	-1,1 %	-1,1 %
Papiergewerbe	5,46	3,73	3,57	3,69	-1,3 %	-1,4 %	-1,3 %
Sonstige chemische Industrie	0,74	0,72	0,71	0,72	-0,1 %	-0,1 %	-0,1 %
Sonstige Wirtschaftszweige	0,51	0,42	0,41	0,42	-0,6 %	-0,8 %	-0,7 %
Verarbeitung v. Steine u. Erden	7,30	5,08	5,12	5,08	-1,2 %	-1,2 %	-1,2 %
Gewichtetes Mittel	**1,36**	**0,86**	**0,87**	**0,87**	**-1,5 %**	**-1,5 %**	**-1,5 %**

[29] In T45-RedEff wird dieser Wert mit im Mittel 1 % pro Jahr deutlich unterschritten.

Abbildung 27: Energieintensität der industriellen Wertschöpfung

Vergleich der T45-Grundszeanrien und T45-RedEff. Die Energieintensität wird berechnet als Quotient aus der sich aus der Modellierung ergebenden Energienachfrage und der exogen angenommenen industriellen Bruttowertschöpfung. Sinkende Energieintensität ist auf verschiedene Quellen zurückzuführen (Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft, Energieeffizienz, Verschiebung von Wertschöpfung zwischen Wirtschaftsbereichen und Einsatz innovativer Technologien).



4.2.2 Branchenbetrachtung

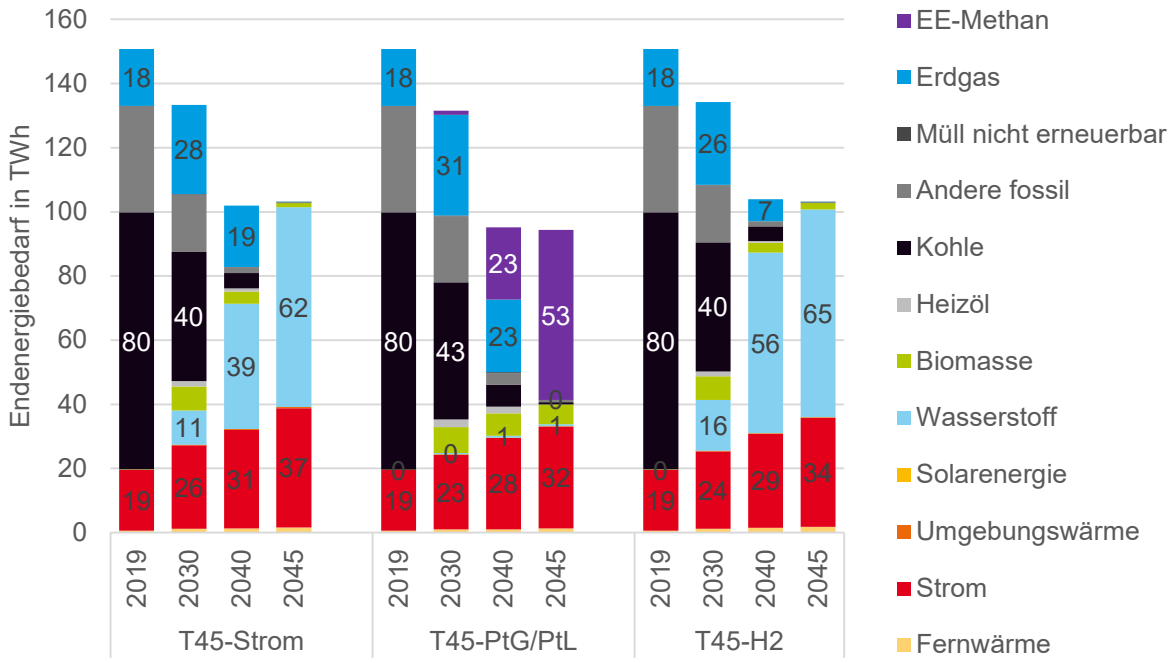
Um die gesetzten sektoralen Klimaziele zu erreichen, sind je Branche (Subsektor) aufgrund unterschiedlicher Ausgangsbedingungen und Herausforderungen spezifische Strategien erforderlich. In Summe ergeben diese die in Abbildung 13 und Abbildung 17 dargestellte Energienutzung und Treibhausgasemissionen. Die in den T45-Grundszenarien modellierten Transformationspfade für die Subsektoren Eisen und Stahl, die Verarbeitung von Steinen und Erden und die chemische Industrie werden im Folgenden quantifiziert.

4.2.2.1 Herstellung von Eisen- und Stahl

Die Ergebnisse zum resultierenden Energieverbrauch in der Stahlherstellung sind in Abbildung 28 zusammengefasst. Die T45-Grundszenarien unterscheiden sich besonders durch die in der Direktreduktion angewendeten Energieträger. Während in T45-Strom eine lange Erdgasbrücke (noch 2040 8 Mt Produktion, 19 TWh Erdgasbedarf) angenommen wird, ist diese in T45-H2 deutlich reduziert (2 Mt in 2040, 7 TWh Erdgasbedarf). Dabei wird davon ausgegangen, dass Direktreduktionsanlagen, die anfangs mit Erdgas betrieben werden, bei ihrer Errichtung mit der Absicht und der Option geplant werden, sie auf Wasserstoff umzustellen (H2-ready). In T45-PtG/PtL wird nahtlos von Erdgas auf EE-Methan umgestellt, dies erfordert keinen Eingriff in den Prozess. In starker Abhängigkeit von der Beimischungsrate besteht dadurch aber in T45-PtG/PtL noch 2040 ein Erdgasbedarf von 23 TWh in der Metallerzeugung. In allen T45-Grundszenarien sinkt der gesamte Endenergiebedarf bis 2045 durch eine leichte Reduktion der Aktivität und Prozesswechsel (auch auf die Sekundärroute) auf etwa100 TWh.

Abbildung 28: Endenergiebedarf im Subsektor Metallerzeugung

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2.



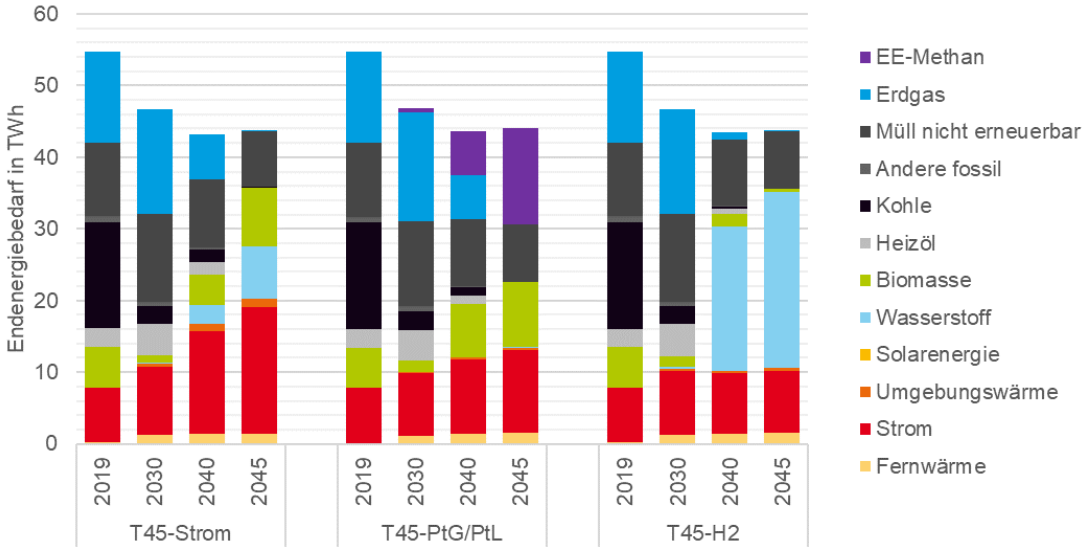
4.2.2.2 Verarbeitung Steine- und Erden (Zement und Kalk)

Die Ergebnisse zum resultierenden Energiebedarf in der Branche Steine u. Erden sind in Abbildung 29 zusammengefasst. Der Energieträgerwechsel zielt als primäre Maßnahme der

Treibhausgasvermeidung auf die Substitution der Kohlenutzung durch die in den jeweiligen T45-Grundszenarien zentralen Energieträger Strom, Wasserstoff und PtG. Während 2019 Braunkohle noch rund 20 % des Energiebedarfs ausmacht, sind es 2030 noch 2 % – um 2040 wird die letzte Kohle ersetzt, bis 2045 auch Erdgas. Der jeweilige Hauptenergieträger wird durch Biomasse (bzw. biogene Anteile in weiter eingesetztem Müll) sowie nicht-erneuerbare Anteile von Müll ergänzt. In sehr geringem Umfang kann gelieferte und Umweltwärme in Prozessschritten mit niedriger Temperatur (z. B. Aufbereitung und Trocknung von Brennstoffen und Rohmaterial) unterstützen.

Abbildung 29: Endenergiebedarf im Subsektor Verarbeitung von Steinen und Erden

Vergleich von T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2.



