MODELLIERUNG KOSTENEFFIZIENTER TRANSFORMATIONSPFADE DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Tobias Hübner[1,2,*], Serafin von Roon[1]

[1]Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), Am Blütenanger 71, 80995 München, www.ffegmbh.de

[2]Technische Universität München (TUM), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Arcisstraße 21, 80333 München, www.tum.de

[*]Korrespondierender Autor: thuebner@ffe.de, +49 (0) 89 158 121 36

Kurzfassung:

Die deutsche Industriewende nimmt nicht nur eine wichtige Rolle im prospektiv treibhausgasneutralen Deutschland ein, sondern dient auch als Vorbild für die Transitionsbestrebungen weiterer Industrienationen. Das Gelingen der deutschen industriellen Transformation beeinflusst somit den Erfolg internationaler Klimaambitionen. Die Erweiterung des Methodengerüsts im Sektormodell Industrie (SmInd) ermöglicht es konsistente und belastbare Analysen bestehender und prospektiver energiewirtschaftlicher Dimensionen des deutschen Industriesektors vorzunehmen. Konsistente, industrielle Referenz- und Technologiemixszenarien mit Zeithorizont bis 2050 validieren und plausibilisieren die entwickelten Methoden. Gleichzeitig bilden die Szenarien eine fundierte Basis um die technoökonomische Entwicklung des Industriesektors abzuleiten. Die Industrie erreicht in den Szenarien eine maximale CO_2-Verminderung von 88 % in 2050 ggü. 1990. Die direkten energiebedingten Emissionen reduziert das Zielszenario vollständig. In Abhängigkeit des Emissionsfaktors verbleiben Stromemissionen in Höhe von 7,5 Mio. tCO_2 und nur schwer zu vermindernde prozessbedingte Emissionen in Höhe von 35 Mio. tCO_2. Selbst im ambitionierten Zielszenario sind die kumulierten Emissionen zwischen 2020 und 2050 dennoch so hoch, dass sie das in [1] ermittelte, verbleibende deutsche CO_2-Budget zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,75°C zu mehr als 60 % aufbrauchen. Die modellgestützte Analyse des Industriesektors legt offen, dass selbst bei Umsetzung bis hin zu den letzten und teuersten CO_2-Verminderungsoptionen ein Kraftakt und weitere Technologieentwicklung erforderlich ist, um industrielle CO_2-Neutralität zu erreichen. Das Zielszenario ermittelt annuitätische, kumulierte Mehrkosten von 430 Mrd. $€_{2017}$ ggü. der Referenz.

Keywords: Industriewende, Modellierung, Industrielle Transformation, THG-Verminderung, Defossilisierung, Dekarbonisierung, Erneuerbare Brennstoffe, Synthetische Brennstoffe

1 Hintergrund und Motivation

Nach dem „International Panel on Climate Change“ (IPCC) sind die anthropogenen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bis 2030 um 45 % und bis 2050 um 100 % ggü. 2010 (~37 Mrd. $tCO_{2\text{-Äqui.}}$) zu reduzieren, um die Erderwärmung auf 1,5 °C gegenüber der

vorindustriellen Zeit zu begrenzen [2], [3]. Bis einschließlich 2018 hat sich das CO_2-Gesamtbudget zum Erreichen des 1,5 °C-Ziels (2 700 Mrd. $tCO_{2\text{-Äqui.}}$) durch die weltweiten THG-Emissionen bereits um etwa 2 250 Mrd. $tCO_{2\text{-Äqui.}}$ verringert [2], [3]. Die anthropogenen THG-Emissionen entsprechen derzeit etwa 42 Mrd.$tCO_{2\text{-Äqui.}}$ pro Jahr (Referenz: 2017) [2], [3]. Zwar beträgt der Anteil Deutschlands daran pro Jahr gegenwärtig nur etwa 2 % [4], historisch gesehen ist Deutschland jedoch für einen deutlich größeren Emissionsausstoß verantwortlich. Demgemäß ist der Anteil Deutschlands an den Gesamtemissionen zwischen 1970 und 2017 auch knapp doppelt so hoch (~ 4%) [4]. Gerade aufgrund der historisch hohen emittierten Treibhausgase trägt Deutschland als entwickelte Industrienation eine besondere Verantwortung für die zukünftige Verminderung. Der Industriesektor emittierte im Jahr 2017 etwa 193 Mio. $tCO_{2\text{-Äqui.}}$ und ist mit etwa 21 % somit nach der Bereitstellung (328 Mio. $tCO_{2\text{-Äqui.}}$, 38 %) der Sektor mit dem höchsten THG-Emissionsausstoß in Deutschland [5]. Im Gegensatz zum Bereitstellungssektor, indem mit Photovoltaik- und Windenergieanlagen bereits systemisch tragfähige Defossilisierungsoptionen zur Verfügung stehen, ist die THG-Neutralität in der heterogenen Industrie mit prozessspezifischen Maßnahmen verbunden.

