

Modellgestützte Analyse synthetischer Brennstoffe in der Industrie bei ambitioniertem Klimaschutz

Themenbereich Sektorenkopplung

Tobias HÜBNER¹⁽¹⁾, Andrej GUMINSKI⁽²⁾, Serafin VON ROON⁽³⁾, Simon PICHLMAIER⁽⁴⁾

(1), (2), (3) Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH

(4) Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, Am Blütenanger 71, 80995 München,
089/158 121 36., thuebner@ffe.de, www.ffegmbh.de

Kurzfassung:

Ab einem gewissen Klimaschutzambitionsniveau ist der Einsatz synthetischer Brennstoffe eine wichtige Option zur kosteneffizienten Defossilisierung der Industrie.

Ziel dieser Publikation ist es, die Bedeutung synthetischer Brennstoffe bei ambitioniertem Klimaschutz in der Industrie zu erfassen. Zunächst wird der Status Quo des industriellen Verbrauchs synthetischer Brennstoffe erfasst. Ferner ist eine Methodik zu entwickeln, um den Einsatz synthetischer Brennstoffe in einem Industriemodell abzubilden. Künftige Potenziale des synthetischen Brennstoffeinsatzes werden abschließend durch die Umsetzung von Einzelmaßnahmen zur THG-Verminderung via energie- und emissionsdynamischen Berechnungen im Sektormodell Industrie (Smlnd) abgeleitet.

Es zeigt sich, dass synthetische Brennstoffe derzeit hauptsächlich stofflich in der Chemieindustrie genutzt werden (Wasserstoff). Durch die Umsetzung von fünf Maßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz und zwei Maßnahmen zur CO₂-Abscheidung ab 2030 bis 2050 werden 41 TWh synthetisches Methan und 2 TWh Wasserstoff für die energetische Nutzung im deutschen Industriesektor benötigt. Im Mit-Maßnahmenzenario wird überdies eine energie- und prozessbedingte THG-Verminderung von 26 Mio. tCO₂ ggü. der Referenzentwicklung erreicht. Im Jahr 2050 werden in diesem Szenario 127 Mio. tCO₂ in der Industrie ausgestoßen. Dies entspricht einer THG-Verminderung von 45 % ggü. dem Basisjahr 2020 (229 Mio. tCO₂).

Das dieser Publikation zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Kennzeichen 03ET4037B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Keywords: Synthetische Brennstoffe (synfuels), Erneuerbare Brennstoffe Klimaschutz, Industrie, Treibhausgasverminderung (THG), Energiesystemmodellierung, Smlnd, Industriemodellierung, Industriesektor, ambitionierter Klimaschutz

¹ Jungautor, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München,
+49 (0) 89 / 158 121 - 36, thuebner@ffe.de, <https://www.ffegmbh.de>

1 Einleitung

Einleitend werden Hintergrund und Motivation sowie einleitende Definitionen und begriffliche Abgrenzungen der Anwendung synthetischer Brennstoffe in der Industrie dargelegt.

1.1 Einleitende Bemerkungen und Motivation

Die Analyse energie- und klimapolitischer Szenarien zeigt, dass das Energiesystem bei einer nahezu vollständigen Defossilisierung [1] maßgeblich durch den Einsatz synthetischer Energieträger geprägt sein wird [2]. Um die ambitionierten Klimaziele kosteneffizient zu erreichen, sind technologieoffene Maßnahmenpakete zur THG-Vermeidung erforderlich, die neben der Elektrifizierung sowie inkrementeller Effizienz und Suffizienz [3], [4], Maßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz enthalten. Selbst bei moderaterem Klimaschutzambitionsniveau bietet sich die indirekte Elektrifizierung durch synthetische Brennstoffe trotz geringerer Bereitstellungseffizienz und hoher Kosten in Maßen als kurz- und langfristige Flexibilität an [5], [6], [7], [8], [4]. Auf diese Weise ist es möglich, Schwankungen im Energiesystem infolge des abnehmenden disponiblen Kraftwerksparks und des zunehmenden Einsatzes nicht-disponibler Energieerzeugungsanlagen zu nivellieren [2], [9], [10]. Der Anteil kurzfristig und saisonal fluktuierender Energie wird im Zuge des Pariser Klimaabkommens und den umsetzungsorientierten Beschlüssen von Kattowitz weiter anwachsen und zeitweise zu erheblichen Residuallasten im Energiesystem führen [11], [4], [12], [13].

Während der Defossilisierung von Stromerzeugung, Verkehr und Gebäuden beträchtliche Aufmerksamkeit gewidmet wird, ist das Wissen wie Treibhausgase im Industriesektor vermindert werden können im Vergleich zu anderen Sektoren zurückgeblieben [14], [15]. Erheblicher Forschungsbedarf und Innovationsdruck resultiert aus dem hohen Anteil des Industriesektors an den Treibhausgasemissionen von etwa 21 % und dem hohen Endenergieverbrauch von etwa 1,6 EJ pro Jahr in Deutschland [16], [17], [18]. Aufgrund fehlender effizienter Elektrifizierungsoptionen zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme im Hochtemperaturbereich, ist der Einsatz synthetischer Brennstoffe in der energieintensiven Industrie zu erwarten [2], [6], [4], [15]. Ferner stehen Anwendungen im Blickpunkt, die aus prozessspezifischer Sicht nicht vollständig elektrifiziert werden können oder nicht-energetisch genutzte, erdölbasierte Ausgangsstoffe erforderlich sind [2], [19], [20]. In diesen Industrien sind Potenziale für den Einsatz synthetischer Brennstoffe vorhanden, die im Einklang mit einer kosteneffizienten Defossilisierung des Industriesektors stehen können.

1.2 Einleitende Definitionen und begriffliche Abgrenzung

Unter dem Begriff „Synthetische Brennstoffe“ (*engl. synthetic fuels, synfuels*) werden verschiedene, künstlich erzeugte Energieträger subsumiert. Als Ausgangsbasis dient meist gasförmiger Wasserstoff. Dieser wird durch die Wasserelektrolyse unter Stromeinsatz, mithilfe biologischer und katalytischer Prozesse infolge direkter Sonnenstrahlennutzung oder durch die mit fossilen Energieträgern betriebene Dampfreformierung erzeugt (PTX-H₂) [21], [7], [22]. Um nachteilige Eigenschaften wie die schlechte Transportfähigkeit zu umgehen, kann der Wasserstoff verflüssigt werden (PtX-LH₂) [23]. Ebenfalls aufgrund seiner schlechten Transporteigenschaften, ist eine anschließende Transformation des Wasserstoffs sinnvoll. In weiteren Syntheseschritten kann der Wasserstoff unter Beigabe von CO₂ zum gasförmigen

Energieträger Methan weiterverarbeitet werden [24], [25] (PtX-CH₄). Das gasförmige Methan dient neben der direkten Nutzung als Ausgangsbasis zur Erzeugung von Flüssiggas (PtX-LCH₄) und zur Herstellung von flüssigen Kraftstoffen. Synthetische Brennstoffe werden anwendungsseitig emissionsfrei bilanziert [26], [19]. Auf Biomasse basierende künstlichen Energieträger (*engl. green fuels*) sind hingegen von synthetischen Brennstoffen abzugrenzen.

2 Untersuchungsgegenstand

Folgend wird der aktuelle Forschungsstand erfasst und der Forschungsbedarf abgegrenzt. Auf dieser Grundlage werden relevante Forschungsfragen abgeleitet.

Forschungsstand und Abgrenzung des Forschungsbedarfs

Der synthetische Brennstoffeinsatz in der Industrie wurde bereits sektorenübergreifend [6], [19], [27], [28], [8], [29], [30], [4], [31], [29], [13], [32], [23], [15] und sektorenspezifisch [16], [33], [7], [21], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43] untersucht. Werden sektorenübergreifende Analysen wie in den gesamtsystemischen energie- und klimapolitischen Szenarien angestellt, ist der Detailgrad zum synthetischen Brennstoffeinsatz in der Industrie meist gering [19], [27], [30], [32], [23], [15]. Aggregierte derzeitige und zukünftigen Verbräuche synthetischer Brennstoffe werden demgemäß lediglich in [19] und [27] erfasst. Die ausgewiesenen energetischen Verbräuche sind jedoch nicht auf einzelne THG-Verminderungsmaßnahmen zurückzuführen. Die prozessspezifische Zuordnung synthetischer Brennstoffverbräuche erfolgt ebenfalls nicht. Derzeitige Verbräuche und zukünftige Potenziale der stofflichen Nutzung synthetischer Energieträger werden hingegen in [30] und [15] berücksichtigt, wobei [15] auf den weltweiten Einsatz fokussiert ist.

[16], [7], [35], [37], [39], [43] widmen sich allein dem Industriesektor, analog zu den energie- und klimapolitischen Szenarien ist der Blick jedoch auf die ganzheitliche Treibhausgasverminderung fokussiert. Der synthetische Brennstoffeinsatz in der Industrie wird dementsprechend in diesen Studien lediglich als eine von mehreren Optionen zur THG-Verminderung erforscht. Es werden keine derzeitigen Verbräuche und zukünftigen Potenziale für den Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie ausgewiesen.

[33], [21], [34], [38], [36], [40], [41] führen prozessspezifische Betrachtungen zum synthetischen Brennstoffeinsatz in der Industrie durch. Aggregierte Verbräuche und Potenziale für den gesamten Industriesektor werden dementsprechend nicht erhoben. Es werden die Stahl- [36], [40], [33], [42], [41] und Chemieindustrie analysiert [21], [34], [38]. Wiederum ist der Einsatz synthetischer Brennstoffe jedoch nur ein Untersuchungsaspekt, der Schwerpunkt liegt auf der ganzheitlichen THG-Verminderung in der jeweiligen Industrie.

Hauptuntersuchungsgegenstand sind synthetische Brennstoffe in den Studien [28], [8], [31], [4] und [13]. Es werden jedoch sektorenübergreifende Analysen durchgeführt, die Industrie ist nur ein Bestandteil. In [28], [31] werden theoretische Potenziale synthetischer Brennstoffe erhoben. [8] erfasst auf [44] und [45] basierende derzeitige und zukünftige Wasserstoffverbräuche in der Industrie, der Einsatz synthetischen Methans wird nicht untersucht. [13] weist hingegen nur vereinzelt Potenziale aus, Verbräuche können demgemäß nicht jahresspezifisch zugeordnet werden. In [4] wird der zukünftige Bedarf synthetischer Brennstoffe zur Bereitstellung von Prozesswärme durch eine Modellierung des Wärmesektors erfasst, wobei Industrie- und GHD-Sektor gemeinsam behandelt werden.

Prozessspezifische Einsatzmöglichkeiten synthetischer Brennstoffe zur Reduktion energie- und prozessbedingter Emissionen sind bisher in der Stahl- und Chemieindustrie bekannt [16], [8], [21], [7], [36], [35], [37], weitere Einsatzmöglichkeiten sind zu identifizieren.

Es wird deutlich, dass derzeitige Verbräuche und zukünftige Potenziale des synthetischen Brennstoffeinsatz in der Industrie wenig detailliert erforscht sind. Als Begründung kann einerseits angeführt werden, dass die Industrie meist nur einer von mehreren in der Analyse behandelten Sektoren in den jeweiligen Studien ist. Zudem wird der synthetische Brennstoffeinsatz in der Industrie meist nur als eine von vielen Optionen zur THG-Verminderung untersucht. Andererseits werden Analysen zum synthetischen Brennstoffeinsatz oftmals auf industrieller Prozessebene angestellt, wobei gesamtheitliche Verbräuche und Potenziale für den Industriesektor nicht abgeleitet werden können. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Analyse synthetischer Brennstoffe mit Industriefokus ist bisher nicht bekannt. Modellierungsansätze, die ihr Hauptaugenmerk auf den synthetischen Brennstoffeinsatz in der Industrie legen, konnten nicht identifiziert werden. Sensitive Analysen sind anhand der vorliegenden Forschungsarbeiten deshalb kaum möglich. Der Einsatz synthetischer Brennstoffe wird dabei oftmals durch die Festlegung von Anwendungspfaden abgeschätzt, eine endogene Maßnahmenumsetzung in einem Industriemodell erfolgt meist nicht [19].

Forschungsfragen, Ziele und weitere Arbeitsschritte

Auf der Basis des ermittelten Forschungsbedarfs werden die folgenden Forschungsfragen abgeleitet.