Nahezu CO_2-neutrale Produktion wird erst durch den flächendeckenden Einsatz von *CO_2-Abscheidung* erreicht. Einem Einstieg in die CO_2-Abscheidung bis zum Jahr 2030 (2 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$) folgt in allen T45-Grundszenarien ein schneller Hochlauf, sodass bis 2045 alle Zement- und Kalkwerke umgerüstet sind. Neue Anlagen (z. B. für neue Bindemittel) werden ausschließlich mit Abscheidung errichtet. Mit einer angenommenen Abscheiderate von 90 % 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 1,5 (T45-Strom) bis 3 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$ (T45-H2). In T45-PtG/PtL werden Treibhausgasemissionen nahe Null (<0,1 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$) durch die zusätzlichen negativen Emissionen durch EE-Methan erreicht.

Diese sekundären Minderungen der Treibhausgasemissionen können nur gelingen, wenn – zusätzlich zum massiven Aufwand an den Standorten selbst – der Transport des abgeschiedenen CO_2 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. Keine der notwendigen Voraussetzungen für dieses System ist momentan vorhanden, die Umsetzung entsprechend ambitioniert.

4.2.2.3 Grundstoffchemie: Rohstoffliche Nutzung von Energieträgern

Die stoffliche Nutzung von fossilen Energieträgern betrug 2018 etwa 263 TWh und kann vollständig der (petro-)chemischen Industrie zugeschrieben werden. Zur Erreichung der Klimaneutralität ist

auch hier eine Umstellung der Rohstoffbasis für eine Transformation in der chemischen Industrie erforderlich. Auch wenn die Emissionen der stofflichen Nutzung fossiler Energieträger nicht direkt bei der Herstellung, sondern erst nach ihrem Lebenszyklus in sogenannten End-of-life-Prozessen (z. B. Müllverbrennung) freigesetzt werden, ist eine Umstellung der Rohstoffbasis unumgänglich[30].

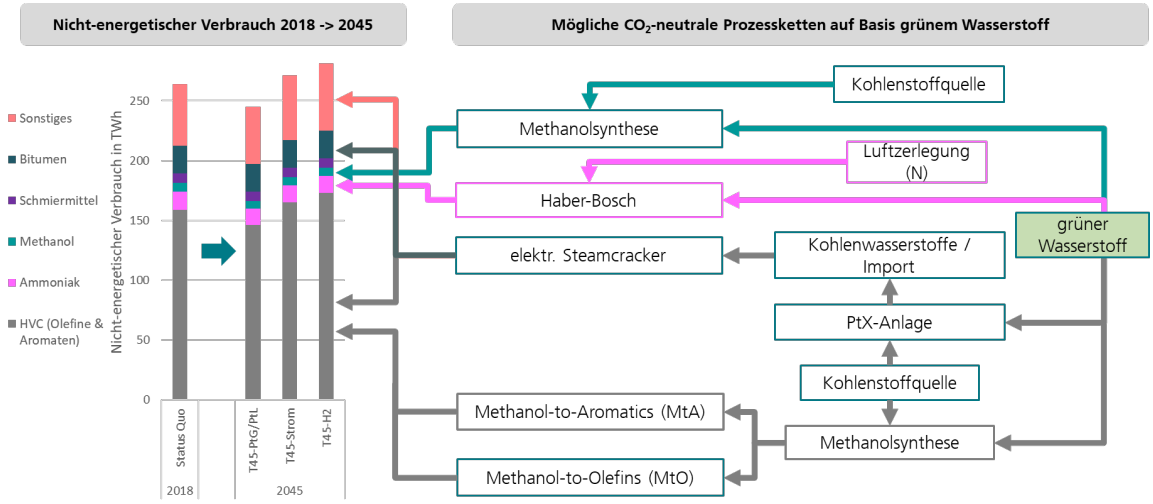
Abbildung 30 zeigt den Status Quo der stofflichen Nutzung fossiler Energieträger nach Produkt für das Jahr 2018 und das Jahr 2045 der drei T45-Grundszenarien sowie mögliche CO_2-neutrale Prozessketten zur Umstellung der Rohstoffbasis. Den größten Anteil stellt die Herstellung der sogenannten HVC in Steamcrackern dar. Für eine klimaneutrale Produktion ergeben sich zwei grundlegende Möglichkeiten: die MtO/MtA-Prozessroute über Methanol aus grünem Wasserstoff und einer Kohlenstoffquelle als Zwischenprodukt sowie den Einsatz elektrischer Steamcracker zum Aufspalten von langen synthetischen Kohlenwasserstoffen aus PtX-Anlagen (importiert oder inländisch hergestellt). Letzteres eignet sich zudem zur Produktion weiterer Produkte (z. B. Schmieröle, Bitumen, Sonstige), die heute ebenfalls als eine Art Nebenprodukte in konventionellen Steamcrackern anfallen. Die Umstellung der Produktion von Methanol lässt sich über Substitution konventioneller Erdgas-Dampfreformierung zur Bereitstellung von Synthesegas durch Wasser-Elektrolyse und eine externe Kohlenstoffquelle durchführen. Bei der Ammoniakproduktion wird ebenfalls die Erdgas-Dampfreformierung durch eine Wasser-Elektrolyse als Wasserstoffquelle ersetzt und zudem eine Luftzerlegungsanlage zur Bereitstellung von Stickstoff benötigt.

Bei Betrachtung des nicht-energetischen Bedarfs in Abbildung 30 fällt auf, dass in T45-PtG/PtL die Nachfrage insgesamt leicht sinkt, wohingegen in T45-Strom und T45-H2 ein leichter Anstieg ersichtlich ist. Grund hierfür ist der erhebliche Anteil an elektrischen Steamcrackern in T45-PtG/PtL und damit einhergehender geringerer stofflicher Bedarf durch die direkte Nutzung synthetischer Energieträger. Der erhöhte Anteil der MtO/MtA-Prozessroute in den beiden anderen Szenarien führt zu einem stofflichen Mehrbedarf durch die großen Mengen Wasserstoff, die zur Herstellung von Methanol als Zwischenprodukt benötigt werden. Damit erklärt sich auch der Anstieg des nicht-energetischen Bedarfs für HVC trotz sinkender Produktionsmengen aus Abbildung 30. Der stoffliche Bedarf für die Produktion von Ammoniak, Methanol für bisherige Anwendungen, Bitumen, Schmieröle und Sonstige bleibt hingegen aufgrund geringer prozesstechnischer Veränderungen und durch den Einsatz elektrischer Steamcracker in allen Szenarien in etwa konstant.

[30] 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 Kunststoffe nicht noch lange nach 2045 im Kreislauf zu haben.

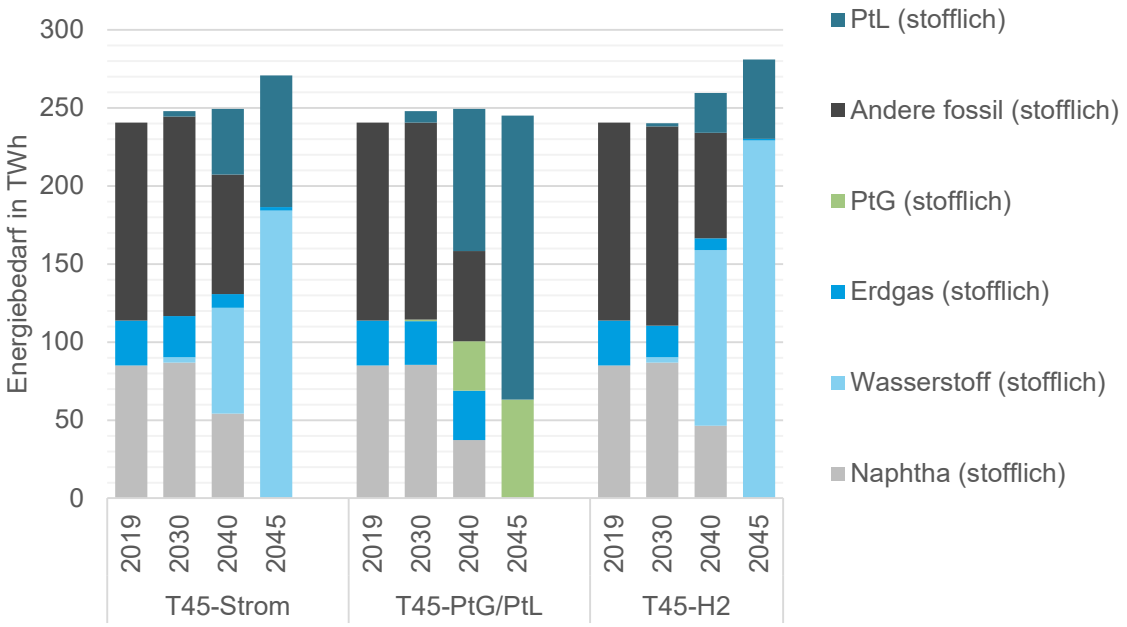
Abbildung 30: Nicht-energetischer Verbrauch fossiler Energieträger

Nach Produkt sowie Darstellung möglicher CO_2-neutraler Prozessketten auf Basis von grünem Wasserstoff.