Um die Auswirkungen verschiedener Technologieoptionen auf die THG-Emissionen unter der Berücksichtigung von Wechselwirkungen im Industriesektor zu ermitteln, werden Simulationsmodelle verwendet. Es existieren bereits zahlreiche Modelle, die Transformationspfade für die deutsche Industrie berechnen [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Die Simulationen zeigen Wege hin zu einer nahezu vollständigen THG-Verminderung auf und münden in energie- und klimapolitischen Szenarien [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]. Während der Bereitstellungssektor Transformationspfade kostenminimal auf der Basis von linearen Kostenfunktionen ableitet [22], [23], setzt die Industrieforschung meist auf Experteneinschätzungen und andere Priorisierungsinstrumente bei der Umsetzung von THG-Verminderungsmaßnahmen [6], [7], [8], [10], [11]. Aus makroökonomischer Perspektive steuert die Politik mikroökonomische Investitionsentscheidungen durch die Anpassung des regulatorischen Rahmens. Um aus übergeordneter Perspektive Entscheidungen in der Industriewende zu ermöglichen, wird das Sektormodell Industrie (SmInd) erweitert [6]. Die methodische Erweiterung schafft die Basis, um eine möglichst (kosten)effiziente Industriewende abzuleiten und Wechselwirkungen zwischen THG-Verminderungsmaßnahmen in die modellgestützte Entscheidungsgrundlage miteinfließen zu lassen.

2 Theoretische Grundlagen zum Sektormodell Industrie

Das Sektormodell Industrie (SmInd) führt diskrete energie- und emissionsdynamische Berechnungen mit Zeithorizont bis 2050 durch [24]. SmInd verfügt über mehrere Substrukturen, die die gesamte deutsche Industrie top-down in 14 Wirtschaftszweige (Branchen) nach [25] unterteilt. Eine Matrix kombiniert die Verbräuche der Wirtschaftszweige energieträger- und anwendungsscharf. Insgesamt unterscheidet das Modell zehn

Energieträger[1] sowie 13 Strom[2]- und sieben Brennstoffanwendungen[3] [26], [25], [27]. Der Energieverbrauch auf Wirtschaftszweigebene untergliedert sich weiterhin in Prozess- und Querschnittsverbräuche. Die Prozessverbräuche umfassen 25 ausgewählte energie- und emissionsintensive industrielle Produktionsverfahren[4], die über Aktivitätsgrößen abgebildet werden. Jährliche Produktionsmengen [28], [18] und spezifische Strom- sowie Brennstoffverbräuche bilden die Grundlage zur energetischen Modellierung der industriellen Produktionsverfahren (vgl. Literatur in Tabelle 8-7). Eingehende und ausgehende Materialen je Prozess ermöglichen weiterhin die Konstruktion von Massenbilanzen. Die Querschnittsverbräuche umfassen den Restverbrauch der Wirtschaftszweige abzüglich der Energieverbräuche bottom-up modellierter industrieller Produktionsverfahren. Die grundlegende Technologiemodellierung und weitere Funktionalitäten des Modells sind [24] zu entnehmen.

3 Methodik

Abbildung 3-1 zeigt einleitend die in fünf Bestandteile untergliederten Methoden. Um kosteneffiziente Transformationspfade in der deutschen Industrie abzuleiten, wird das Methodengerüst in SmInd basierend auf [24], [6] und [29] erweitert. Es ergeben sich weitere Optionen im Referenz- und Technologiemixmodul, die eine konsistente und detaillierte Abbildung und Analyse energiewirtschaftlicher Dimensionen des Industriesektors erlauben.