F1: In welchen energie- und emissionsintensiven Industrieprozessen und in welcher Größenordnung werden synthetische Brennstoffe derzeit eingesetzt? (Kapitel 5.1)

Die Forschungsfrage zielt auf die Erhebung des Status Quo zum synthetischen Brennstoffeinsatz ab. In diesem Zusammenhang werden Industrieprozesse identifiziert, die bereits synthetische Brennstoffe in der Industrie einsetzen. Derzeitige Verbräuche synthetischer Brennstoffe werden via Meta-Studienanalyse erfasst.

F2: Welche Methodik ist erforderlich, um Potenziale des synthetischen Brennstoffeinsatzes in der Industrie zu erfassen und wie kann diese Vorgehensweise in einem energetischen Industriemodell umgesetzt werden? (Kapitel 3.1, 3.3, 3.4 & 3.5)

Ziel der Forschungsfrage ist es, eine Methodik zu entwickeln, durch die der zukünftige Verbrauch synthetischer Brennstoffe in der Industrie in Deutschland erfasst werden kann. In diesem Zusammenhang wird ein energetischer Modellierungsansatz bemüht, der den synthetischen Brennstoffeinsatz durch die Umsetzung von Einzelmaßnahmen (bottom-up) zur Treibhausgasverminderung in der Industrie erschließt.

F3: Welche industriespezifischen Potenziale ergeben sich für den synthetischen Brennstoffeinsatz bei ambitioniertem Klimaschutz? (Kapitel 5.2)

Diese letzte Forschungsfrage hat zum Ziel, Potenziale des synthetischen Brennstoffeinsatzes in der Industrie in einem Mit-Maßnahmenzenario zu erfassen und dem Referenzfall gegenüberzustellen. Es wird eine branchenspezifische Untersuchung vorgenommen, die auf die jeweiligen prozessspezifischen Einzelmaßnahmen zur THG-Verminderung zurückzuführen ist.

In einem ersten Schritt werden folgend die methodischen Grundlagen des Sektormodells Industrie, der Auswahl energie- und emissionsintensiver Prozesse und der Identifikation des derzeitigen synthetischen Brennstoffverbrauchs erarbeitet. Ferner wird die Methodik zur Massnahmenimplementierung und -umsetzung, zur Ableitung des zukünftigen Verbrauchs synthetischer Brennstoffe sowie zur Erweiterung des Sektormodells um Maßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz und der CO₂-Abscheidung dargelegt. Die Eingangsdaten der Simulationen zum synthetischen Brennstoffeinsatz und zur CO₂-Abscheidung in der Industrie werden im zweiten Schritt in einer Einzelmaßnahmen-analyse offengelegt. In einem dritten Schritt werden die Ergebnisse zu den Forschungsfragen ausgewiesen und diskutiert. Die Schlussbetrachtung beschließt die Analyse in einem letzten Schritt.

3 Methodik

Die Vorgehensweise kann in sechs methodische Bestandteile untergliedert werden und ist einleitend in **Abbildung 3-1** dargestellt.

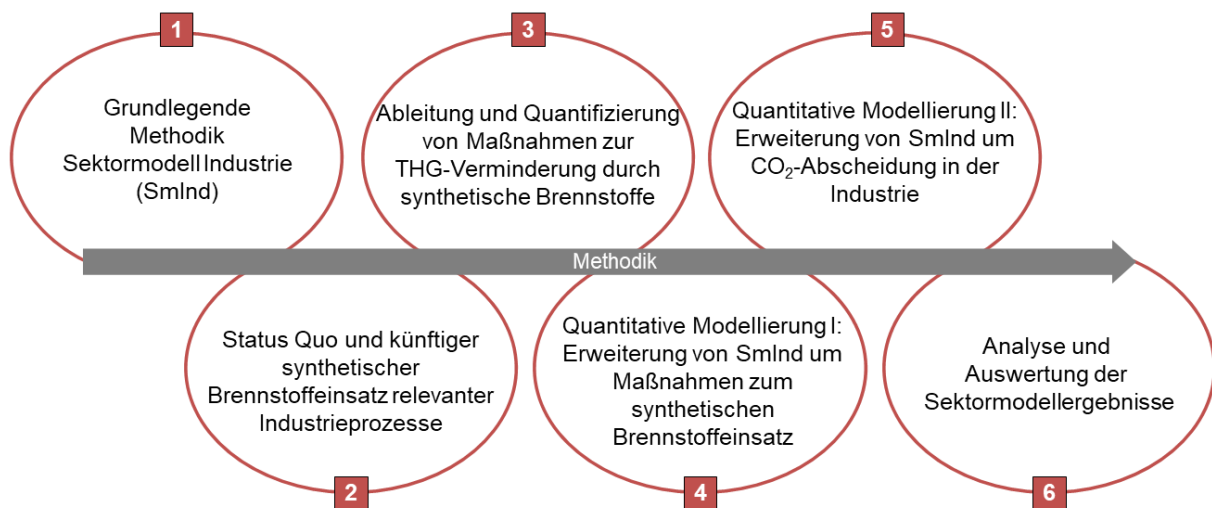


Abbildung 3-1: *Überblick Methodik*

Untersuchungsgegenstand bilden Industrieprozesse, bei denen unter Berücksichtigung weiterer THG-Verminderungsmaßnahmen durch den Einsatz synthetischer Brennstoffe eine Emissionsverminderung erreicht werden kann.

Zunächst wird die Funktionsweise des Sektormodells Industrie (Smlnd) beschrieben (1). In diesem Zuge werden grundlegende Strukturen, Eingangsdaten und Berechnungen von Smlnd beleuchtet. Dieser Schritt dient als Grundlage zur Erweiterung von Smlnd um die zuvor erhobenen THG-Verminderungsmaßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz. Hierfür sind zuvörderst Prozesse und Industrien zu identifizieren, bei denen derzeit oder künftig synthetische Brennstoffe eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang wird auch der Status Quo derzeitiger synthetischer Brennstoffverbräuche mittels Meta-Studienanalyse eruiert (2). Die ausgewählten Prozesse bilden die Grundlage zur Ableitung und Quantifizierung prozessbezogener THG-Verminderungsmaßnahmen, die den zunehmenden Einsatz synthetischer Brennstoffe umfassen (3). Die prozessbezogenen Maßnahmen bilden wiederum die Basis, um ein Maßnahmenzenario mit hohem synthetischen Brennstoffeinsatz unter der Berücksichtigung von Elektrifizierungspotenzialen in Smlnd zu implementieren (4). Damit im Energie & Umwandlungssektor synthetisches Methan erzeugt

und zusätzlich CO₂-Emissionen im Industriesektor vermindert werden können, wird Smlnd in (5) um ein Modul zur CO₂-Abscheidung erweitert. Die Auswertung des Referenz- und Mit-Maßnahmenszenarios beschließt die Analyse (6). Die Simulationsarbeiten werden mit dem Softwareprogramm MATLAB umgesetzt.

3.1 Sektormodell Industrie (Smlnd)

Im Sektormodell Industrie werden energie- und emissionsdynamische Berechnungen durchgeführt. Smlnd verfügt über mehrere Substrukturen, die die gesamte Industrie top-down in 14 Wirtschaftszweige (Branchen) unterteilt [46]. In einer Energieträger-Anwendungs-Matrix werden die Verbräuche der Wirtschaftszweige energieträger- und anwendungsscharf kombiniert. Als Datengrundlage wird die Anwendungsbilanz Industrie der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen herangezogen. Für die Anwendung „Prozesswärme“ ist auf wirtschaftszweigebene zudem eine Aufteilung nach Temperaturniveau möglich [47], [46], die auf [48] basiert.

Um bottom-up Betrachtungen durchführen zu können, sind den Wirtschaftszweigen ferner 22 ausgewählte energie- und emissionsintensive Prozesse zugeordnet. Für diese Prozesse werden jährliche Produktionsmengen [32], spezifische Strom- sowie Brennstoffverbräuche hinterlegt. Die spezifischen Strom- und Brennstoffverbräuche fußen auf literarischen Daten und Experteninterviews. Neben den energetischen Parametern werden für die Wirtschaftszweige virtuelle normierte Lastgänge konstruiert, die aus der Synthese realer Eingangslastgänge einzelner Prozesse des jeweiligen Wirtschaftszweigs entstehen. Neben den realen Eingangslastgängen werden zudem Typ-Tage und Wetterdaten des Jahres 2012 zur Konstruktion der normierten Lastgänge herangezogen. Die wirtschaftszweigspezifischen Lastgänge bilden die Basis, um bottom-up einen aggregierten Industrielastgang zu generieren. Die Lastgänge sind in Stundenaufösung konstruiert und werden für jedes untersuchte Kalenderjahr separat ausgewiesen [49]. Neben den Wirtschaftszweig- und Prozessdaten werden weiterhin spezifische Emissionen und Kosten bezogen auf den Energieverbrauch implementiert. Diese basieren teilweise aus dynamischen Berechnungen, die durch die Inputkopplung mit dem Integrierten Simulationsmodell zur Anlageneinsatz- und Ausbauplanung mit Regionalisierung (ISAaR, Modell Energie- & Umwandlungssektors) bereitgestellt werden [50]. Die spezifischen Emissionen und Kosten dienen zur Berechnung der energiebedingten Emissionen und Energieträgerkosten [51]. Zudem werden Parameter zu THG-Verminderungsmaßnahmen implementiert, die den jeweiligen Prozessen zugeordnet werden [49].²

Ausgangsbasis von Smlnd bildet das Referenzszenario, das die industrielle energetische- und emissionsorientierte Entwicklung vom Basisjahr 2015 bis 2050 in Deutschland beinhaltet. Im Referenzszenario werden zunächst die Anwendungsmatrizen für die Folgejahre berechnet. Hierzu werden die prozentualen Anteile der Energieträger und Anwendungen errechnet und mit dem Energieverbrauch bestehender Szenarien³ bis zum Zieljahr fortgeschrieben. Dieser Methodik liegt die Annahme zugrunde, dass sich die

² aus FREM: Regionalisiertes Energiesystemmodell

³ Hierbei wird hauptsächlich auf die Studie [23] zurückgegriffen

prozentuale Aufteilung der Energieträger und Anwendungen im jeweiligen Wirtschaftszweig im Referenzszenario nicht ändert. In einem nächsten Schritt werden im Referenzszenario die normierten Lastgänge mit den über alle Anwendungen kumulierten Energieträgern skaliert. Es entstehen wirtschaftszweigspezifische Lastgänge je Energieträger. Die skalierten Lastgänge wiederum dienen als Grundlage zur Berechnung der stundenscharfen energiebedingten Emissionen und Energieträgerkosten des Referenzszenarios. Diese ergeben sich durch die Multiplikation der Emissionsfaktoren und der spezifischen Energieträgerpreise mit den skalierten Lastgangsdaten.

Alle weiteren implementierten und berechneten Szenarien fußen auf dem Referenzszenario. Bisher sind Energieeffizienz- und Elektrifizierungsszenarien implementiert [49]. In dieser Publikation wird die methodische und umsetzungsorientierte Erweiterung von Smlnd um ein Mit-Maßnahmenzenario zum synthetischen Brennstoffeinsatz und der CO₂-Abscheidung erarbeitet (**Kapitel 3.4, 3.5**).

Alle Maßnahmenzenarien beruhen in Smlnd auf der bottom-up-Umsetzung von Maßnahmenclustern zur THG-Verminderung [49]. In **Tabelle 3-1** ist der Aufbau der Maßnahmenmatrix visualisiert. In Smlnd sind sowohl Maßnahmenmatrizen für Einzelprozessbetrachtungen, als auch für Querschnittstechnologien hinterlegt.

Tabelle 3-1: *Maßnahmenmatrix Smlnd*

Maßnahmen je Prozess	Strom- einsparung	Brennstoff- einsparung	Anwendungs- faktor	Anlagen- lebensdauer	Investitions- kosten	Fixe Betriebs- kosten	Maßnahmen- kategorie	Weitere ...
Maßnahme 1	in kWh/t		in %	in a		€/t	1-13 ⁴⁵	...
Maßnahme 2								
...								