Im Jahr 2045 liegt der stoffliche Bedarf in den T45-Grundszenarien in etwa auf heutigem Niveau (250-280 TWh, Abbildung 31). Der Hochlauf der Prozessumstellung und der Einsatz von grünem Wasserstoff und dessen Derivate beginnt etwa ab 2030 und steigt bis 2040 je nach Szenario auf eine Nutzung von 70-120 TWh. Wasserstoff ist dabei speziell in den Szenarien T45-Strom und T45-H2 ein zentraler Baustein mit einer Nutzung von 185-230 TWh in 2045. Ein gewisser Anteil von 50-80 TWh synthetischer Energieträger mit Verarbeitung in elektrischen Steamcrackern bleibt jedoch auch in diesen Szenarien zur Herstellung einiger weniger kohlenwasserstoffbasierter Produkte, wie z. B. Bitumen oder Schmieröle, erhalten und spielen somit in allen Szenarien eine Rolle. Im Szenario PtG/PtL wird der nicht-energetische Bedarf zu knapp 65 TWh aus Biomasse und 180 TWh aus PtG/PtL gedeckt. Insgesamt herrschen in allen Szenarien große Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung der Produktionsmengen und der Bedeutung von Importen.

Abbildung 31: Stoffliche Nutzung nach Energieträger in den T45-Grundstszenarien



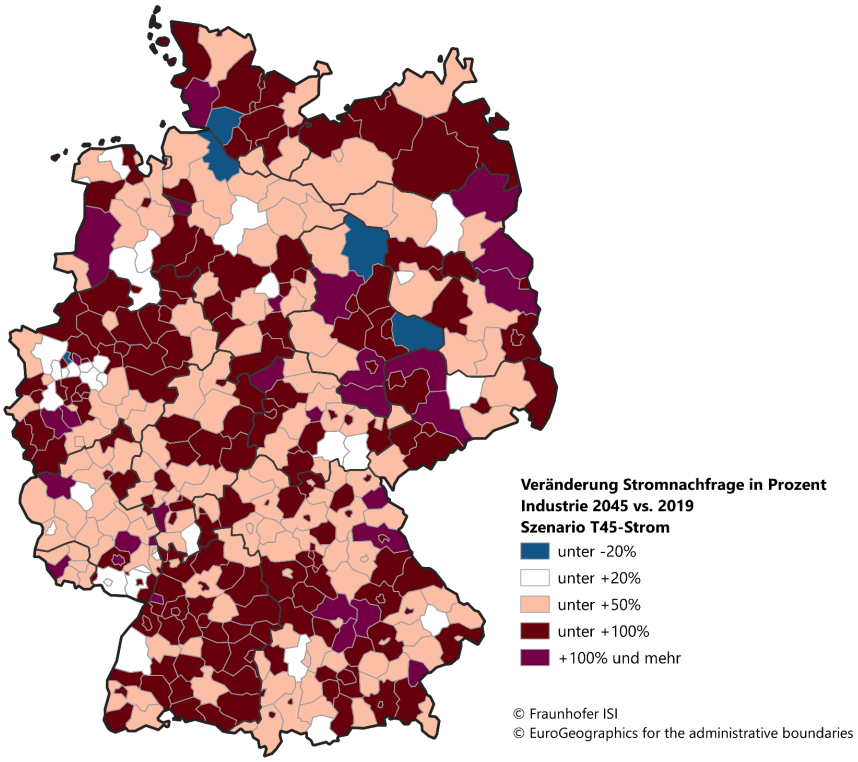
4.2.3 Regionale Energienachfrage

In der Regionalisierung wird die Energienachfrage Deutschlands auf die 401 Landkreise und kreisfreien Städte (NUTS 3) in Deutschland aufgeteilt. Dabei wird die jeweilige Industriestruktur in den Regionen berücksichtigt, da die Produktionsmenge von energieintensiven Prozessen (insbesondere der Stahl-, Zement-, Glas-, Papierindustrie, Grundstoffchemie bzw. Petrochemie) sowie die Beschäftigtenanzahl je Subsektor als Verteilschlüssel genutzt werden. 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 je nach lokaler Industriestruktur stärker oder schwächer ausgeprägt als in der nationalen Entwicklung. Dies betrifft insbesondere bei der Stahlherstellung die Umstellung der Hochofenroute auf Wasserstoffdirektreduktion und in der (petro-)chemischen Industrie erneuerbare Rohstoffe für die stoffliche Nutzung sowie den Einsatz von erneuerbar betriebenen Öfen (je nach Szenario mit Strom, Wasserstoff oder PtG). Weitere Annahmen für die chemische Grundstoffindustrie sind, dass bereits existierende Methanolstandorte in Deutschland in vergleichbarer Größenordnung zu heute auf Methanolproduktion aus grünem Wasserstoff umstellen. Die restlichen benötigten Mengen werden auf die Raffineriestandorte aufgeteilt. 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 zum Teil erheblich steigt.

Im Szenario T45-Strom führt die **Elektrifizierung zu einem strukturellen Wandel** der industriellen Energienachfrage in den meisten Regionen. In Abbildung 32 ist die prozentuale Veränderung der regionalen Stromnachfrage dargestellt. Unter den oben genannten Annahmen steigt die Stromnachfrage bis 2045 durch die fortschreitende Elektrifizierung in den meisten Regionen an. In 80 % der Regionen kommt es zu einer Steigerung der Stromnachfrage in der Industrie um über 50 % im Vergleich zu 2019, davon 30 Regionen mit mindestens einer Verdoppelung der Stromnachfrage. In neun Regionen kommt es im Szenario zu einer Erhöhung der industriellen Stromnachfrage um den Faktor 6 bis 39. Ein wichtiger Treiber ist einerseits 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 um 50 % bis 100 % bis 2045 auszugehen, abhängig von den jeweilig angesiedelten Unternehmen und Prozessen. Besonders energieintensive Prozesse sowie Batteriefabriken führen meist zu einer überdurchschnittlichen Steigerung der Stromnachfrage. In 13 Regionen ist bis 2045 ein Rückgang der Stromnachfrage zu beobachten. Darunter sind Regionen mit einer geringen absoluten Stromnachfrage, in denen sich Effizienzfortschritte von Querschnittstechniken wie Elektromotoren stark auswirken sowie einige wenige Regionen mit Prägung durch die Chemieindustrie, die bspw. durch effizientere Chlorherstellungsverfahren weniger Strom benötigen. Die Endenergienachfrage (energetisch und stofflich) sinkt in 54 % der Regionen.

Abbildung 32: Prozentuale Veränderung der regionalen Stromnachfrage im Industriesektor

Nach Landkreisen und kreisfreien Städten (NUTS 3), 2045 im Vergleich zu 2019, im Szenario T45-Strom.

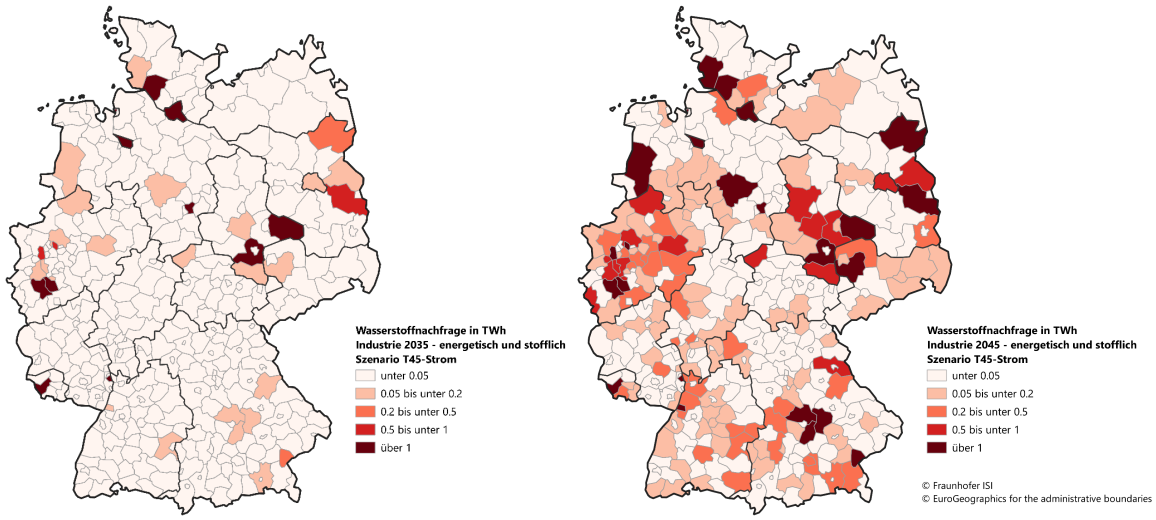


Quelle: FORECAST-Regional, Fraunhofer ISI

Die **regionale Nachfrage nach Wasserstoff** im Szenario T45-Strom ist in Abbildung 33 dargestellt. Haupttreiber ist der Bedarf einzelner Industriestandorte. Dies sind die heutigen Standorte mit Hochofen (Stahlherstellung), Ammoniakproduktion und Steamcracker (Ethylen/Olefine). Für diese wird angenommen, dass bis 2045 zur Herstellung von Stahl, Ethylen (Olefine) und Ammoniak Wasserstoff als Rohstoff eingesetzt wird, da dieser für die Reduktion des Eisenerzes bzw. stofflich benötigt wird. Dies betrifft in Deutschland ca. 20 Standorte, sodass die Nachfrage nach Wasserstoff sehr punktuell ist. Im Jahr 2045 können sich für diese punktuellen Bedarfe zum Teil erhebliche Mengen in einzelnen NUTS 3 Regionen ergeben, bis zu 37 TWh für die größte Region mit Stahlherstellung, sowie bis zu 22 TWh für die größte Region 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.