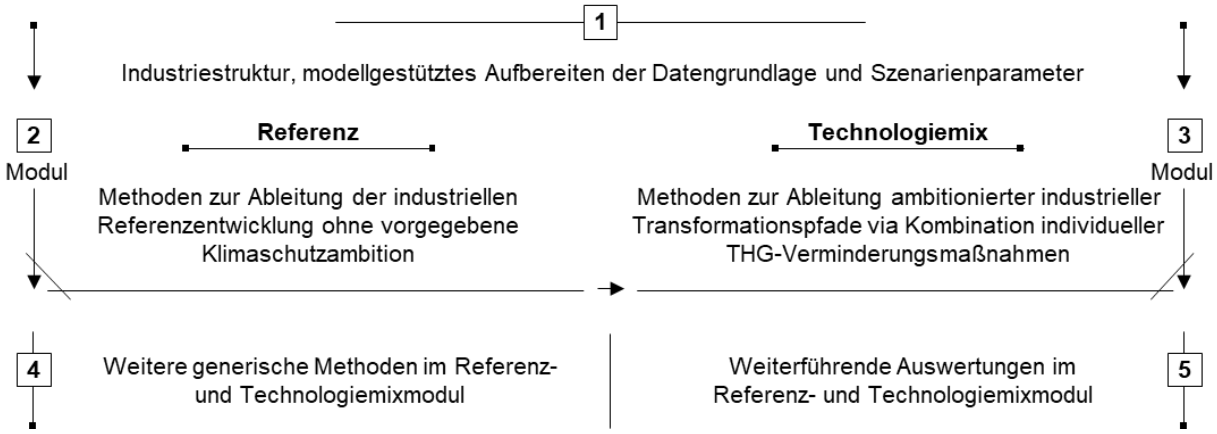

Abbildung 3-1: Überblick zur Methodenstruktur hinsichtlich der Industriemodellierung

Konsistente industrielle Transformationspfade zu entwickeln erfordert zunächst eine modellhafte Industriestruktur festzulegen und zu konstruieren (1). In diesem Kontext sind relevante exogene Daten zu identifizieren, recherchieren und modellgestützt aufzubereiten.

[1] Fossiles Öl, Fossile Gase, Fossile Kohlen, Biomasse, Sonstige Brennstoffe, Strom, Wasserstoff, synthetische gasförmige Kohlenwasserstoffe (synth. Gase), synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (synth. Öl), synthetische feste Kohlenwasserstoffe (synth. Kohlen)

[2] Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme kleiner 100 °C, Prozesswärme zwischen 100 °C und 500 °C, Prozesswärme zwischen 500 °C und 1000 °C, Prozesswärme über 1000 °C, Prozesskälte, Klimakälte, Druckluft, Pumpen, Informations- und Kommunikationstechnologie, sonstige mechanische Energie, Beleuchtung

[3] Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme kleiner 100 °C, Prozesswärme zwischen 100 °C und 500 °C, Prozesswärme zwischen 500 °C und 1000 °C, Prozesswärme über 1000 °C, mechanische Energie

[4] Produktionsprozesse: Altpapier, Ammoniak, Chlor, Elektroflachglas, Elektrohohlglas, Ethylen, Flachglas, H2-Stahl, Hohlglas, Innovative Bindemittel, Kalk, Klinker, Methanol, Milch, Papierherstellung, Polyethylen, Primäraluminium, Primärkupfer, Primärstahl, Sekundäraluminium, Sekundärkupfer, Sekundärstahl, Zellstoff, Zement, Ziegel

Methoden zur Ableitung der industriellen Referenzentwicklungen im Referenzmodul (2) bilden die Grundlage für das nachfolgende Technologiemixmodul (3). Das Technologiemixmodul kombiniert zusätzliche individuelle THG-Verminderungsmaßnahmen und -technologien, um im Vergleich zur Referenz Transformationspfade mit höherem Klimaschutzambitionsniveau abzuleiten. Die Beschreibung modulübergreifender generische Methoden im Referenz- und Technologiemixmodul schärft das Verständnis homogener industrieller Modellierung in SmInd (4). Weiterführende Auswertungen im Referenz- und Technologiemixmodul (5) dienen der Ableitung konsistenter teiloptimierter industrieller Transformationspfade. Die entwickelten Methoden werden durch konsistente, industrielle Referenz- und Technologiemixszenarien mit Zeithorizont bis 2050 validiert und plausibilisiert. Weiterführende Methoden und Auswertungsoptionen im Referenz- und Technologiemixmodul wie z.B. der Vergleich beispielhaft ausgewiesener Simulationsergebnisse mit vorhandenen Industrieszenarien beschließen die Publikation.