Die tatsächliche Maßnahmenumsetzung wird am Beispiel der Energieeffizienz beschrieben. Zur Umsetzung werden zunächst die Maßnahmendaten eines Prozesses aggregiert. Hierbei werden Strom- und Brennstoffeinsparung, Anwendungsfaktor, Anlagenlebensdauer, Investitionskosten und Fixe Betriebskosten gemittelt. Anschließend wird anhand der Anlagenlebensdauer die natürliche Austauschrate durch den Umkehrwert errechnet. Demgemäß erfolgt die Umsetzung von THG-Verminderungsmaßnahmen durch den natürlichen Anlagentausch am Lebensende. Durch die Multiplikation des Anwendungsfaktors⁶ mit der Austauschrate und der Produktionsmenge des jeweiligen Prozesses wird die umgesetzte Produktionsmenge pro Jahr ermittelt. Die umgesetzte Produktionsmenge beschreibt den Anteil der tatsächlich produzierten Menge pro Jahr, auf die die Maßnahmenumsetzung wirkt. Die umgesetzte Produktionsmenge vermindert sich aufgrund des eingeschränkten Maßnahmenpotenzials, da in der herangezogenen Energieverbrauchsentwicklung anderer Referenzszenarien bereits geringfügig Maßnahmen

⁴ Prozessspezifisch: Abwärmenutzung, Organic Rankine Cycle (ORC), WRG, Energieeffizienz, Verfahrensroutenwechsel, Energieträgerwechsel

⁵ Querschnittstechnologien: Energieeffizienz, Technologiewechsel ohne Energieträgerwechsel, Technologiewechsel mit Energieträgerwechsel

⁶ Anwendbarkeit der Maßnahme auf den jeweiligen Anteil der Produktionsmenge

zur THG-Verminderung umgesetzt sind. Für die Maßnahmenumsetzung wird jeweils ein Start- und ein Zieljahr festgelegt. Ist das Endjahr erreicht oder die gesamte Produktionsmenge des Prozesses umgesetzt, wird die Maßnahmenumsetzung eingestellt. Über die umgesetzte Produktionsmenge wird die Strom- und Brennstoffeinsparung mit den in der Maßnahmenmatrix gemittelten Werten berechnet [49].

Ergebnisse der Smlnd-Modellierung sind jahresspezifische Energieverbräuche, Emissionen, und Energieträgerkosten sowie Lastgänge je Prozess, Wirtschaftszweig und kumuliert für die Industrie. Diese Outputdaten dienen wiederum dazu, Energieträgerpreise und Emissionen in ISAaR zu berechnen.

3.2 Status Quo und künftiger synthetischer Brennstoffeinsatz relevanter Industrieprozesse

Mittels industriespezifischer Meta-Studienanalyse werden zunächst Prozesse identifiziert, bei denen synthetische Brennstoffe derzeit eingesetzt werden. Für die identifizierten Prozesse wird der Status Quo des synthetischen Brennstoffverbrauchs erfasst. In diesem Zusammenhang wird zwischen den in der Industrie relevanten synthetischen Energieträgern Wasserstoff und Methan unterschieden. Hierzu werden Arbeiten gängiger Forschungsinstitute und Universitäten sowie statistische Daten ausgewertet.

Ausgangsbasis um Potenziale des künftigen synthetischen Brennstoffeinsatzes zu erfassen bilden Industrieprozesse, bei denen der Einsatz synthetischer Brennstoffe aufgrund ihres derzeit hohen fossilen Brennstoffverbrauchs sinnvoll und aufgrund der Prozessspezifika eine Elektrifizierung nicht vollumfänglich möglich bzw. (kosten)effizient ist. Um Prozesse zu identifizieren, bei denen synthetische Brennstoffe in Zukunft eingesetzt werden können, sind zunächst relevante Kriterien abzuleiten [2]. Es werden zwei Kategorien gebildet. Einerseits werden Prozesse berücksichtigt, bei denen der Einsatz synthetischer Brennstoffe zur Defossilsierung alternativlos ist. Beispielsweise ist der Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie hin zur H₂-Stahlroute bei einer vollständigen Defossilsierung derzeit alternativlos, solange nicht ausreichend wiederverwertbare Schrotte zur Produktion von Elektrostahl verfügbar sind. Andererseits wird das Temperaturniveau der Prozesswärmebereitstellung als Kriterium herangezogen. Als Grenztemperatur werden 500 °C festgelegt. Dies ist damit zu begründen, dass eine effiziente Elektrifizierung ab einem Temperaturniveau von 500 °C in vielen Prozessen nicht möglich ist, da Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel lediglich zur Wärmebereitstellung im Niedertemperaturbereich genutzt werden können. In diesem Zusammenhang wird berücksichtigt, dass aufgrund der höheren systemischen Energieeffizienz zur Vermeidung energiebedingter Emissionen die Elektrifizierung der Erzeugung von Wärme und mechanischer Energie meist zu bevorzugen ist.

Die Auswahl relevanter Prozesse dient zudem als Auswahlkriterium grundlegender und prozessspezifische Parameter. Für die energetische Modellierung werden spezifische Energieverbräuche und Produktionsmengen benötigt, die in diesem Zuge durch Analysen statistischer Daten und Unternehmensdaten erschlossen werden. Zudem sind Parameter einzelner Produktionsanlagen zu ermitteln, um technische Restriktionen zu erfassen. Die auf diese Weise gesammelten qualitativen und quantitativen Sekundärdaten werden in einer Metaanalyse aufbereitet, strukturiert und den jeweiligen Themengebieten zugeordnet.

3.3 Ableitung und Quantifizierung von Maßnahmen zur THG-Verminderung im Zuge des synthetischen Brennstoffeinsatzes

Um bottom-up eine THG-Verminderung durch den synthetischen Brennstoffeinsatz zu modellieren, ist die Erhebung und Quantifizierung von SynFuel-Maßnahmen erforderlich. Als Grundlage dienen die zuvor identifizierten Prozesse und die damit konnotierten prozessspezifischen Parameter. Für die Prozesse werden Maßnahmen zur THG-Verminderung ermittelt, die den synthetischen Brennstoffeinsatz einschließen. Es werden drei Maßnahmentypen definiert.

Der Verfahrensroutenwechsel beschreibt die Umstellung des Herstellungsprozesses von einem Produktionsverfahren zu einem alternativen. Um einen Verfahrensroutenwechsel zu vollziehen, sind massive Investitionen in neue Anlagen und alternative Prozesstechnik erforderlich. Neben dem Verfahrensroutenwechsel werden der Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel und der Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel als Maßnahmentypen definiert. Der Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel bedingt im Gegensatz zum Verfahrensroutenwechsel dahingehend lediglich eine Umrüstung bestehender Anlagen, um synthetische Brennstoffe einsetzen zu können. Beispielsweise ist für die Umstellung von festen auf gasförmige Brennstoffe (Wasserstoff, synthetisches Methan) zur Prozesswärmebereitstellung oftmals ein Austausch des Brenners erforderlich. Diese Umrüstungen gehen mit Investitionen und Veränderungen der Betriebskosten einher. Zudem sind teilweise Brennstoffeinsparungen zu erreichen, da die Prozesswärmebereitstellung durch Erdgas oftmals effizienter durchgeführt werden kann. Diese beiden Maßnahmenkategorien werden jeweils prozessspezifisch umgesetzt. Der Energieträgerwechsel von fossilen zu synthetischen Brennstoffen ohne Technologiewechsel ist hingegen nicht prozessspezifisch, sondern als Querschnitt über alle hinterlegten Prozesse definiert. Der Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel bewirkt keine veränderten produktionsspezifischen Kosten.

Für die hinterlegten Maßnahmen sind die Parameter der zuvor beschriebenen Maßnahmenmatrix zu erheben. Zudem sind technische Restriktionen des Einsatzes synthetischer Brennstoffe zu berücksichtigen. Um die Güte und die Vollständigkeit der Maßnahmendaten sicherzustellen, wird internes und externes Expertenwissen genutzt [52]. Zunächst wird die Datengrundlage durch Experten der FfE überprüft. Ferner werden externe Experten befragt, die in den jeweiligen Industrieprozessen über Spezialwissen verfügen. Die validierten Sekundärdaten und die neugewonnenen Primärdaten werden protokolliert, themenspezifisch strukturiert und im Hinblick auf die Thematik der Arbeit ausgewertet.

3.4 Erweiterung von Smlnd um Maßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz

Um Szenarien für den synthetischen Brennstoffeinsatz in Deutschland zu entwickeln, ist die methodische Umsetzung des Energieträgerwechsels von fossilen zu synthetischen Brennstoffen im Industriemodell zu erarbeiten. Ziel ist es, anhand des Brennstoffverbrauchs, technischer Restriktionen und weiterer Kriterien sowie unter Berücksichtigung von Elektrifizierungspotenzialen [53], [54], technische Potenziale in einem Maßnahmenzenario mit synthetischem Brennstoffeinsatz in Smlnd abzuleiten.

Für jede neu definierte Maßnahmenkategorie ist eine Umsetzungslogik zu entwickeln, die dem Maßnahmentyp zum synthetischen Brennstoffeinsatz entspricht. Für jede dieser Maßnahmenkategorien ist für die jeweiligen Prozesse eine singuläre, energieträgerscharfe Brennstoffaufteilung vor und nach Maßnahnumsetzung zu hinterlegen. In der bisherigen maßnahmenbezogenen Modellstruktur wird lediglich zwischen Strom und Brennstoffen unterschieden [49]. Diese Umstellung ist notwendig, um die Verschiebung des fossilen Brennstoffverbrauchs auf synthetische Brennstoffe zu modellieren.

Um den Verfahrensroutenwechsel abzubilden, wird zu Beginn die Maßnahmenmatrix erweitert. Als Grundlage dienen die zuvor definierten Maßnahmenmatrizen [49]. Für den Verfahrensroutenwechsel sind Verfahrensroutenpaare zu definieren. Hierdurch wird maßnahmenspezifisch festgelegt, von welcher Produktionsroute (Referenz) auf ein anderes Herstellungsverfahren mit selben Produkt umgeschichtet wird. Analog zur originären Maßnahmenmatrix sind die Brennstoff- und Stromeinsparungen, die Investitions- und Betriebskosten der Maßnahme sowie die Anlagenlebensdauer des Referenzprozesses hinterlegt. Als Beispiel dient der Verfahrensroutenwechsel von der Primärstahlherstellung (Hochofenroute) auf die Direktreduktion mit anschließendem Schmelzen im Elektrolichtbogenofen (H₂-Route). Ebenso ist der Wechsel von der Primärstahlherstellung auf die Elektrostahlherstellung als Einzelmaßnahme hinterlegt [49].

Der Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel bedingt dahingehend lediglich eine Umrüstung bestehender Anlagen, um synthetische Brennstoffe einsetzen zu können. Beispielsweise ist für die Umstellung von festen auf gasförmige Brennstoffe (synthetisches Methan) zur Prozesswärmebereitstellung in der Zementindustrie ein Austausch des Brenners erforderlich. Diese technische Restriktion bedingt Umrüstungsarbeiten. Im Modell wird berücksichtigt, dass etwa 80 % der Drehrohröfen in der Zementindustrie in Deutschland mit einem Multi-Fuel-Brenner ausgestattet sind. Dementsprechend ist eine kostenintensive Umrüstung bei lediglich etwa 20 % der Anlagen erforderlich, um die fossilen Energieträger Braunkohle und Steinkohle durch synthetisches Methan zu substituieren [55]. Für diese Anlagen wird eine Energieträgerwechselmaßnahme mit Technologiewechsel definiert. Diese Umrüstungen gehen mit Investitionen und Veränderungen der Betriebskosten einher. Zudem sind teilweise Brennstoffeinsparungen zu erreichen, da die Prozesswärmebereitstellung durch Erdgas oftmals effizienter durchgeführt werden kann. Die Maßnahmenkategorien Verfahrensroutenwechsel und Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel werden jeweils prozessspezifisch umgesetzt.