Abbildung 33: Regionaler Hochlauf der Wasserstoffnachfrage im Szenario T45-Strom

Nach Landkreisen und kreisfreien Städten (NUTS 3), energetisch und stofflich [TWh].

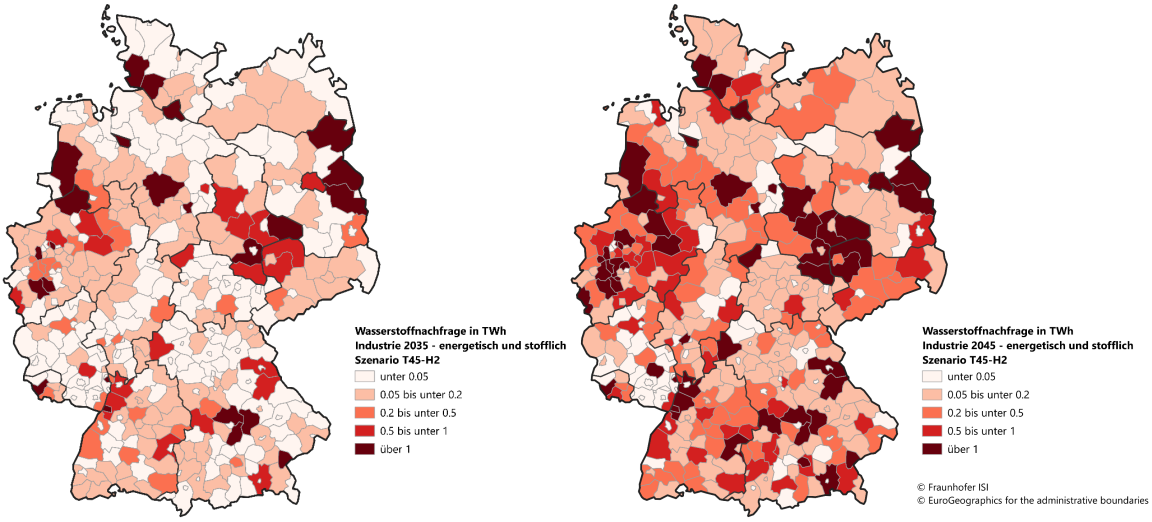


Quelle: FORECAST-Regional, Fraunhofer ISI

Die **regionale Nachfrage nach Wasserstoff** im Szenario T45-H2 ist in Abbildung 34 dargestellt. Haupttreiber ist in diesem Szenario ebenfalls der Bedarf einzelner Industriestandorte, analog zum Szenario T45-Strom. Die Regionen mit einem hohen Wasserstoffbedarf im Szenario T45-Strom haben im Szenario T45-H2 einen etwas höheren Wasserstoffbedarf, da dieser auch für Prozesswärme eingesetzt wird und in der Grundstoffchemie anstatt elektrischer Steamcracker mehr Wasserstoff für die MtO und MtA Routen benötigt wird. Darüber hinaus wird Wasserstoff in weiteren Regionen für Prozesswärme eingesetzt, 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 T45-Strom der Fall ist. Die Endenergienachfrage (energetisch und stofflich) sinkt in 50 % der Regionen.

Abbildung 34: Regionaler Hochlauf der Wasserstoffnachfrage im Szenario T45-H2

Nach Landkreisen und kreisfreien Städten (NUTS 3), energetisch und stofflich [TWh].

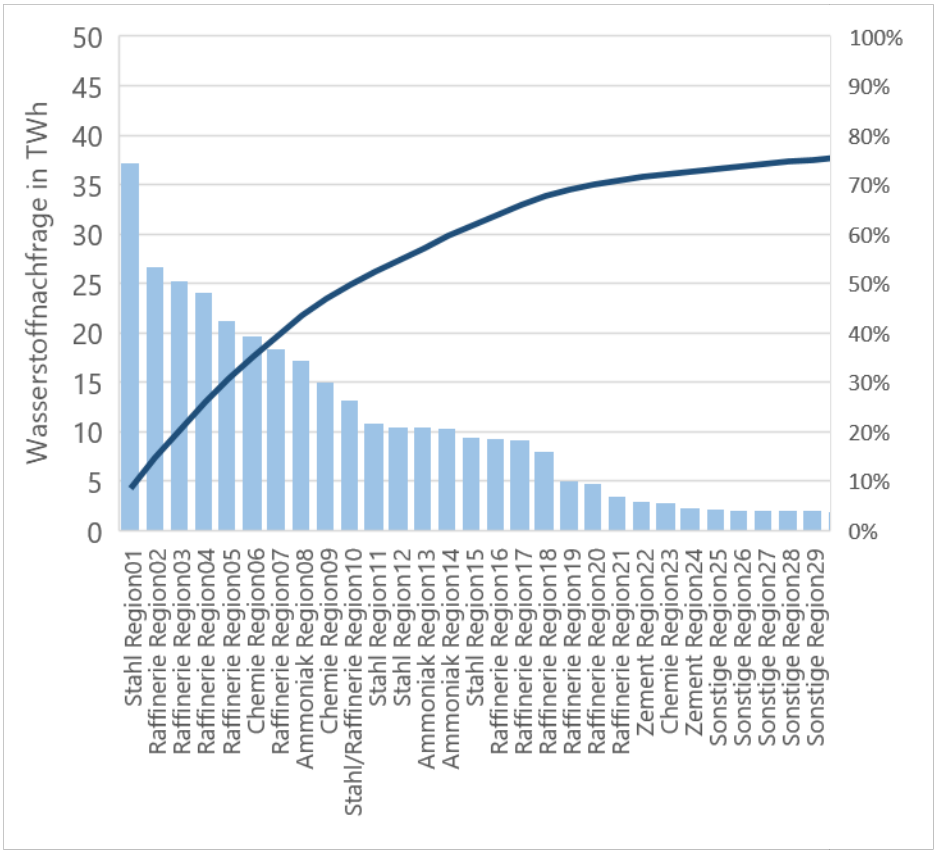


Quelle: FORECAST-Regional, Fraunhofer ISI

Die Schwerpunkte der Wasserstoffnachfrage im Szenario T45-H2 sind, ähnlich zum Szenario T45-Strom, die ca. 20 großen Chemie- und Stahl-Standorte, allerdings mit zusätzlichen Regionen, die Wasserstoff für die Prozesswärme einsetzen. Die 20 Regionen mit der höchsten Wasserstoffnachfrage 2045 in Abbildung 35 haben kumuliert einen Anteil von 70 % an der gesamten Wasserstoffnachfrage in Deutschland. Dies verdeutlicht, dass eine **Wasserstoffinfrastruktur** sich an diesen großen Verbraucherzentren orientieren sollte. Die restlichen 370 Regionen haben nur geringe Bedarfe im Vergleich zu den großen Regionen.

Abbildung 35: Wasserstoffnachfrage in den Regionen mit der höchsten Nachfrage

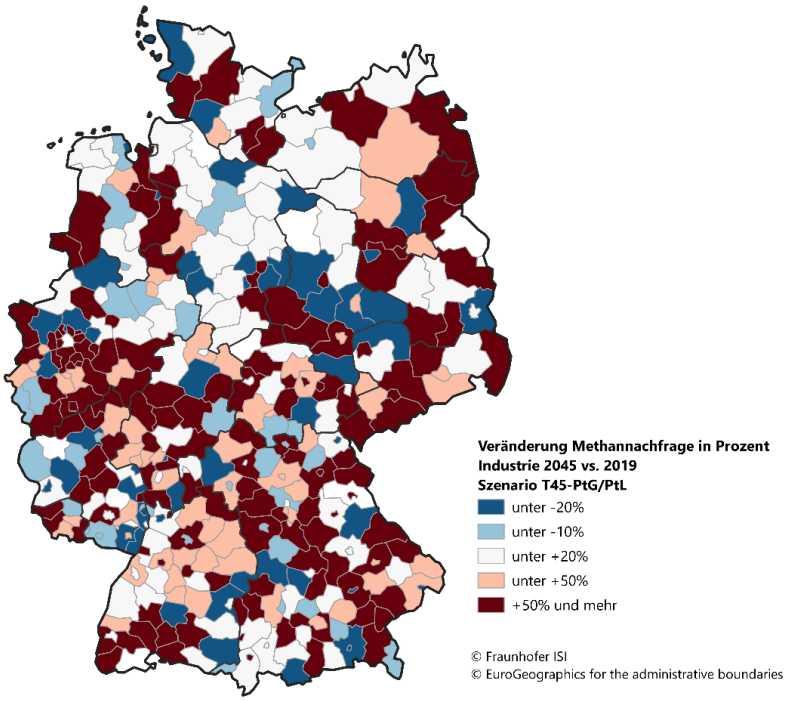
Szenario T45-H2 im Jahr 2045. Kumulierter Anteil an gesamter industrieller Nachfrage nach Wasserstoff in Deutschland.