4 Beschreibung der Eingangsdaten und Szenarien

Einleitend zeigt Tabelle 4-1 die Kernparameter des konstruierten Szenarios im Technologiemixmodul. Zugehörige literarische Verweise enthalten die Tabellen im Anhang.

Tabelle 4-1: Szenarienüberblick, detaillierte Quellenangaben im Anhang

	Referenzmodul	**Technologiemixmodul**
Szenarienperspektive	Makroökonomisch	
Betrachtungszeitraum	2015 bis 2050	
Turnus	Stündliche Energieträgerkosten, Emissionsfaktoren und Lastprofile, Modellrechnungen jährlich	
Brennstoffbedingte Emissionsverminderung ggü. 2015	Keine Vorgabe zur Emissionsverminderung	Direkte energiebedingte Emissionen: 2030: 50 % 2040: 80 % 2050: 95 % Restemissionen: explorativer Ansatz über natürliche Austauschraten
Szenarienentwicklung	Strom- und Brennstoffintensitäten und Bruttowertschöpfung sowie Produktionsmengen und spezifische Energieverbräuche	Basiert auf Referenzmodul
		Individuale Umsetzung von zusätzlichen THG-Verminderungsmaßnahmen zwischen 2021 und 2050
	Keine Einzelmaßnahmen-umsetzung	Optimierung und Priorisierung der Maßnahmen nach THG-Verminderungskosten
	Heuristische Algorithmen und Methoden	Natürliche Diffusion der Technologien: Austausch am (bilanziellen) Lebensende
Lernkurven	Keine Lernkurven, da keine Einzelmaßnahmenumsetzung	Lernkurven in Abhängigkeit der Technologiediffusion. Mit höherer Technologiediffusion sinken die Kosten für Investitionen
Energieträgerkosten	Steigende Stromkosten, durchgängig niedrige Wasserstoffkosten (Dampfreformierung), vgl. Tabelle 8-3	
Energieemissionsfaktoren	Stromemissionsfaktor moderat (160 g/kWh) Biomasse und synthetische Gase mit Nullemissionen, vgl. Tabelle 8-4	
Prozessemissionsfaktoren	Zeit- und szenarienunabhängig, vgl. Tabelle 8-6	
Volkswirtschaftlicher Zins	Kein Zins notwendig, da keine Einzelmaßnahmenumsetzung	3.5 %
Volkswirtschaftliche CO_2-Kosten	Keine CO_2-Kosten notwendig, da keine Einzelmaßnahmenumsetzung	2015: 7.61 €/tCO_2 (realer Durchschnittswert EU-ETS)
		2030: 34.70 €/tCO_2
		2050: 100 €/tCO_2
CO_2-Abscheidung	Nein	Ja
Biomasse	Kaum Anstieg in der Industrie	Starker Anstieg in der Industrie
Produktionsmengen	Exogen aus [28], [18]	Endogene Berechnung auf Basis des Referenzmoduls im Technologiemixmodul

4.1 Referenzszenario

Die Referenzszenarien des Referenzmoduls setzen keine individuellen THG-Verminderungsmaßnahmen- und technologien um. Stattdessen wird der recherchierte Anwendungs- und Umsetzungsgrad individueller Maßnahmen „eingefroren“. Den Technologiebestand schreibt das Referenzmodul zwar fort, die Veränderung übt jedoch keinen Einfluss auf Energieverbrauch und Emissionen aus. Die Referenzszenarien streben demgemäß nicht nach vorgegebenem Klimaschutz, sondern verfolgen einen generischen Ansatz. Die Referenz dient als Vergleichsgrundlage für die Technologiemixszenarien und beschreibt das Narrativ einer Zukunft ohne besondere Klimaschutzambition und damit verbundene Anstrengungen. Das Narrativ der allgemeinen industriellen Entwicklung in der Referenz ist von ökomischen Interessen getrieben und misst Nachhaltigkeit keine besondere Bedeutung bei. Tabelle 4-1 beinhaltet die gewählten Rahmendaten und -methoden des in dieser Publikation berechneten Referenzszenarios.