Der Energieträgerwechsel von fossilen zu synthetischen Brennstoffen ohne Technologiewechsel ist hingegen nicht prozessspezifisch, sondern als Querschnitt hinterlegt. Demgemäß beziehen sich Strom- und Brennstoffeinsparungen auf die Anzahl der Betriebe, bei denen eine Erdgassubstitution durch synthetisches Methan möglich ist. Da kein Anlagentausch erforderlich ist und demgemäß auch keine natürliche Austauschrate berechnet werden kann, muss ferner eine Austauschrate hinterlegt werden, die die Umsetzungsgeschwindigkeit der Maßnahme festlegt. Die Umsetzungsgeschwindigkeit wird über die Multiplikation der Betriebsanzahl mit der Austauschrate bestimmt. Analog zur Umsetzung auf der Basis des Produktionsmengenaustauschs, kommen jährlich neue Betriebe hinzu, die Erdgas durch synthetisches Methan ersetzen. Zudem wird berücksichtigt

dass eine effiziente Elektrifizierung vor allem unterhalb eines Temperaturniveaus von 500 °C möglich ist⁷. Dementsprechend ist der Austausch des Erdgasverbrauchs je Wirtschaftszweig durch synthetischer Methan im Temperaturbereich zwischen 500 °C und 1000 °C als Maßnahme implementiert. Darüber hinaus wird ein gewisser Anteil des Erdgasverbrauchs pro Jahr über 1000 °C durch synthetisches Methan substituiert. Würde die Maßnahme vollständig umgesetzt, wäre eine komplette Substitution des Erdgasverbrauchs in den beschriebenen Temperaturbereichen vorgesehen.

Neben der Ergänzung um THG-Verminderungsmaßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz wird das Mit-Maßnahmenzenario um die Einzelmaßnahmenumsetzung erweitert. Folglich werden die Maßnahmen beim synthetischen Brennstoffeinsatz nicht mehr aggregiert in Clustern, sondern jeweils einzelmaßnahmenscharf untersucht. Hierdurch wird es möglich die Wirkungsweise einzelner Maßnahmen auf Energieverbräuche und Emissionen zu analysieren.

3.5 Erweiterung von Smlnd um prozessbedingte Emissionen und CO₂-Abscheidung

Um CO₂ für die Nutzung zur Produktion synthetischer Brennstoffe im Energie- & Umwandlungssektor zur Verfügung zu stellen, wird in emissionsintensiven Prozessen zudem die CO₂-Abscheidung modellhaft abgebildet. Um auch die Abscheidung prozessbedingter Emissionen zu modellieren, müssen zunächst prozessbedingte Emissionen ins Modell implementiert werden.

Bottom-up wird eine wirtschaftszweigscharfe Aufteilung der Prozessemissionen vorgenommen. Hierfür sind vier methodische Schritte durchzuführen. Im ersten Schritt werden die eindeutig zuzuordnenden prozessbedingten Emissionen behandelt, die aus dem vierten Kapitel des nationalen Inventarberichts (Industrie) stammen. Da nicht alle Informationen zur Erfassung und wirtschaftszweigscharfen Aufteilung der prozessbedingten Emissionen in einer Jahresausgabe des Inventarberichts enthalten sind, werden mehrerer Ausgaben verschiedener Jahre herangezogen [56], [57], [51]. Die Aufteilung der Prozessemissionen wird in einem zweiten Schritt anhand der Studien [27] und [58] validiert und plausibilisiert. Die auf diese Weise kumulierten Emissionen entsprechen 72 % der in den BMWi-Energiedaten hinterlegten prozessbedingten Emissionen [59]. Zusätzliche prozessbedingte Emissionsquellen, die durch Querschnittstechnologien entstehen, werden in Schritt drei hauptsächlich dem Maschinenbau und der sonstigen Chemie zugeordnet. Die verbleibende Restmenge von knapp 3 % der prozessbedingten Emissionen wird in einem vierten Schritt jedem Wirtschaftszweig gleichermaßen zugewiesen. Auf diese Weise können 98 % der in den [59] enthaltenen prozessbedingten Emissionen wirtschaftszweigscharf zugeordnet werden. Auf Einzelprozessebene werden die prozessbedingten Emissionen bottom-up über die spezifischen Emissionen berechnet. Diese bilden die Grundlage für die Anwendung der CO₂-Abscheidung auf Prozessniveau.

Das implementierte CO₂-Abscheidungsmodul basiert auf den Werten und der Funktionsweise des post-combustion-Verfahrens. Um die Implementierung sicherzustellen,

⁷ Wärmepumpen, Elektrodenheizkessel

werden die Maßnahmenkategorien um die CO₂-Abscheidung und die Maßnahmenmatrizen um die Spalte „Abscheidungsrate“ erweitert. Die prozentuale Abscheidungsrate gibt an, welcher Anteil der Emissionen auf Prozessebene tatsächlich „abgefangen“ werden kann. Die CO₂-Abscheidung pro Jahr ist zudem an die umgesetzte Produktionsmenge gebunden. Diese wird jährlich über die Austauschrate und den Anwendungsfaktor berechnet. Dabei werden sowohl energiebedingte, als auch prozessbedingte Emissionen abgeschieden. Es gilt zu berücksichtigen, dass der Brennstoff- und Stromverbrauch durch die CO₂-Abscheidung zunimmt. Die zusätzlich entstehenden energiebedingten Emissionen infolge des erhöhten Brennstoffeinsatzes werden analog mit den zuvor hinterlegten Abscheidungsraten vermindert. Die verbleibenden Brennstoff- und zusätzlichen Stromemissionen werden im Mit-Maßnahmenszenario auf die Emissionen des Referenzszenarios aufgeschlagen. Für die Brennstoffaufteilung wird wiederum auf die zuvor implementierte energieträgerscharfe Aufteilung pro Prozess zurückgegriffen.

Die abgeschiedene Menge CO₂ wird über ein Input-Output-Modul an den Bereitstellungssektor zur Erzeugung von synthetischem Methan übergeben.

4 Industriebetrachtung und Eingangsdaten für Smlnd

Prozessspezifische Einsatzmöglichkeiten synthetischer Brennstoffe zur Reduktion energie- und prozessbedingter Emissionen sind bisher in der Stahl- und Chemieindustrie bekannt [16], [8], [21], [7], [36], [35], [37].

In der *Stahlindustrie* kann der weitverbreitete koksbasierte Hochofenprozess zur Erzeugung von Primärstahl teilweise durch wasserstoffbasierte Direktreduktionsanlagen mit anschließendem Schmelzvorgang im Elektrolichtbogenofen ersetzt werden. Eine vollständige Elektrifizierung ist nicht möglich, da bei der Primärstahlerzeugung ein Reduktionsmittel zur Bindung des im Eisenoxid enthaltenen Sauerstoffs erforderlich ist und für den vollständigen Verfahrensroutenwechsel (Sekundärstahlerzeugung) nicht ausreichend Recyclingmaterialien verfügbar sind. Um auf diese Weise eine Reduktion der THG-Emissionen zu erreichen, ist ein Verfahrensroutenwechsel von der Hochofenroute zur H₂-Stahlroute in Smlnd hinterlegt. Eine Brennstoffeinsparung von etwa 800 kWh/t kann erreicht werden. Dem steht ein Mehrstromverbrauch von etwa 550 kWh/t gegenüber [60], [61].

In der *Chemieindustrie* können kohlenstoff- und wasserstoffbasierte Ausgangsprodukte durch den Einsatz erneuerbarer synthetischer Brennstoffe substituiert werden. Stoffe wie Ammoniak, Methan und weitere⁸ sind hierfür geeignet [21], [7], [37]. Im Gegensatz zum Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie ist die stoffliche Nutzung von Energieträgern bislang nicht in Smlnd implementiert, weshalb der Ersatz fossiler stofflich genutzter Energieträger durch auf erneuerbaren Energien basierende synthetische Energieträger nicht Bestandteil der weiteren Betrachtung ist.

Energiebedingte Emissionen können theoretisch bei nahezu jeder fossilen Brennstoffanwendung durch den Einsatz synthetischer Brennstoffe reduziert werden [16], [7]. Zu berücksichtigen sind bei einem Einsatz von Wasserstoff jedoch problematische chemische Reaktionen, wie sie durch die Kombination mit Sauerstoff auftreten können. Synthetisches Methan kann Erdgas bei ähnlicher Zusammensetzung ohne nennenswerte Einschränkungen ersetzen. Da die Elektrifizierung ab einem gewissen Temperaturniveau weniger effizient durchführbar ist⁹, kommen synthetische Brennstoffe aufgrund der hohen Kosten und geringen Effizienz hauptsächlich bei hohen Temperaturniveaus infrage [5], [16], [7]. Im Modell ist dementsprechend ein Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel von Erdgas zu synthetischem Methan implementiert und je nach Temperaturbereich maßnahmenspezifisch hinterlegt. So werden sowohl Erdgasverbräuche zur Bereitstellung von Prozesswärme in einem Temperaturbereich zwischen 500 und 1000 °C, als auch über 1000 °C durch synthetisches Methan substituiert. Veränderungen des Strom- und Brennstoffverbrauchs sowie zusätzliche Investition sind nicht zu erwarten.

Neben dem Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel sind Maßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz hinterlegt, die eine Umrüstung bestehender Ablagen erfordern. Für die Zement- und Kalkherstellung sind prozessspezifische Maßnahmen implementiert, bei denen Festbrennstoffe wie Kohlen und Mineralöl durch den Einsatz

⁸ Methanol, Olefine, Ethanol, Ethylen, Ethan, Polyethylen, Benzol, Toluol und Xylol

⁹ Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel können ab einem gewissen Temperaturniveau nicht mehr eingesetzt werden.

synthetischen Methans ersetzt werden. Um Erdgas einsetzen zu können, ist in der Zementindustrie ein Multifuel-Brenner erforderlich [55] Dabei sind jedoch bereits knapp 80 % der Drehrohfen mit Multifuel-Brennern ausgestattet, deshalb ist die Maßnahme auf lediglich 20 % der Produktionsanlagen anwendbar [62]. Da die einzelnen Produktionsanlagen und deren Kapazitäten nicht identifiziert werden können, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Maßnahme auf 20 % der Produktionsmenge angewandt werden kann [62]. Energieeinsparungen können hierdurch in der Zementindustrie erreicht werden, da der Einsatz von Erdgas effizienter als der von Kohle und Mineralöl durchgeführt werden kann [63]. Abschließend ist festzuhalten, dass der Einsatz synthetischer Brennstoffe neben der stofflichen Nutzung in der Chemieindustrie in der Studie [64] ebenfalls hauptsächlich in der Stahl-, Zement- und Kalkindustrie gesehen wird.

Energie- und prozessbedingte Emissionen werden zudem durch die implementierte CO₂-Abscheidung in der Stahl- und Zementindustrie vermindert. Bei der Primärstahlherstellung kann im Gegensatz zur Zementindustrie ein wesentlich geringerer Anteil des emittierten CO₂ abgeschieden werden. Demgemäß ist für die Stahl- bzw. Zementproduktion eine Abscheiderate von 31 % bzw. 91 % hinterlegt [65], [66], [67]. Die zusätzlichen spezifischen Strom- und Brennstoffverbräuche, die durch die CO₂-Abscheidung entstehen, sind analog zu den anderen Maßnahmendaten in **Tabelle 4-1** zusammengefasst.

Tabelle 4-1: *Analysierte und implementierte THG-Verminderungsmaßnahmen im untersuchten Mit-Maßnahmenszenario, Einsatz synthetischer Brennstoffe und CO₂-Abscheidung*

Maßnahme	Strom-einsparung	Brennstoff-einsparung	Umsetzungs-geschwindigkeit ab Startjahr	Maßnahmen-kategorie	Anwendbare Produktions-menge/Betriebe	Prozess/Wirtschafts-zweig
Verfahrensroutenwechsel von der Hochofenroute zur H ₂ -Stahlroute	-548 kWh/t	778 kWh/t	1/20	Verfahrensroutenwechsel	60 %	Primärstahl/ H ₂ -Stahl
Substitution des Erdgasverbrauchs zwischen 500 und 1000 °C durch synthetisches Methan	0	0	1/40	Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel	100 %	Wirtschafts-zweig-übergreifend
Substitution des Erdgasverbrauchs über 1000 °C durch synthetisches Methan	0	0	1/40	Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel	100 %	Wirtschafts-zweig-übergreifend
Umrüstung von Drehrohrfen zur Nutzung synthetischen Methans	0	100 kWh/t	1/25	Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel	20 %	Zement
Umrüstung von Schachtfen zur Nutzung synthetischen Methans	0	0	1/40	Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel	62 %	Kalk
CO ₂ -Abscheidung in der Zementindustrie	-8 kWh/t	-244 kWh/t	1/25	CO ₂ -Abscheidung	100 %	Zement
CO ₂ -Abscheidung in der Primärstahlherstellung	-48 kWh/t	-590 kWh/t	1/25	CO ₂ -Abscheidung	100 %	Primärstahl

5 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend wird zunächst der Status Quo des synthetischen Brennstoffverbrauchs in der Industrie behandelt. Anschließend werden Simulationsergebnisse des Referenz- und Mit-Maßnahmenszenarios ausgewiesen und diskutiert.