Für das Szenario T45-PtG/PtL ist die Veränderung der regionalen Methannachfrage bis 2045 in Abbildung 36 dargestellt. Analog zum Szenario T45-H2 sind die Haupttreiber die Nachfrage für die Stahlreduktion sowie Regionen mit stofflicher Nachfrage für Produkte der Grundstoffindustrie. Darüber hinaus wird PtG in der Prozesswärme eingesetzt, so dass auch hier ein – geringer – Bedarf in der Breite zu erwarten ist. Dies bedeutet eine **strukturelle Veränderung des Methanbedarfs** im Vergleich zum derzeitigen Stand. In 62 Regionen ist ein Rückgang von mehr als 20 % zu erwarten, in 36 % der Regionen ein Anstieg um mehr als 50 %. Die Endenergienachfrage (energetisch und stofflich) sinkt in 30 % der Regionen.

Abbildung 36: Prozentuale Veränderung der regionalen Methannachfrage

Nach Landkreisen und kreisfreien Städten (NUTS 3), 2045 im Vergleich zu 2019, im Szenario T45-PtG/PtL. Methannachfrage berücksichtigt die Nachfrage nach den Energieträgern Erdgas und PtG.



Quelle: FORECAST-Regional, Fraunhofer ISI

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.
- Insgesamt ist die Entwicklung der Petrochemie mit großen Unsicherheiten behaftet, da die Ansiedlung der neu aufzubauenden Produktionsanlagen nicht zwingend dort stattfindet, wo heute die Grundstoffe als Nebenprodukt hergestellt werden.

Zusammenfassend wird die Frage beantwortet, wie sich die Energienachfrage verändert, wenn an den bisher bestehenden Standorten die Produkte in vergleichbaren Marktanteilen zum derzeitigen Stand weiterhin hergestellt werden, unter Berücksichtigung der nationalen Entwicklungen des Produktionsvolumens und der Diffusion neuer klimafreundlicher Produktionsverfahren in den Szenarien. Insbesondere die Regionen mit hoher Wasserstoffnachfrage sollten hinsichtlich der Unsicherheiten bewertet werden.

5 Varianten T45-Red-Eff und T45-RedGas

5.1 Definition und Annahmen

Ergänzend zu den drei T45-Grundszenarien (T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H2) wurden zwei Varianten modelliert: In T45-RedEff werden die Auswirkungen deutlich reduzierter Energie- und Materialeffizienz sowie geringerer Kreislaufwirtschaft auf die in T45-Strom beschriebene Transformation untersucht. Die Ergebnisse dienen vorrangig dazu, erhöhten Druck auf die Angebotsseite zu erzeugen und die dortigen Handlungsoptionen herauszufordern. In T45-RedGas werden Auswirkungen der Energie- und Gaskrise untersucht – damit insbesondere die Möglichkeit und Effekte eines beschleunigten Ausstiegs aus der Erdgasnutzung in der Industrie.

Beide Varianten basieren auf dem Szenario T45-Strom. Langfristig geht T45-RedGas in T45-Strom über; die relevanten Wirkungen der Variante entstehen aus Preisspitzen der Energieträger ab 2022, die im Szenarionarrativ bis 2030 weitgehend zurückgehen. Die Variante T45-RedEff zeichnet sich durch einen insgesamt höheren Energiebedarf aus, die Energieträgeranteile – und damit die einhergehenden Transformationspfade – entsprechen weitestgehend dem des T45-Strom Grundszenarios.

In **T45-RedEff** wird ein verringerter Energieeffizienzfortschritt durch eine zögerlichere Umsetzung von Effizienzmaßnahmen abgebildet (Abbildung 37). Dafür sind zwei Annahmen verantwortlich: Gegenüber der sehr ambitionierten Umsetzung von Effizienzmaßnahmen in den T45-Grundszenarien – darin werden bis zu 80 % aller wirtschaftlichen Maßnahmen tatsächlich umgesetzt und dabei zum Teil sehr hohe Risiken, ausgedrückt durch die Amortisationszeit[31], eingegangen – sinkt sowohl die maximale Umsetzungsrate (auf 60 %) und die Risikobereitschaft. So werden erst unter etwa 5 Jahren Amortisationszeit Maßnahmen zu mehr als 20 % umgesetzt. Darüber hinaus wird im Rahmen der Elektrifizierung der Prozesswärme weniger auf die effizienteren Wärmepumpen und stattdessen auf Elektrodenkessel oder andere – weniger effiziente – Technologien gesetzt. In T45-Strom werden 2045 über 50 TWh Prozesswärme in Wärmepumpen erzeugt, in T45-RedEff nur 19 TWh. Schließlich werden auch Fortschritte der Materialeffizienz – 2045 ist die Produktionsmenge energieintensiver Güter etwa 5 % größer als in T45-Strom – und der Kreislaufwirtschaft als geringer angenommen (Tabelle 17).

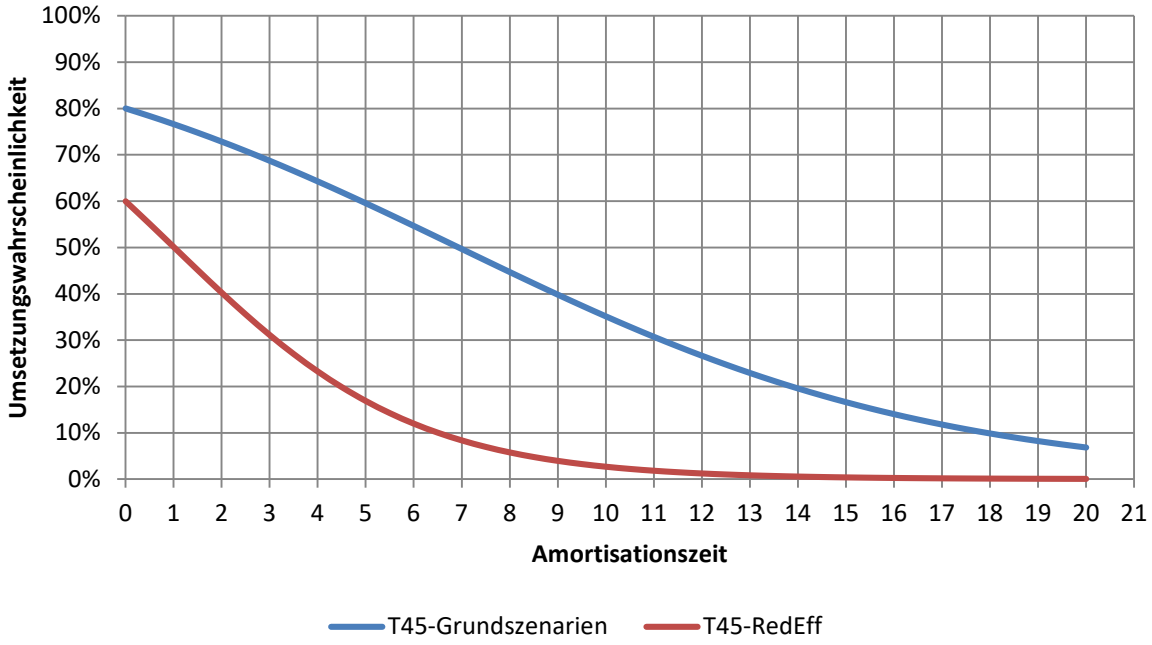
Tabelle 17: Kreislaufwirtschaftsquoten ausgewählter Produkte

Produkt		Recyclingquoten bis 2045	
	2018	T45-Strom	T45-RedEff
Stahl	30 %	48 %	37 %
Aluminium	59 %	73 %	60 %
Kupfer	41 %	62 %	51 %
Papier	76 %	82 %	77 %

[31] Zum Vergleich: Im Allgemeinen galt eine Amortisationszeit von 3 Jahren in der Vergangenheit als die Grenze, unter der eine relevante Umsetzungswahrscheinlichkeit bestand.

Abbildung 37: Umsetzungswahrscheinlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen

T45-Grundszenarien und T45-RedEff im Vergleich.