4.2 Technologiemixszenario

Die Technologiemixszenarien des Technologiemixmoduls setzen über das Referenzszenario hinausgehend individuelle THG-Verminderungsmaßnahmen- und technologien um. Tabelle 4-1 beinhaltet die gewählten Rahmendaten und -methoden des in dieser Publikation berechneten Technologiemixszenarios (TM-Szenario). Das TM-Szenario strebt nach einem Klimaschutzambitionsniveau, indem ein CO_2-Verminderungsziel vorgegeben wird. Das Narrativ des TM-Szenarios beschreibt eine industrielle Entwicklung, in der ökonomische Interessen und Nachhaltigkeitsziele als gleichberechtige Ziele fungieren. Die dafür notwendigen Maßnahmen und relevanten Schlüsseltechnologien des TM-Szenarios beschreibt der folgende Abschnitt.

Schlüsseltechnologien mit hohem THG-Verminderungspotenzial befinden sich teilweise noch in einem Stadium, indem die industrielle Nutzung nicht möglich ist. Demgemäß sind Verfügbarkeiten von Technologien zu recherchieren, die aus heutiger Sicht noch nicht für die industrielle Nutzung bereitstehen. Bei Maßnahmen mit geringerem individuellen Wirkungseffekt hinterlegt das Modell eine generische Verfügbarkeit je Maßnahmenkategorie. Bei den unter den Maßnahmenkategorien (1), (3), (6), (9) und (10)[5] subsumierten Technologien wird davon ausgegangen, dass sie aus heutiger Sicht bereits im industriellen Maßstab zur Verfügung stehen. Die erste zusätzliche Maßnahmenumsetzung ist im Technologiemixszenario demgemäß ab dem Jahr 2021 möglich (vgl. Tabelle 4-2).

[5] Prozessebene: Energieeffizienz (1), Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Elektrifizierung (3), Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Brennstoffe (6)

Querschnittsebene: Energieeffizienz (9), Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Elektrifizierung (10)

Tabelle 4-2: Im Technologiemixmodul verwendete Einzelmaßnahmen und der dazugehörige Diffusionsstart je Maßnahmenkategorie

Kategorie	Prozessmaßnahmen						Querschnittsmaßnahmen		
Maßnahmen-kategorie*	EE-P	VRW	EWT-S-P	EWoT-P	CC	EWT-B-P	EE-Q	EWT-S-Q	EWoT-Q
Anzahl Einzel-maßnahmen	69	7	48	25	6	2	38	8	14
Zusätzliche Diffusion ab	2021	Tabelle 4-3	2021	2021	Tabelle 4-3	2021	2021	2021	2021

*EE-P: Energieeffizienz Prozesse; VRW: Verfahrensroutenwechsel; EWT-S-P: Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel – Elektrifizierung auf Prozessebene; EWoT-P: Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel Prozesse; CC: CO_2-Abscheidung; EWT-B-P: Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel – Brennstoffe auf Prozessebene; EE-Q: Energieeffizienz Querschnitt; EWT-S-Q: Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel – Elektrifizierung auf Querschnittsebene; EWoT-Q: Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel Querschnitt

Tabelle 4-3 enthält die jeweilig recherchierte Verfügbarkeit relevanter Schlüsseltechnologien des TM-Szenarios.

Tabelle 4-3: Technologische Verfügbarkeit im industriellen Maßstab von im Modell hinterlegten THG-Verminderungsmaßnahmen mit hohem Wirkungspotenzial