5.1 Status Quo des Verbrauchs synthetischer Brennstoffe

In der Industrie werden synthetische Brennstoffe derzeit kaum energetisch genutzt. Lediglich bei einem Stahlproduzenten in Salzgitter (DE) finden synthetische Brennstoffe (Wasserstoff) in der Industrie Anwendung [45]. Bei näherer Betrachtung wird jedoch deutlich, dass der erneuerbare Wasserstoff lediglich als Schutzgas bei Glühprozessen eingesetzt wird, um Wasserstoff auf fossiler Basis zu verdrängen [68]. Der Wasserstoff wird durch Abwärme des Produktionsprozesses mittels reversibler Hochtemperaturelektrolyse hergestellt. Die erzeugte Wasserstoffmenge reicht jedoch bei weitem nicht aus, um Stahl auf der Basis direktreduzierten Eisens herzustellen. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist nach eigenen Angaben derzeit gleichermaßen nicht möglich [68]. Studien, die die Anwendung synthetischen Methans in Deutschland ausweisen, konnten nicht identifiziert werden. Demgemäß wird davon ausgegangen, dass synthetisches Methan derzeit nicht im industriellen Maßstab genutzt wird.

Neben der energetischen ist die stoffliche Nutzung synthetischer Brennstoffe in der Industrie zu beachten. In der Chemieindustrie wird Wasserstoff unter anderem zur Produktion von Ammoniak im Haber-Bosch-Verfahren verwendet [69], [70]. In **Tabelle 5-1** ist der stoffliche Wasserstoffverbrauch prozessspezifisch zusammengefasst (2015).

Tabelle 5-1: *Status Quo der stofflichen Wasserstoffnutzung in der Industrie [44]*

Prozess	Synthetischer Brennstoff	Verbrauch 2015 in TWh
Ammoniak		19,6
Methanol	Wasserstoff	12,7
Raffinerien		24,8
Sonstige Chemie		11,9
Gesamt	Wasserstoff	69

In der Chemieindustrie wurden im Jahr 2015 knapp über 69 TWh Wasserstoff eingesetzt. Dieser Wasserstoff wird überwiegend aus fossilen Energieträgern gewonnen oder fällt als Koppelprodukt bei chemischen Herstellungsverfahren wie beispielsweise der Chlorelektrolyse an [8] [71], [72], [73]. Synthetisches Methan wird in der Chemieindustrie derzeit ebenfalls nicht eingesetzt [44], [45]. Dies ist maßgeblich auf die mangelnde Verfügbarkeit und die höheren Kosten von synthetischem Methan im Vergleich zu Erdgas zurückzuführen [74], [75], [76]. Potenziale für den Einsatz synthetischen Methans bieten ebenfalls Prozesse wie die Methanol-, Ethylen- und BTX¹⁰-Herstellung.

¹⁰ Benzol, Toluol und Xylol

Da die stoffliche Nutzung synthetischer Energieträger nicht Bestandteil der Industriesimulationen in Smlnd ist und die energetische Nutzung synthetischer Energieträger in der deutschen Industrie vernachlässigbar gering ist, sind im Referenzszenario keine synthetischen Brennstoffverbräuche hinterlegt.

5.2 Referenz- und Mit-Maßnahmenszenario

Im Mit-Maßnahmenszenario werden synthetische Brennstoffe analog zu [19] und [64] ab dem Jahr 2030 eingesetzt. In [27] finden synthetische Brennstoffe für die energetische Nutzung hingegen bereits ab dem Jahr 2025, in [32] erst ab 2040 Verwendung [2]. Die CO₂-Abscheidung wird analog zu [65], [32] ab 2030 durchgeführt. In [27] und [77] wird die industrielle CO₂-Abscheidung erst ab 2040 genutzt. Lange währende Genehmigungsverfahren, fehlende Infrastruktur und niedrige CO₂-Preisen werden als Begründung angeführt.

In **Abbildung 5-1** wird zunächst der Strom- und Brennstoffverbrauch des Referenz- und des Mit-Maßnahmenszenarios miteinander verglichen.

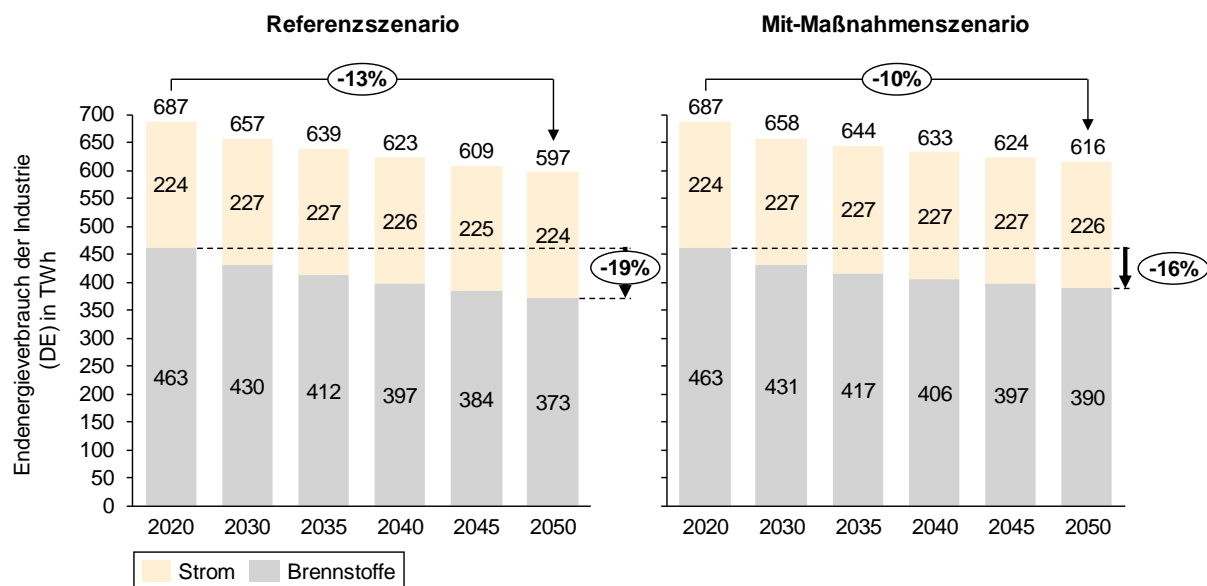


Abbildung 5-1: Strom- und Brennstoffverbrauch in der Industrie, Zeithorizont 2050, Referenz (links) und nach Maßnahmenumsetzung (rechts)

Im Referenzszenario ist eine deutliche Abnahme des Energieverbrauchs zwischen 2020 und 2050 zu beobachten (13%). Dies ist auf die zunehmende Energie- sowie Material- und Ressourceneffizienz im Szenario zurückzuführen. Der Brennstoffverbrauch sinkt im Vergleich zum Stromverbrauch überproportional, wodurch der Anteil des Stromverbrauchs am Gesamtenergieverbrauch in der Industrie von 33% auf 38% ansteigt. Obwohl im Mit-Maßnahmenszenario selbige Energie- sowie Material- und Ressourceneffizienz zugrunde gelegt ist, steigt der Energieverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario um knapp 20 TWh an. Dies ist auf den zusätzlichen energetischen Verbrauch durch die CO₂-Abscheidung in der Zement- und Stahlindustrie zurückzuführen. Bereits im Startjahr der Maßnahmenumsetzung (2030) ist der Mehrverbrauch ggü. dem Referenzszenario ersichtlich. Zudem ist in **Abbildung 5-2** der Energieverbrauch energieträgerschärf dargestellt. Es wird deutlich, dass insbesondere der Erdgasverbrauch stark abnimmt und der

Einsatz von synthetischem Methan stark anwächst. Im Mit-Maßnahmenszenario finden im Jahr 2050 41 TWh synthetisches Methan in der Industrie Verwendung. Zudem ist ein Wasserstoffverbrauch von knapp 2 TWh im Mit-Maßnahmenszenario zu verzeichnen. Andere Studien wie [19] weisen im Jahr 2050 einen deutlich höheren Wasserstoffverbrauch in der Industrie aus. In diesem Mit-Maßnahmenszenario ist der Wasserstoffverbrauch jedoch lediglich durch den Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie bedingt. Weitere Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserstoffverbrauchs sind modellseitig nicht implementiert. Im Referenzszenario ist keine energetische Nutzung von Wasserstoff in der Industrie hinterlegt.

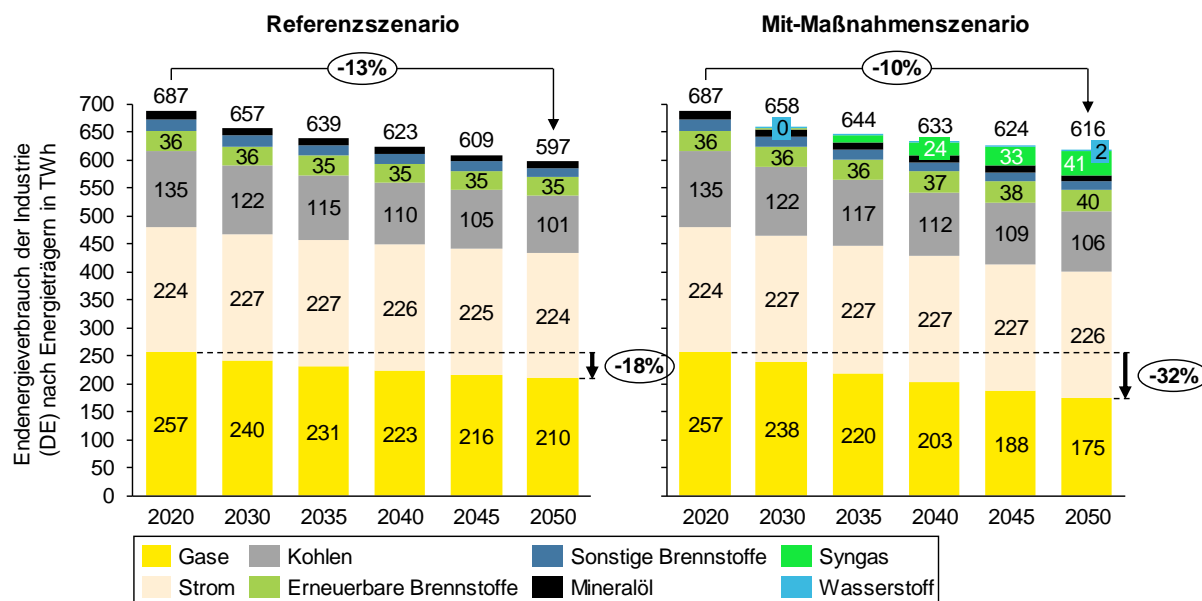


Abbildung 5-2: Energieverbrauch in der Industrie nach Energieträger, Zeithorizont 2050

Aufgrund der CO₂-Abscheidung steigt auch der Kohleverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario bis 2050 leicht an. Emissionsseitig überwiegen jedoch die Vorteile der CO₂-Abscheidung deutlich. In **Abbildung 5-3** ist die Entwicklung der energie- und prozessbedingten Emissionen im Referenzfall und nach Maßnahmenumsetzung visualisiert.