In **T45-RedGas** wird eine starke Reaktion auf die Energiekrise – insbesondere bezogen auf Erdgas – unterstellt. Das in den T45-Grundszenarien vorhandene Preissignal ist in T45-RedGas identisch. Die Reaktion darauf fällt aber heftiger aus und ist von einem starken und nachhaltigen Vertrauensverlust in die Versorgungssicherheit und Verfügbarkeit des Energieträgers Erdgas geprägt. Dadurch ändert sich das Investitionsverhalten bei Entscheidungen für neue Anlagen zur Prozesswärmeerzeugung – erdgasbasierte Anlagen werden im Grunde nicht mehr zugebaut. Ergänzend werden bestehende erdgasbasierte Anlagen kritisch evaluiert und beschleunigt ausgetauscht. Konkret sinkt die mittlere Lebensdauer dieser Anlagen ab 2022 auf 70 % des üblichen Wertes, wodurch bis 2030 ein Großteil ersetzt wird. Nach 2030 gehen die Annahmen zur Lebensdauer langsam in die des T45-Strom für alle fossilen Anlagen über[32]. Um den schnelleren Austausch zu stützen, werden Förderungen von elektrischen und wasserstoffbasierten Technologien der Prozesswärmeerzeugung um fünf Jahre vorgezogen. Darüber hinaus wird in der direktreduktionsbasierten Stahlherstellung von einer Erdgasbrücke abgesehen und neue Kapazitäten werden unmittelbar mit Wasserstoff betrieben (siehe 3.3.1). Schließlich wird von einem kurzzeitigen Einbruch der Ammoniakherstellung ausgegangen, die bis 2025 auf etwa 30 % der Menge in 2019 zurückgeht, sich aber bis 2030 (nach Abklingen der stärksten Preisspitzen) auf das Ausgangsniveau erholt.

5.2 Ergebnisse

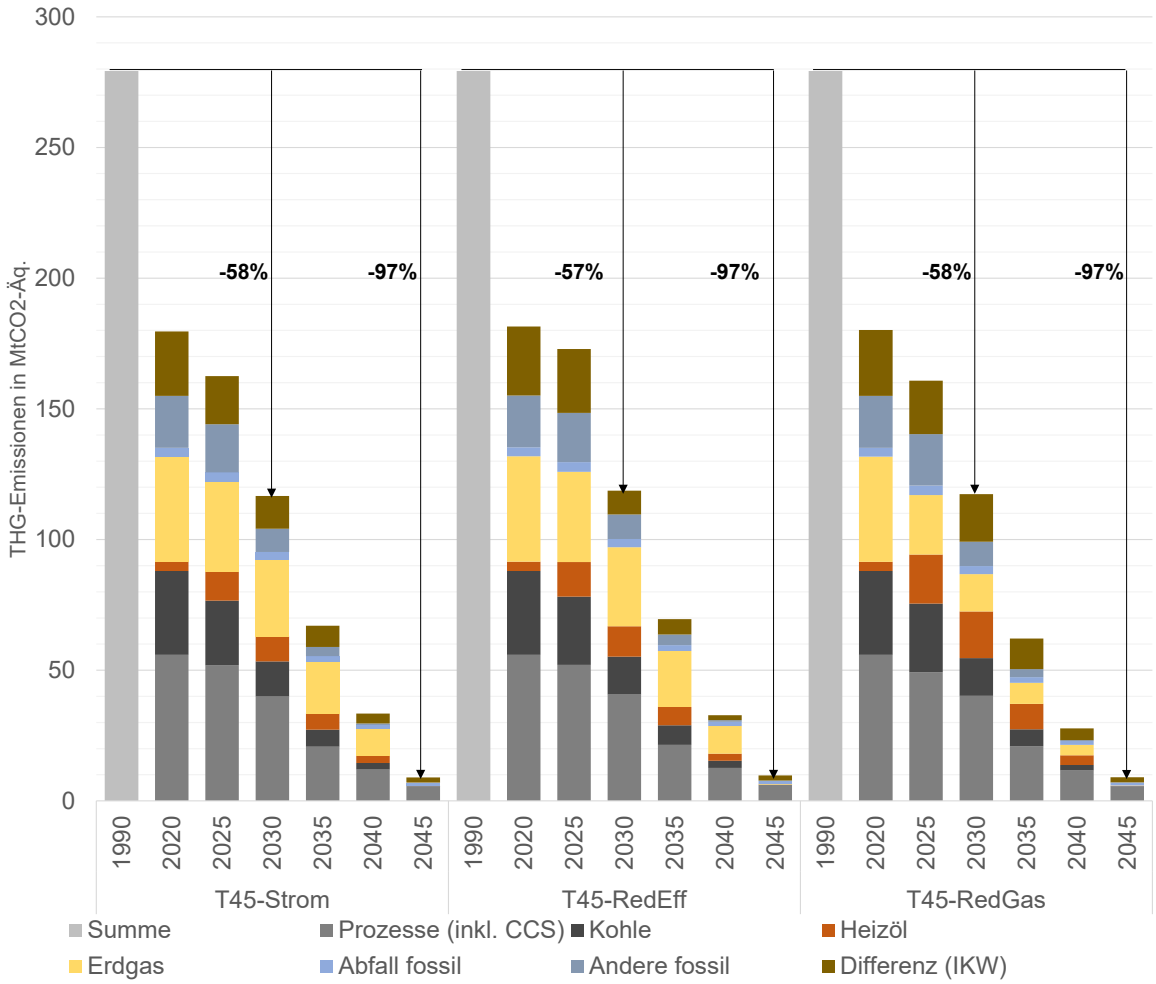
Die beiden Varianten erreichen 2045 ein beinahe identisches Niveau der Treibhausgasminderung (Abbildung 38). T45-RedEff erreicht knapp (Lücke knapp 1 $Mt_{CO2-Äq.}$) das 2030-Ziel nicht – allerdings entsteht durch die in allen Szenarien unterstellte stark ambitionierte Entwicklung auch über 2030 hinaus bereits 2031 eine weitere deutliche Minderung, mit der das 2030-Ziel deutlich übererfüllt

[32] In T45-Strom und T45-H2 werden fossile Anlagen nach 2030 schneller (75 % Lebensdauer) und ab 2040 sehr viel schneller (50 % Lebensdauer) ersetzt.

wird: zwischen 2025 und 2045 werden die Treibhausgasemissionen jedes Jahr um 6-10 $MtCO_2$-Äq. reduziert. Insofern wiegt die Nichterreichung des 2030-Ziels in T45-RedEff – im Rahmen der bestehenden Unsicherheit der Annahmen und der Modellierung – gering[33]. Gegenüber den bei der Minderung der Treibhausgasemissionen erfolgreichsten Szenarien (T45-H2 und T45-RedGas) liegen die über den Zeitraum 2019 bis 2045 kumulierten Treibhausgasemissionen um 6 % höher. Ein virtuelles[34] Budget des Industriesektors wird dabei aber in allen T45-Szenarien eingehalten. Dabei hilft maßgeblich eine Minderemission entsprechend der (unsicheren) Annahmen zur Erholung der industriellen Aktivität aus der Coronakrise bis 2025 (Abbildung 39).

Abbildung 38: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors

Vergleich von T45-Strom, T45-RedEff und T45-RedGas. Emissionsbilanzierung entsprechend der Definition des 2030-Sektorziels der Industrie: Prozessbedingte Emissionen kalibriert auf NIR 2019; energiebedingte Emissionen kalibriert auf AGEB je Energieträger und Differenz AGEB/NIR (maßgeblich Industriekraftwerke, IKW) separat ausgewiesen.



Ausgehend von T45-Strom variieren T45-RedEff und T45-RedGas den Endenergiebedarf. In T45-RedEff werden 2045 zusätzlich 171 TWh (20 % des Endenergiebedarfs in T45-Strom) benötigt. Darunter fallen 88 TWh direkter Stromnutzung (ersetzt zum Teil 29 TWh geringere Nutzung von

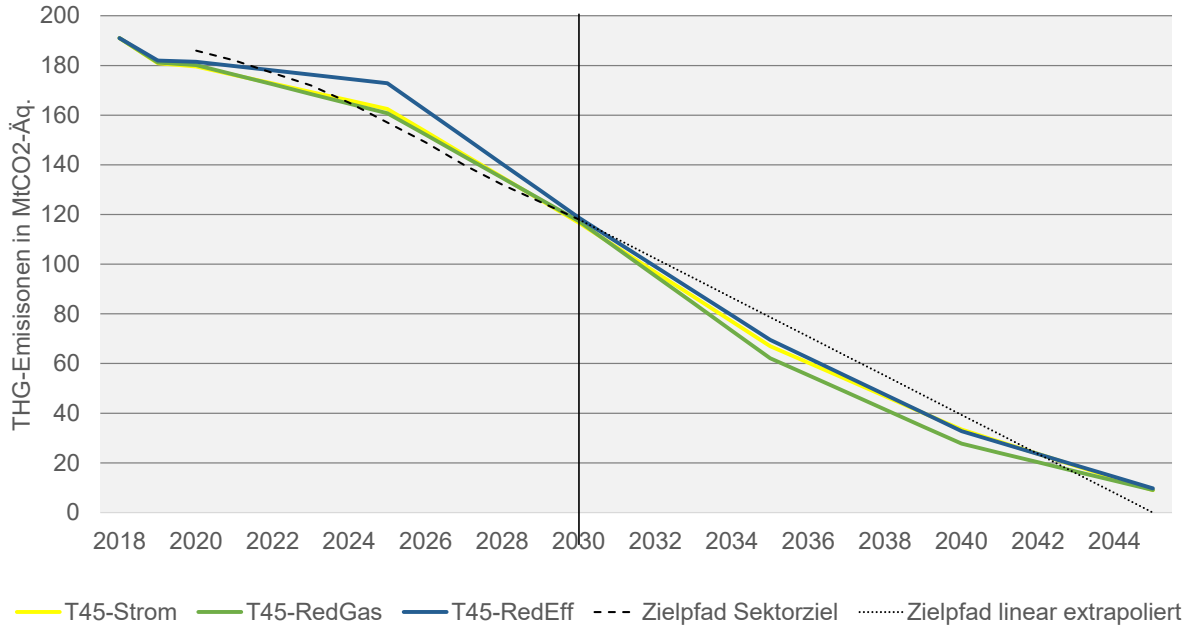
[33] Die zusätzlich benötigte Energie (siehe Abbildung 40) wiegt schwerer.