Technologie	Maßnahmen-kategorie*	Verfügbarkeit	Literatur
Vollelektrische Schmelzwanne zur Flach- und Hohlglasproduktion	VRW	2025	[30]
Primärstahlproduktion mittels direktreduziertem Eisen mit Wasserstoff als Reduktionsmittel und anschließendem elektrischen Schmelzen im Elektrolichtbogenofen	VRW	2025	[14]
Verstärkte Sekundärstahlproduktion im Vergleich zum Referenzmodul in Abhängigkeit der Schrottverfügbarkeit	VRW	2021	Annahme, bewährte Technologie, bereits verfügbar
Verstärkte Sekundäraluminiumproduktion im Vergleich zum Referenzmodul in Abhängigkeit der Schrottverfügbarkeit	VRW	2021	Annahme, bewährte Technologie, bereits verfügbar
Verstärkte Sekundärkupferproduktion im Vergleich zum Referenzmodul in Abhängigkeit der Schrottverfügbarkeit	VRW	2040	Relativ spät, da Energie- und Emissionsreduktion nur im globalen Kontext
Produktion innovativer Bindemittel als Zementsubstitut	VRW	2035	[31], [32], [33]
CO_2-Abscheidung in der Zementindustrie	CC	2030	[34]
CO_2-Abscheidung in der Hochofenstahlerzeugung	CC	2025	[14]
CO_2-Abscheidung in der Kalkindustrie	CC	2030	[18]
CO_2-Abscheidung in der Methanolproduktion	CC	2030	[18]
CO_2-Abscheidung in der Primärkupferherstellung	CC	2030	Expertenschätzung und [18]
CO_2-Abscheidung in der Sekundärkupferproduktion	CC	2030	Expertenschätzung und [18]

*VRW: Verfahrensroutenwechsel; CC: CO_2-Abscheidung

5 Ergebnisse und Diskussion

Der nachfolgende Abschnitt enthält je ein konsistentes, industrielles Referenz- und Technologiemixszenario mit Zeithorizont bis 2050, das auf den entwickelten Methoden basiert.

Entwicklung des Energieverbrauchs

Die energieträgerscharfe Verbrauchsentwicklung der deutschen Industrie im Referenz- und TM-Szenario zeigt einleitend Abbildung 5-1.

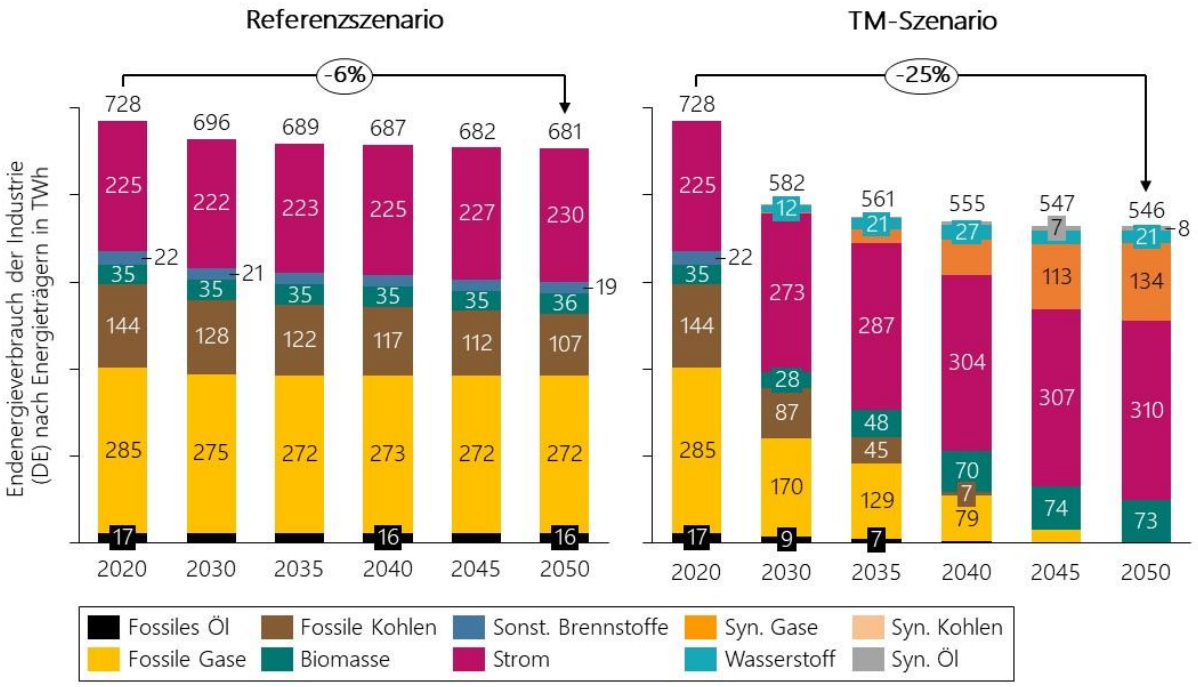

Abbildung 5-1: Energieträgerscharfe Verbrauchsentwicklung der deutschen Industrie im Referenz- und TM-Szenario