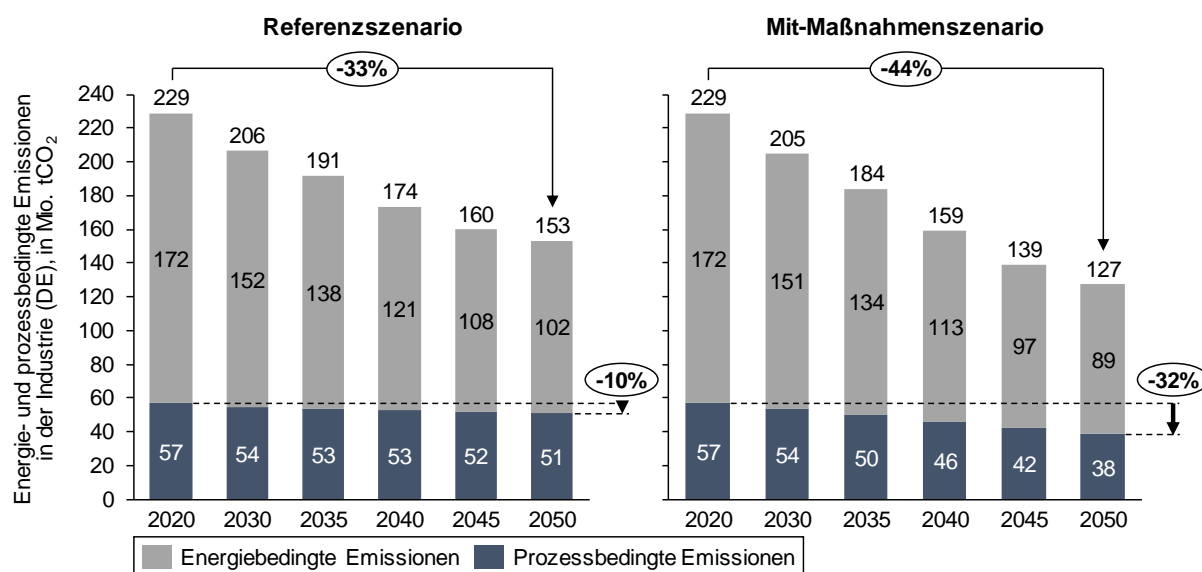


Abbildung 5-3: Energie- und prozessbedingte Emissionen in der Industrie, Zeithorizont 2050

Die energiebedingten Emissionen können durch den Maßnahmenereinsatz um etwa 25 % im Vergleich zum Referenzszenario reduziert werden. Die Verminderung von etwa 13 Mio. t energiebedingter CO₂-Emissionen gegenüber dem Referenzfall ist zu etwa 30 % auf die CO₂-Abscheidung und zu knapp 70 % auf den Einsatz synthetischer Brennstoffe zurückzuführen. Die starke Reduktion der prozessbedingten Emissionen wird hingegen hauptsächlich durch die CO₂-Abscheidung (ca. 12 Mio. tCO₂ pro Jahr in 2050), in geringerem Maße aber auch durch den Verfahrensroutenwechsel erzielt (ca. 0,7 Mio. tCO₂).

In **Abbildung 5-4** sind die CO₂-Einsparungen maßnahmenspezifisch in einem Wasserfalldiagramm dargestellt. Diese Darstellung wird durch die Erweiterung der Maßnahmenumsetzung auf Einzelmaßnahmenebene möglich.

Verminderung der energie- und prozessbedingten Emissionen in Mio. tCO₂

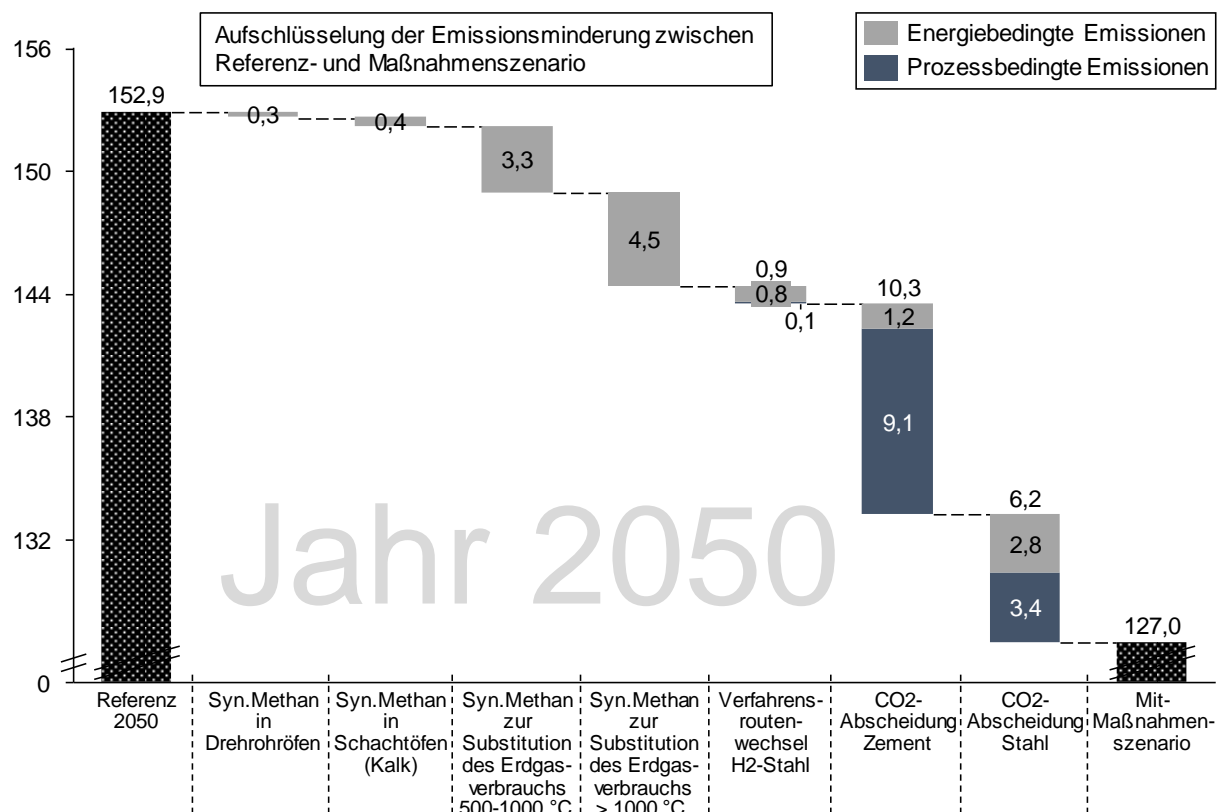


Abbildung 5-4: Schlüsselung der CO₂-Verminderung auf umgesetzte Einzelmaßnahmen, Referenzfall und Maßnahmenumsetzung im Vergleich

Es zeigt sich, dass durch den Verfahrensroutenwechsel von Primärstahl auf Sekundärstahl sowohl prozessbedingte-, als auch energiebedingte Emissionen vermindert werden. Den größten Anteil an der Emissionsverminderung im Einzelmaßnahmenvergleich weist die CO₂-Abscheidung in der Zementindustrie auf. Hauptsächlich werden durch diese Maßnahme prozessbedingte Emissionen reduziert. Energiebedingte Emissionen werden maßgeblich durch die Substitution von Erdgas im Temperaturbereich über 500 °C vermindert (7,8 Mio. t CO₂). Dies ist vor allem auf die schiere verschobene Erdgasmenge in einer Größenordnung von etwa 40 TWh im Jahr 2050 bedingt. Die Maßnahmen zum Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel führen hingegen zu eher geringen Einsparungen (0,7 Mio. tCO₂). Dies ist auf den vergleichsweise niedrigen Anwendungsfaktor zurückzuführen (vgl. **Tabelle 4-1**).

Neben der Industrie- und Einzelmaßnahmenbetrachtung sind in **Abbildung 5-5** wirtschaftszweigscharfe Endenergieverbräuche ausgewiesen.

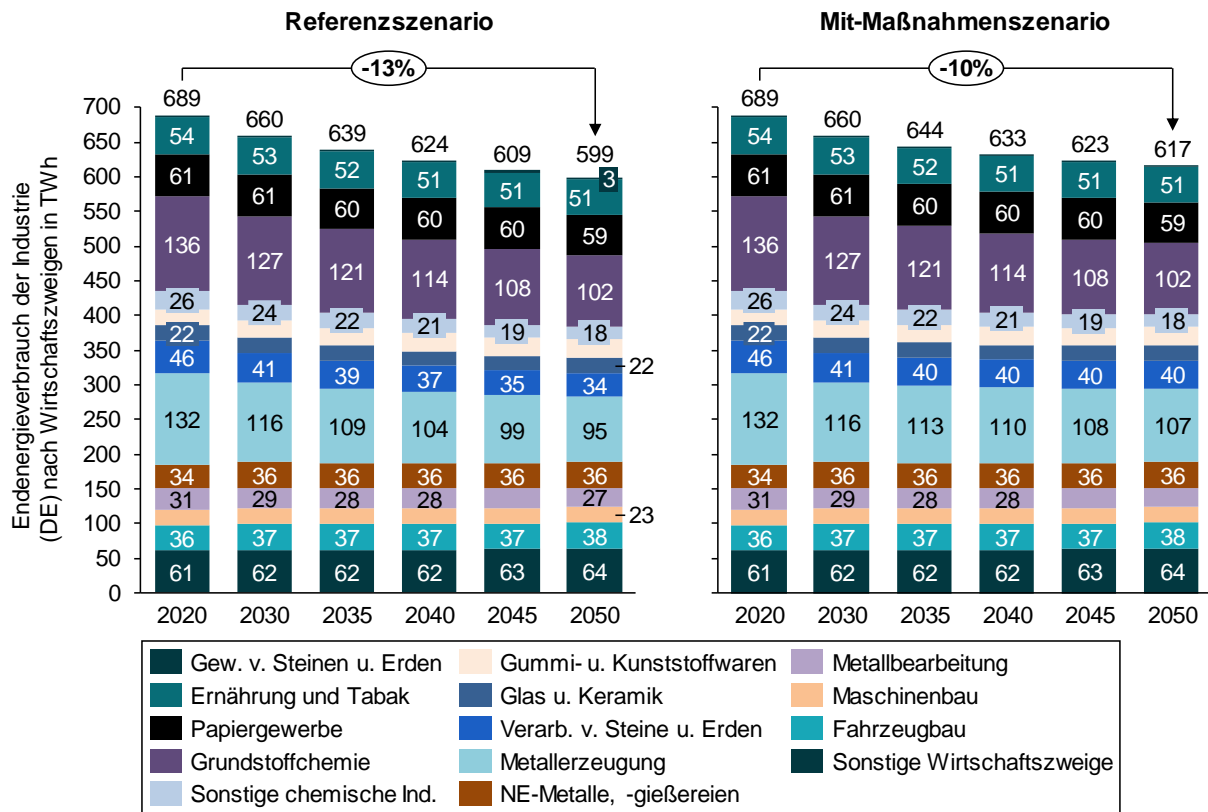


Abbildung 5-5: Endenergieverbrauch nach Wirtschaftszweig, Industrie bis 2050

Insbesondere in den Wirtschaftszweigen Metallerzeugung sowie Verarbeitung von Steinen und Erden ist ein starker Anstieg des Energieverbrauchs im Vergleich zur Referenz zu beobachten. Dies wird durch den zusätzlichen Strom- und Brennstoffverbrauch infolge der CO₂-Abscheidung in beiden Wirtschaftszweigen hervorgerufen. In **Abbildung 5-6** sind zudem die energiebedingten Emissionen wirtschaftszweigscharf angeführt.

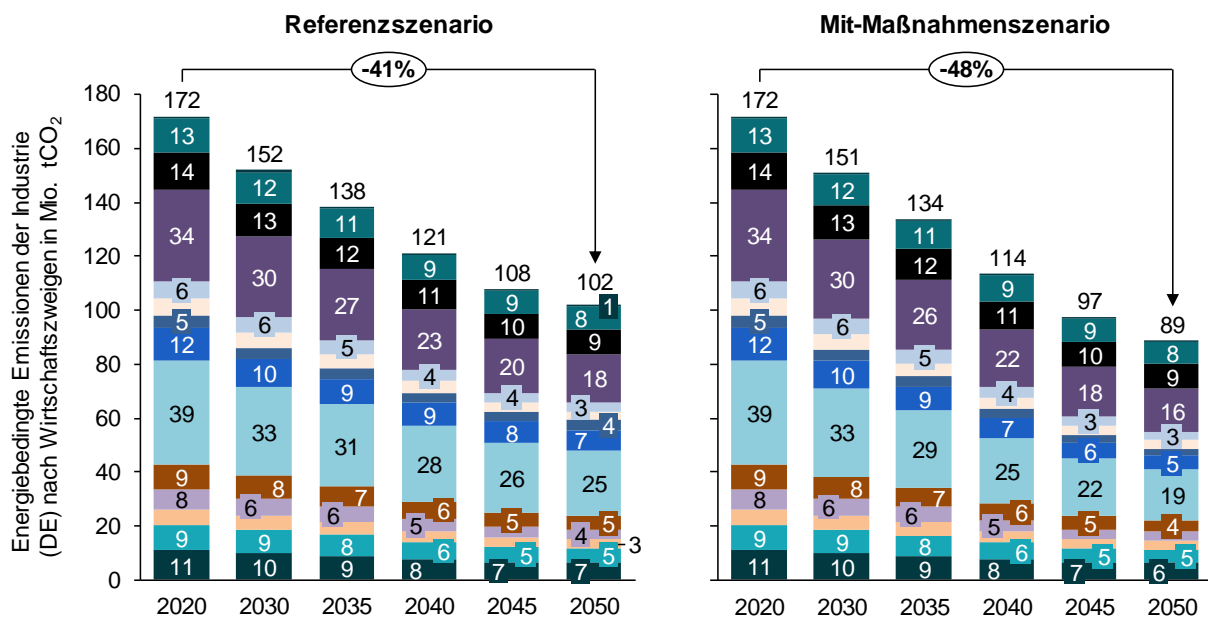


Abbildung 5-6: Energiebedingte CO₂-Emissionen nach Wirtschaftszweig, Industrie bis 2050