[34] Kein gesetzlich oder politisch festgelegtes, sondern über die Jahresemissionsmengen bis 2030 und die Annahme einer linearen Fortschreibung der Minderungen bis 2045 geschätztes, Budget.

Umgebungswärme), 27 TWh mehr Wasserstoff, 24 TWh mehr Fernwärme und 64 TWh mehr klimaneutral erzeugte Kohlenwasserstoffe (PtL) für die chemische Industrie. Dieser Mehrverbrauch führt nicht zu höherer Wertschöpfung, sondern ist Resultat geringerer Energie- und Materialeffizienz – mithin Verschwendung. Dies führt zu einem Anstieg des Endenergiebedarfs gegenüber 2019 – das Wachstum wird nicht mehr durch Effizienzgewinne überkompensiert. Im Transformationsverlauf werden darüber hinaus etwa 10 % mehr fossile Energieträger eingesetzt.

Abbildung 39: Verlauf der Treibhausgasemissionen

Vergleich mit Jahresemissionsmengen nach Klimaschutzgesetz bis 2030 und linearer Fortschreibung bis 2045.



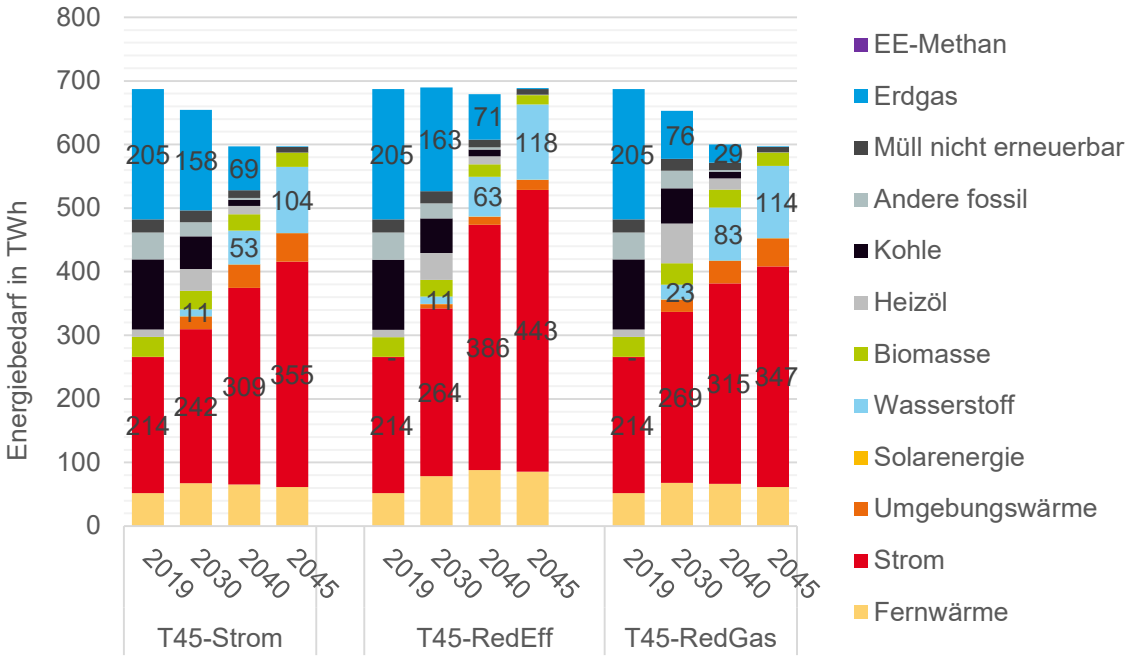
In T45-RedGas wird der Ausstieg aus Erdgas schneller vollzogen, wodurch bis 2030 knapp 9 % weniger fossile Energieträger (gegenüber T45-Strom -45 TWh) eingesetzt werden – diese werden vorrangig durch beschleunigte Elektrifizierung (27 TWh) und schnelleren Einstieg in die Wasserstoffnutzung (+11 TWh) ersetzt. Nach 2030 gleichen sich T45-RedGas und T45-Strom wieder an und sind 2045 fast identisch[35].

Gegenüber T45-Strom ist der Strombedarf in T45-RedEff in 2045 um 88 TWh (25 %) höher. Ein hoher Beitrag zu dieser Steigerung entsteht im Bereich Dampf und Warmwasser durch den geringeren Einsatz von Wärmepumpen und die daraus resultierende Nutzung weniger effizienter Elektrodenkessel: In T45-Strom werden 2030 70 TWh Strom in Elektrodenkesseln und 21 TWh in Wärmepumpen eingesetzt, in T45-RedEff 134 TWh und 8 TWh.

[35] Es verbleibt eine geringe Verschiebung von Strom- zu Wasserstoffnutzung in Höhe von etwa 8 TWh.

Abbildung 40: Entwicklung des Endenergiebedarf im Industriesektor

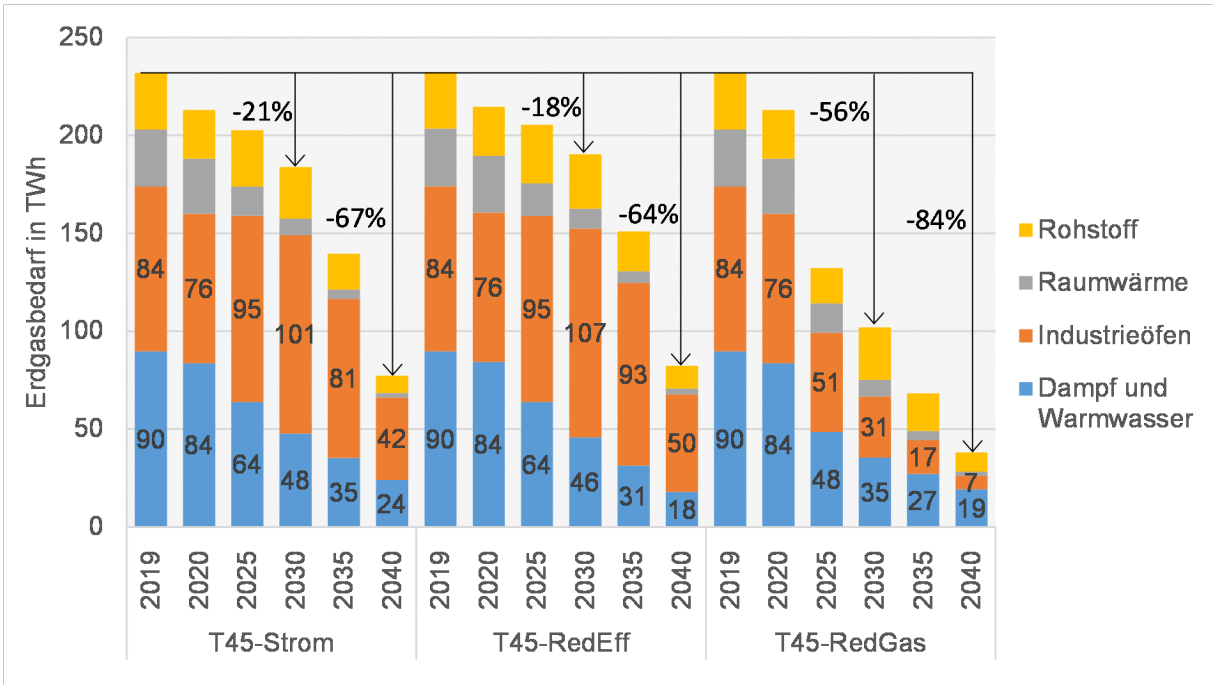
Vergleich von T45-Strom, T45-RedEff und T45-RedGas. Stoffliche Nutzung ist nicht dargestellt.



Die Veränderung des Erdgasbedarfs in T45-RedGas ist insbesondere auf die Nutzung in der Prozesswärme zurückzuführen (Abbildung 41). Während in T45-Strom und T45-RedEff bis 2030 lediglich etwa 20 % der Erdgasnutzung von 2019 ersetzt wird (48 bzw. 42 TWh), sinkt diese in T45-RedGas bereits bis 2025 massiv und bis 2030 um 56 % (130 TWh). Im Bereich der Industrieöfen beträgt der Rückgang 63 % (53 TWh), im Bereich der Dampferzeugung 61 % (55 TWh). Insbesondere ist zu bemerken, dass der Trend – in T45-Strom und T45-RedEff steigt die Erdgasnutzung der Industrieöfen bis 2030 zunächst leicht an – umgekehrt wird. Dies wird nur indirekt durch Preissignale ausgelöst, diese sind in allen Szenarien identisch. Allerdings wird in T45-RedGas eine deutlichere und vor allem anhaltende Reaktion auf die Preissignale unterstellt, die einen massiven Vertrauensverlust in den Energieträger als verlässliche Energiequelle abbilden. Dadurch wirken die Preisspitzen 2022-2025 stärker und von einer Rückkehr zu Erdgas wird auch langfristig stark abgeschreckt. Dies führt auch dazu, dass der für alle Szenarien (T45-Grundszenarien und T45-Varianten) notwendige Schritt zum vollständigen Ersatz von Erdgas 2045 für T45-RedGas deutlich kleiner ist. Im Vergleich der großen Sprünge des Erdgaseinsatzes zwischen den Szenarien wird deutlich, dass die großen Herausforderungen in T45-RedGas nicht etwa hinzukommen, sondern lediglich früher stattfinden: Zwischen 2020 und 2025 werden in T45-RedGas etwa 80 TWh Erdgas weniger genutzt. Dies entspricht der Menge, die in T45-Strom und T45-RedEff zwischen 2040 und 2045 ersetzt werden muss.