Ist in den Wirtschaftszweigen Metallerzeugung sowie Verarbeitung von Steinen und Erden ein deutlicher Anstieg des Energieverbrauchs zu beobachten, sinken reziprok die CO₂-Emissionen durch die Maßnahmenumsetzung. Dies wird durch die CO₂-Abscheidung bewirkt. Insgesamt werden im Mit-Maßnahmenszenario wirtschaftszweigübergreifend im Jahr 2050 etwa 20 Mio. tCO₂ abgeschieden. Vermindert werden jedoch nur 16,5 Mio. tCO₂ durch die CO₂-Abscheidung. Dies wird dadurch verursacht, dass zusätzlich etwa 3,5 Mio. t energiebedingte CO₂-Emissionen durch die CO₂-Abscheidung entstehen. Die begrenzte Abscheidung bedingt, dass jedoch lediglich 31 % in der Stahl- und 91 % in der Zementindustrie erneut abgeschieden werden. Es entstehen 1,9 Mio. t thermische CO₂-Emissionen, die nicht durch die CO₂-Abscheidung gemindert werden können. Zudem fallen im Jahr 2050 etwa 0,1 Mio. t indirekte CO₂-Emissionen durch den zusätzlichen Stromverbrauch des CO₂-Abscheidungsmoduls an. Das abgeschiedene CO₂ im Industriesektor übersteigt die benötigte Menge zur Produktion von 41 TWh synthetischen Methans 2050 im Mit-Maßnahmenszenario klar. Zur Herstellung einer Terrawattstunde werden nach [44] etwa 195.000 tCO₂ benötigt. Somit verbleiben 8 Mio. tCO₂ aus der Industrie zur Produktion und Verwendung synthetischen Methans in anderen Sektoren (etwa 40 TWh). Um die Verschiebung der Produktionsmengen von einer Verfahrensrouten auf eine andere und deren Umsetzungsgeschwindigkeit sowie die Auswirkungen auf den Energieträgermix zu zeigen, sind Parameter des Wechsels von der Primärstahlerzeugung (Hochofenroute) zur Stahl-Direktreduktion (H₂-Route) in **Abbildung 5-7** dargestellt.

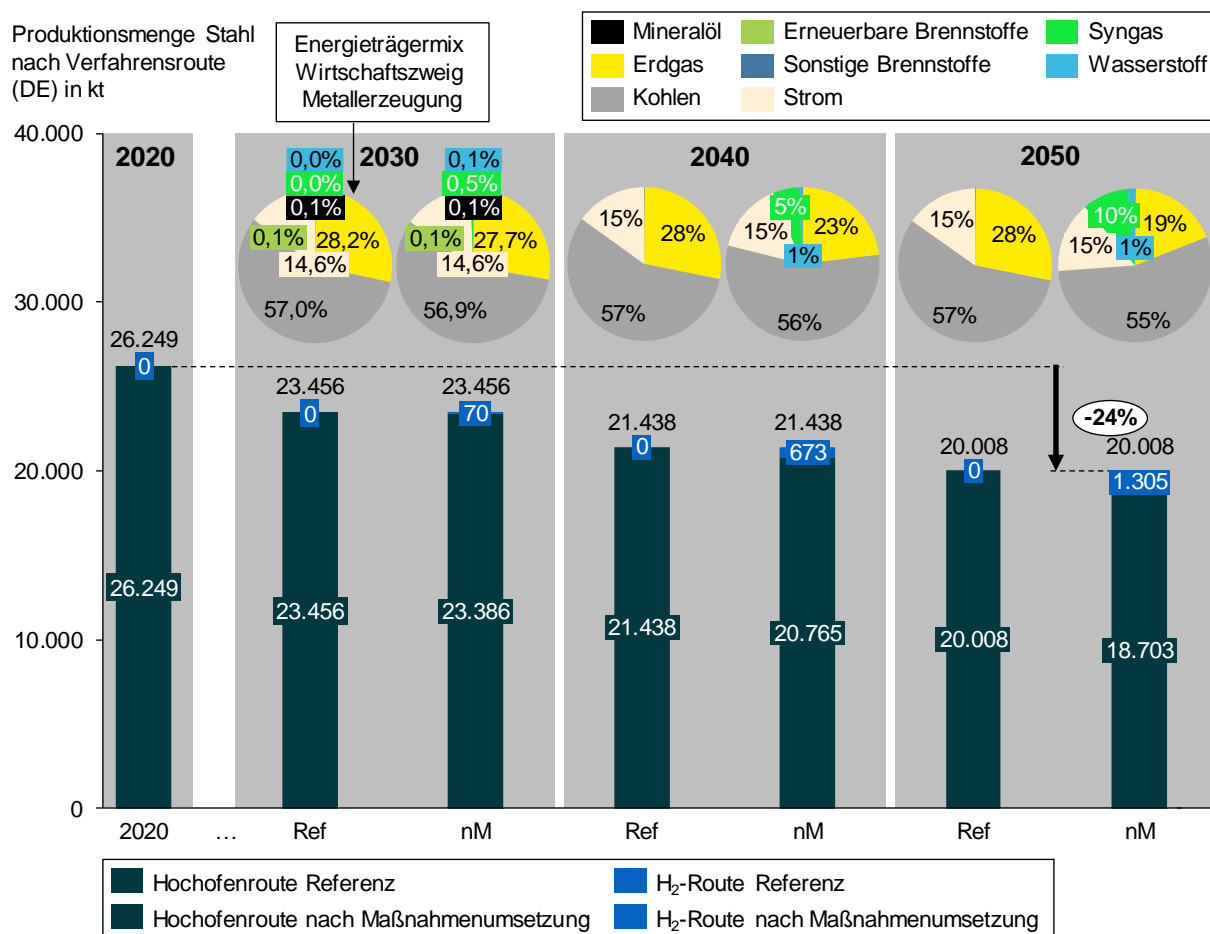


Abbildung 5-7: Verfahrenswchsel Hochofenroute zu H₂-Route Stahl, mit Energieträgermix des Wirtschaftszweiges Metallerzeugung

Der fortschreitende Verfahrensroutenwechsel von der Primär- zur H₂-Stahlerzeugung führt bis zum Jahr 2050 dazu, dass über 103.000 tStahl auf Basis der Direktreduktion mit anschließendem Schmelzvorgang im Elektrolichtbogenofen produziert werden. Hierfür werden 1,7 TWh Wasserstoff benötigt. Insgesamt ist eine Abnahme der Produktionsmenge aufgrund erhöhter Material- und Ressourceneffizienz von Stahl um etwa 24 % von 2020 bis 2050 im Modell verankert [32].

6 Schlussbetrachtung mit Fazit und Ausblick

Analysen zum Status Quo zeigen, dass derzeit kaum synthetische Brennstoffe in der deutschen Industrie eingesetzt werden. Lediglich stofflich werden synthetische Brennstoffe (insbesondere Wasserstoff) genutzt. Zu allozieren sind die nicht-energetischen Verbräuche auf die Chemieindustrie und Raffinerien [44]. Im industriell vernachlässigbarem Maßstab findet erneuerbarer Wasserstoff weiterhin in Forschungsanlagen der Stahlindustrie Verwendung.

Ferner wird in dieser Publikation die Methodik zur modelldynamischen Implementierung und Umsetzung von THG-Verminderungsmaßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz dargelegt. Hierdurch wird die Implementierung des synthetischen Brennstoffeinsatzes und der CO₂-Abscheidung in Smlnd möglich. Die daraus errechneten Modellergebnisse zeigen, dass im Vergleich des Referenz- und des Mit-Maßnahmenszenarios ein Anstieg des Energieverbrauchs nicht zwangsläufig mit dem Anstieg der CO₂-Emissionen konnotiert ist. Die THG-Verminderung ist in diesem Zusammenhang maßnahmenspezifisch ausgewiesen. Zudem werden die Umsetzungsgeschwindigkeit und die resultierenden Auswirkungen von Einzelmaßnahmen deutlich.

Insbesondere synthetisches Methan wird im Mit-Maßnahmenszenario zur Verminderung von CO₂-Emissionen verwendet. Wasserstoff entsteht im Vergleich zu anderen Szenarien in einem geringen Umfang [19]. Es zeigt sich, dass durch den Einsatz synthetischer Brennstoffe und der CO₂-Abscheidung deutliche CO₂-Minderungen erreicht werden können. Voraussetzung hierfür ist jedoch die CO₂-neutrale Produktion von Strom. Die zusätzlich benötigten elektrischen Energiemengen zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe werden in den Energie- & Umwandlungssektor verschoben.

Ein dezidierter Vergleich des Mit-Maßnahmenszenarios und anderen energie- und klimaorientierten Szenarien ist nicht sinnvoll, da in dieser Publikation kein vollumfänglich konsistentes Szenario generiert wird. Es werden lediglich die Auswirkungen und Wechselwirkungen von Einzelmaßnahmen in einem Mit-Maßnahmenszenario untersucht. Im Gegensatz zu anderen Szenarien, die endogene bzw. exogene Transformationspfade berechnen oder festlegen, ist die Umsetzungsgeschwindigkeit der Maßnahmen nicht an ein vorgegebenes Klimaschutzambitionsniveau gebunden. Vielmehr ist es Ziel natürliche Austauschraten mit der gewählten Umsetzungsgeschwindigkeit zu modellieren. Durch höhere Umsetzungsgeschwindigkeiten bzw. einen früheren Beginn der Maßnahmenumsetzung wären weitere umsetzungsorientierte Maßnahmenpotenziale zu heben. Ebenfalls werden die Maßnahmen nicht nach CO₂-Vermeidungskosten priorisiert, die Umsetzung erfolgt nach Vorgabe. Um eine kostenoptimalen Maßnahmenzusammensetzung hinsichtlich der CO₂-Verminderungskosten sicherzustellen und Szenarien für den

synthetischen Brennstoffeinsatz zu entwickeln ist die methodische Umsetzung des kostenoptimalen Energieträgerwechsels im Industriemodell SMIND zu erarbeiten.

Zudem werden im Szenario keine Kosten ausgewiesen. Im Modell Smlnd sind zwar Kosten für die Maßnahmen hinterlegt, die Ausweisung ist jedoch lediglich bei der Erstellung einer konsistenten Szenarienwelt sinnvoll.

Darüber hinaus sind zukünftig Technologiemixszenarien zu implementieren, die die Umsetzung von Energieeffizienz, Elektrifizierungsmaßnahmen und den synthetischen Brennstoffeinsatz sowie die CO₂-Abscheidung beinhalten. Hierdurch können ganzheitliche konsistente Industrieszenarien entwickelt werden und Rückwirkungen auf den synthetischen Brennstoffeinsatz analysiert werden. Eine endogene, kostenoptimale Maßnahmenumsetzung sorgt zudem dafür, dass synthetische Brennstoffe kosteneffizient eingesetzt werden. Ferner sind marktliche Anreize wie der CO₂-Preis für den Einsatz synthetischer Brennstoffe zu identifizieren und zu implementieren, um die Maßnahmenumsetzung aus Akteursperspektive durchführen zu können. Auf Maßnahmen- und Energieverbrauchsebene ist überdies die stoffliche Nutzung von Energieträgern im Modell zu integrieren. Um den synthetischen Brennstoffeinsatz in der Industrie ganzheitlich abbilden zu können, ist das Modell demgemäß um die stoffliche Nutzung sowie THG-Verminderungsmaßnahmen zur stofflichen Nutzung und dem synthetischen Brennstoffeinsatz zu erweitern. Ferner müssen weitere Maßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz erfasst und implementiert werden. Diese können prozessspezifisch als auch prozessunspezifisch sein. Beispielsweise sind prozessspezifische Einsatzmöglichkeiten in der Nicht-Eisenmetallindustrie und der Chemieindustrie zu berücksichtigen [64]. Hierbei wäre der Einsatz von Wasserstoff im Anodenofen der Kupferindustrie denkbar. Als prozessunspezifische Maßnahme könnte der Energieträgerwechsel von festen fossilen auf erneuerbare gasförmige Brennstoffe mitgedacht werden.