Abbildung 41: Entwicklung des Erdgasbedarfs im Industriesektor

Vergleich von T45-Strom, T45-RedEff und T45-RedGas. Ab 2045 kein Erdgasbedarf mehr. Inklusive stoffliche Nutzung.

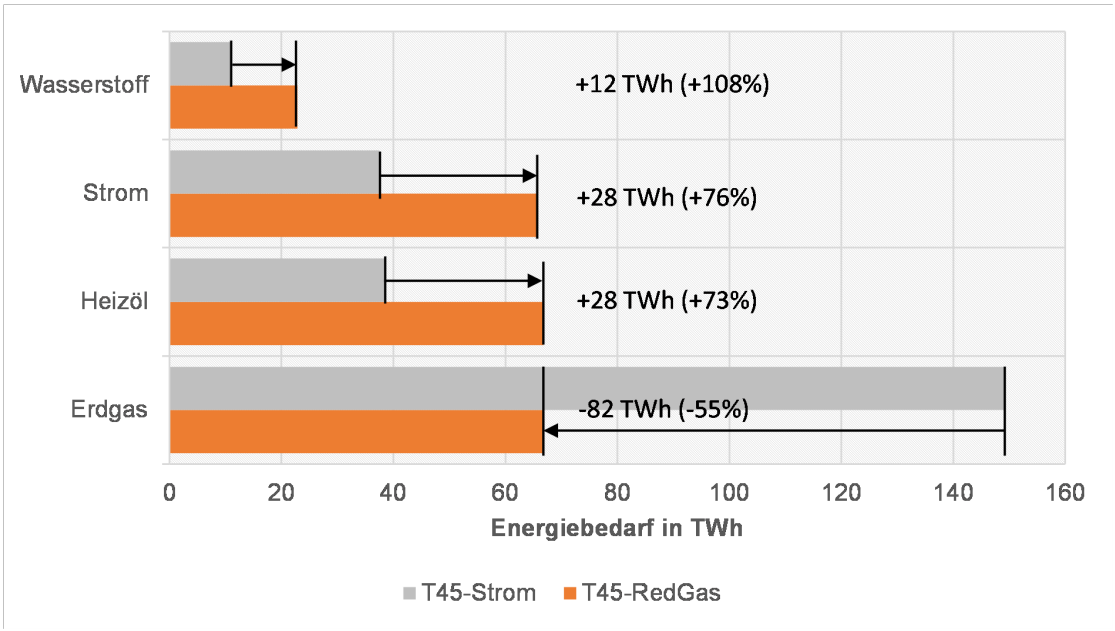


Der schnellere Ausstieg aus Erdgas in T45-RedGas geht insbesondere mit Ausweichbewegungen zu anderen Energieträgern (Energieträgerwechsel, "fuel switch") in der Prozesswärmeerzeugung einher und erreicht um 2030 die stärkste Ausprägung im Vergleich zu T45-Strom (Abbildung 42). Die Erdgasnutzung ist 2030 um 55 % (82 TWh) reduziert – dies wird kompensiert durch stärkere Strom-, Heizöl- (je 28 TWh, +76 % und 73 %) und Wasserstoffnutzung (12 TWh, +108 %)[36].

[36] Andere Energieträger: +13 TWh.

Abbildung 42: Energiebedarf ausgewählter Energieträger für Prozesswärme 2030

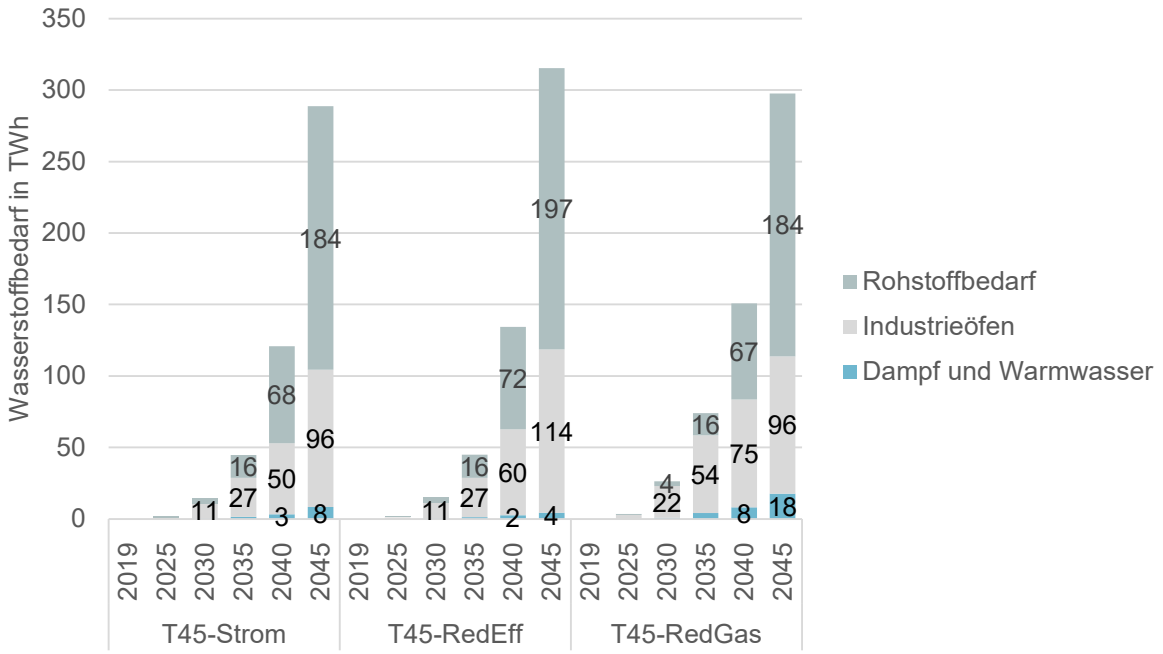
Vergleich von T45-Strom und T45-RedGas.



Der Wasserstoffbedarf kann nach Anwendung in Dampf und Warmwasser, Industrieöfen sowie Rohstoff aufgeschlüsselt werden (Abbildung 43). Die letzten beiden Anwendungen sind in T45-RedGas und T45-Strom in 2045 identisch, lediglich in der Dampferzeugung nutzt T45-RedGas 10 TWh mehr Wasserstoff. In T45-RedEff steigt der Wasserstoffbedarf in 2045 gegenüber T45-Strom um 26 TWh (9 %), verteilt auf höheren Rohstoffbedarf (13 TWh) und Nutzung in Industrieöfen (18 TWh) – beides bedingt durch höhere Produktionsmengen aufgrund geringerer Materialeffizienz. In der Dampferzeugung wird geringfügig (4 TWh) weniger Wasserstoff genutzt.

Abbildung 43: Einsatz von Wasserstoff im Industriesektor in den Sensitivitäten

Vergleich von T45-Strom, T45-RedEff und T45-RedGas. Inklusive stofflicher Nutzung.



A.1 Anhang

Begleitend zum Bericht ist auf www.langfristszenarien.de ein Datensatz mit Annahmen und Ergebnissen der Modellrechnungen verfügbar. Die Daten sämtlicher Tabellen und Diagramme sowie eine vollständige Energiebilanz des Industriesektors sind als Anhang in Form einer Excel-Datei verfügbar.

7 Literaturverzeichnis

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.

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 Programe 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; Rehfeldt, Matthias (2022): Instrumente für eine klimaneutrale Industrie - Eine modellgestützte Szenarioanalyse des aktuellen Instrumentenmixes. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam. Online verfügbar unter https://ariadneprojekt.de/media/2022/10/Ariadne-Analyse_Politikinstrumente-Industrie_Oktober2022.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2022.

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

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.

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.

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.

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.

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.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Hg. v. Öko-Institut und Fraunhofer ISI. Berlin, Karlsruhe.

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 Thermoprozesstechnik. 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; 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 (2022): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2022. Online verfügbar unter https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.

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

United Nations Climate Change (UNCC) (2017): National Inventory Submissions 2017. Online verfügbar unter http://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/submissions/national-inventory-submissions-2017.

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

VDZ (2018): Zahlen und Daten 2018.

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.

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%2520concise%2520version.pdf, zuletzt geprüft am 2021.

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*.