Durch den Vergleich des Referenzszenarios und des Mit-Maßnahmenszenario wird deutlich, welche Auswirkungen durch die Umsetzung von fünf Maßnahmen zum synthetischen Brennstoffeinsatz sowie zwei Maßnahmen zur CO₂-Abscheidung entstehen. Dabei findet die Maßnahmenumsetzung nur zum Teil in Abhängigkeit des Klimaschutzambitionsniveaus und unter Berücksichtigung weiterer THG-Verminderungsmaßnahmen statt. Demgemäß ist nicht ableitbar, ab welchem Klimaschutzambitionsniveau synthetische Brennstoffe tatsächlich in der Industrie eingesetzt werden. Die Analyse weiterer energie- und klimapolitischer Szenarien zeigt jedoch [2], dass aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse und CO₂-Budgets auch die letzten und teuersten Optionen wie der synthetische Brennstoffeinsatz zur THG-Verminderung in Betracht gezogen und erforscht werden müssen [78].

Literatur

- [1] Bundesregierung: Was sind die Kernpunkte/Ziele der Energiepolitik der Bundesregierung?. In: https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html (Abruf: 29.05.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6qonINWlp>). Berlin: Bundesregierung, 2017
- [2] Hübner, Tobias et al.: Die Rolle synthetischer Brennstoffe zur Erreichung der klimapolitischen Ziele - Bedeutung im Jahr 2050. In: BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft) - Das Energie-Fachmagazin 10/2018. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2018.
- [3] Köckhuber, Claudius; Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Die Grenzen der Elektrifizierung - Analyse und Bewertung von Green Fuels als Ergänzung zu Strom im dekarbonisierten Energiesystem in: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67. Jg. (2017) Heft 8. Essen: etv Energieverlag GmbH, 2017
- [4] Klein, Sebastian et al.: Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende. Berlin: enervis energy advisors GmbH, 2017.
- [5] Vorholz, Fritz et al.: Strombasierte Brennstoffe: Für den Klimaschutz so viel wie nötig, aus Effizienzgründen so wenig wie möglich. Berlin: Agora Verkehrswende, 2018.
- [6] Ruhнау, Oliver et al.: Direct or indirect electrification? A review of heat generation and road transport decarbonisation scenarios for Germany 2050. Energy, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.114>
- [7] Philibert, Cédric: Renewable Energy for Industry: From green energy to green materials and fuels. Paris: International Energy Agency, 2017.
- [8] Estermann, Thomas et al.: Kurzstudie Power-to-X - Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB. München: FfE, 2017.
- [9] Antoni, Oliver; Hilpert, Johannes; Kahles, Markus; Klobasa, Marian; Eßer, Anke: Gutachten zu zuschaltbaren Lasten - für das Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig- Holstein. Kiel: Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig- Holstein, 2016
- [10] Seidl, Hannes; Schenuit, Carolin; Teichmann, Mario: Roadmap Demand Side Management - Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2016
- [11] Graf, Mario: Kattowitz: Gutes Ergebnis und ein Problem für die Schweiz. In: <https://www.energate-messenger.ch/news/188335/kattowitz-gutes-ergebnis-und-ein-problem-fuer-die-schweiz>. (Abruf am 2018-12-18); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/74lQcmk63>); Essen: energate gmbh, 2018.

- [12] Die Bundesregierung: Klimaabkommen von Paris wird Gesetz in: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/07/2016-07-06-ratifizierung-pariser-klimaabkommen.html> (Abruf: 29.06.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rZrhjoQj>). Berlin: Die Bundesregierung, 2016
- [13] Schenuit, Carolin; Heuke, Reemt; Paschke, Jan: Potenzialatlas Power to Gas - Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016
- [14] Loftus, Peter et al.: A critical review of global decarbonization scenarios: what do they tell us about feasibility?. Woburn: Primaira LLC, 2015.
- [15] Fishedick, Manfred: Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change - Industry. New York, United Kingdom: Cambridge University, 2014.
- [16] Bataille, Christ et al.: A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. In: Journal of Cleaner Production 2018 (187) 960-973. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2018.
- [17] Emissionsquellen. In: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#textpart-1/>. (Abruf am 2018-12-18); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2018.
- [18] Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2015: <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.html>; Berlin: AG Energiebilanzen e.V., 2016 (überarbeitet: 2017).
- [19] Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.
- [20] Sterner, Michael; Thema, Martin; Eckert, Fabian; Lenck, Thorsten; Götz, Philipp: Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool. Berlin: Greenpeace Energy eG, 2015
- [21] Bazzanella, Alexis et al.: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2017.
- [22] Morgan, Eric R.: Techno-Economic Feasibility Study of Ammonia Plants Powered by Offshore Wind . Dissertation. Herausgegeben durch University of Massachusetts Amherst: Massachusetts, 2013.
- [23] Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie . Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
- [24] Fasihi, Mahdi et al.: Long-Term Hydrocarbon Trade Options for the Maghreb Region and Europe - Renewable Energy Based Synthetic Fuels for a Net Zero

- Emissions World. In: sustainability 2017/9. Basel: MDPI, 2017.
- [25] Gulagi, Ashish et al.: Can Australia Power the Energy-Hungry Asia with Renewable Energy?. In: sustainability 2017/9. Basel: MDPI, 2017.
- [26] Bründerlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin: dena, 2018.
- [27] Gebert, Philipp et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
- [28] Maier, Magnus: Die Rolle erneuerbarer Gase in der Energiewende. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e.V., 2018.
- [29] Hecking, Harald: Energiemarkt 2030 und 2050 - Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO₂-Minderung. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2017.
- [30] Ausfelder et al.: »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017.
- [31] Arnold, Karin et al.: Technologiebericht 4.3 Power-to-liquids/-chemicals innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2017.
- [32] Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015
- [33] Fishedick, Manfred et al.: Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. In: Journal of Cleaner Production 2014. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [34] van Kranenburg, Karin: Empowering the chemical industry - Opportunities for electrification. Delft: TNO Sustainable Chemical Industry, 2016.
- [35] McMillan, Colin et al.: Generation and Use of Thermal Energy in the U.S. Industrial Sector and Opportunities to Reduce its Carbon Emissions. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [36] Weigel, Max et al.: Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies. In: Journal of Cleaner Production 112(2016), 1064-1076. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [37] Lechtenböhmer, Stefan et al.: Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification e Implications for future EU electricity demand. In: Energy 2016, 1-9. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [38] Palm, Ellen et al.: Electricity-based plastics and their potential demand for electricity and carbon dioxide. In: Journal of Cleaner Production 129 (2016) 548-555. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [39] Denis-Ryan, Amandine et al.: Managing carbon-intensive materials in a decarbonizing world without a global price on carbon. In: Climate Policy 16/2016, 110-128. Didcot: Taylor & Francis, 2016.

- [40] Quader, M. Abdul et al.: A comprehensive review on energy efficient CO2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 50(2015), 594-614. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [41] Hasanbeigi, Ali et al.: Alternative emerging iron making technologies for energy-efficiency and carbondioxide emissions reduction: A technical review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 33(2014), 645-658. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [42] Morfeldt, Johannes et al.: The impact of climate targets on future steel production e an analysis based on a global energy system model. In: Journal of Cleaner Production 103(2015) 469-482. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [43] Åhman, Max et al.: Decarbonising industry in Sweden - an assessment of possibilities and policy needs. Lund: Lund University, 2012.
- [44] Hermann, Hauke; Emele, Lukas; Loreck, Charlotte: Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien. Berlin: Öko-Institut e.V., 2014
- [45] European Hydrogen Infrastructure Atlas - PART II: Industrial surplus hydrogen and markets and production. Brüssel: Roads2HyCom, 2007
- [46] Rohde, Clemens: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2015 mit Aktualisierung der Anwendungsbilanzen der Jahre 2009 bis 2012. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2016
- [47] BMWi: Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin: BMWi, 2018.
- [48] Unger, H.; Wagner, H.-J.; et al.: Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES - Abschlussbericht zum Vorhaben 258 114 98. Bochum: Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum (LEE), 2002
- [49] Guminski, Andrej et al.: Model based evaluation of industrial greenhouse gas abatement measures (in-review). Wien, Österreich: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2019.
- [50] Böing, Felix; Murmann, Alexander; Pellingner, Christoph: ISAaR - Integriertes Simulationsmodell zur Anlageneinsatz- und Ausbauplanung mit Regionalisierung in: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/modelle-und-tools/625-isaar-integriertes-simulationsmodell> (Abruf:12.09.2017) Archived by WebCite <http://www.webcitation.org/6tQ5Gxmi1>. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2016
- [51] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016
- [52] Bogner, Alexander; Littig, Beate; Menz, Wolfgang: Interviews mit Experten: Eine

- praxisorientierte Einführung. Wiesbaden: Springer VS, 2014
- [53] Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Transition Towards an “All-electric World” - Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 2017
- [54] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Industrielles Power-to-Heat Potenzial in: Vortrag bei der IEWT 2015 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2015
- [55] Weider, Eric: Telefonat - Brenner in der Zementindustrie; Interview, geführt von Rouyrre, Elsa; Taunusstein: Fives Pillard Deutschland GmbH, 2017
- [56] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2018.
- [57] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017
- [58] Klimaschutzszenario 2050 - 1. Modellierungsrunde. Freiburg, Berlin: Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2014
- [59] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018.
- [60] Otto, Alexander; Robinius, Martin; Grube, Thomas; Schiebahn, Sebastian; Praktiknjo, Aaron; Stolten, Detlef: Power-to-Steel - Reducing CO₂ through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry in: Energies (4), 2017, S. 451. Basel: MDPI, 2017
- [61] Wörtler, Martin; Schuler, Felix; Voigt, Nicole; Schmidt, Torben; Dahlmann, Peter; Lungen, Hans; Ghenda, Jean-Theo: Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 - Technical and economic analysis of the sector's CO₂ abatement potential. Boston: Steel Institute (VDEh), 2013
- [62] Kleinertz, Britta et al.: Kosteneffizienz von fossilen und erneuerbaren Gasen zur CO₂-Verminderung im Energiesystem. München, Karlsruhe: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2019.
- [63] Akthar, Syed Suhail et al.: From coal to natural gas: its impact on kiln production, clinker quality and emissions. Fort-Worth (Texas): Holcim Inc., 2013.
- [64] Günther, Jens et al.: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Berlin: Umweltbundesamt, 2017.
- [65] Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
- [66] Saygin, D. et al.: Modelling the future CO₂ abatement potentials of energy efficiency and CCS: The case of the Dutch industry. Utrecht: Copernicus Institute

of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University, 2013.

- [67] Kuramochi, Takeshi et al.: Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. Utrecht: Copernicus Institute, Faculty of Science, Utrecht University, 2012.
- [68] Fuhrmann, Heinz Jörg: SALCOS - Low Carbon Steel Making. In: <https://salcos.salzgitter-ag.com/>. (Abruf am 2019-01-31); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/75qLoBHRn>); Salzgitter: Salzgitter Aktiengesellschaft, 2019.
- [69] Kleinertz, Britta et al.: CO₂-Einsparpotenziale durch Einsatz strombasierter Grund-chemikalien in der stofflichen Nutzung. München, Karlsruhe: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2019.
- [70] Vercruyse, Edgar: Ammonia, a renewable fuel with zero CO₂ emissions. Louvain: Catholic University of Louvain, 2011.
- [71] Prognos AG: Die deutsche chemische Industrie 2030. Frankfurt am Main: Verband der chemischen Industrie e.V., 2016
- [72] Giulio, Milazzo: Elektrochemie - Grundlagen und Anwendungen. Basel: Springer Basel AG, 1983
- [73] Lück, Erich: Chemische Lebensmittelkonservierung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1977
- [74] Deutsch, Matthias et al.: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, 2018.
- [75] BDEW-Gaspreisanalyse Mai 2018 - Haushalte: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-gaspreisanalyse/>; Berlin: BDEW, 2018.
- [76] Monitoringbericht 2017 - Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2017.
- [77] Capros, P. et al.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. Brüssel: Europäische Kommission, 2016.
- [78] Vogt-Schilb, Adrien et al.: When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment. In: Journal of Environmental Economics and Management 88(2018), 210-233. Amsterdam: Elsevier, 2017.