Generische Effizienzgewinne der exogenen Energieintensitäten senken den Gesamtenergieverbrauch im Referenzszenario. Die leichte Verschiebung der industriellen Energieträgeranteile im Referenzszenario ist hauptsächlich auf die zunehmende Elektrifizierung des Brennstoffverbrauchs zurückzuführen. Während der Brennstoffverbrauch um knapp 11 % bis 2050 sinkt, nimmt der Stromverbrauch zwischen 2020 und 2050 um über 2 % zu. Infolgedessen steigt der Stromanteil am Endenergieverbrauch in der Referenz von knapp 31 % auf knapp 34% bis 2050. Reziprok sinkt der Brennstoffanteil am Energieverbrauch. Neben dem Strom- nimmt auch der Biomasseverbrauch im Referenzszenario leicht zu. Dafür verantwortlich zeigen sich prozessspezifische Effekte wie sie durch unterschiedliche Energieträgeraufteilungen in Verbindung mit Produktionsmengenänderungen entstehen. Beispielsweise sinkt die Produktionsmenge der hochofenbasierten Stahlerzeugung in der Referenz und reduziert den Gas- und Kohlenverbrauch im Vergleich zur gesamten industriellen Energieentwicklung überproportional. Der Einsatz von Mineralöl und sonstigen Brennstoffen in der Industrie bleibt hingegen nahezu konstant. Wasserstoff und weitere synthetische Brennstoffe werden energetisch in der Referenz nicht eingesetzt. Nicht-energetische Verbräuche klammert das Modell aus. Im Vergleich zur Referenz verringert sich der Energieverbrauch im TM-Szenario deutlich stärker. Individuelle Effizienzmaßnahmen und die Niedertemperaturelektrifizierung

senken den Energieverbrauch im ersten Viertel des Betrachtungszeitraums (2020 - 2030). Infolgedessen nimmt der Brennstoffverbrauch bis 2050 um mehr als die Hälfte ab (~270 TWh). Trotz hoher Effizienzgewinne bei elektrischen Anwendungen steigt der Stromverbrauch zwischen 2020 und 2050 um etwa 85 TWh im TM-Szenario. Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie, die elektrobasierte Flach- und Hohlglasherstellung sowie die Elektrifizierung der Niedertemperaturwärme bedingen den starken Anstieg.

Infolge der ab 2030 hinterlegten CO_2-Zielstellung setzt das Szenario zunehmend synthetische Brennstoffe ein. Der in Abhängigkeit industrieller Brennertechnologien kostenoptimierte Brennstoffmix greift ab 2030 zunehmend auf synthetische Gase und Öl sowie Biomasse zurück. Hochpreisige synthetische Kohlen, wie sie in der Methanpyrolyse entstehen [35], [36], setzt das Modell lediglich in der Übergangsphase zwischen 2030 und 2040 in geringem Maß ein. Anschließend stehen vermehrt günstigere Optionen zur Verfügung, da die jahresspezifisch verfügbare Biomasse für die industrielle Nutzung in Abhängigkeit der exogen hinterlegten Biomasserestriktion steigt.

Da die Industrie bisher kaum über Wasserstoffbrenner in der Industrie verfügt und das Modell nur wenige zubaut, ist der Wasserstoffeinsatz ohne Technologiewechsel fast ausschließlich in Multi-Fuelbrennern der Zement- und Kalkindustrie möglich. Selbst die Zement- und Kalkprozesse verwenden jedoch kaum Wasserstoff, da aus kostenoptimaler Sicht mit Biomasse ein weitaus günstigerer klimaneutraler Energieträger zur Verfügung steht. Die energieträgerscharfen Prozessverbräuche in Abbildung 5-2 für 2030 und 2050 belegen die verstärkte Biomassenutzung in der Zement- und Kalkindustrie.

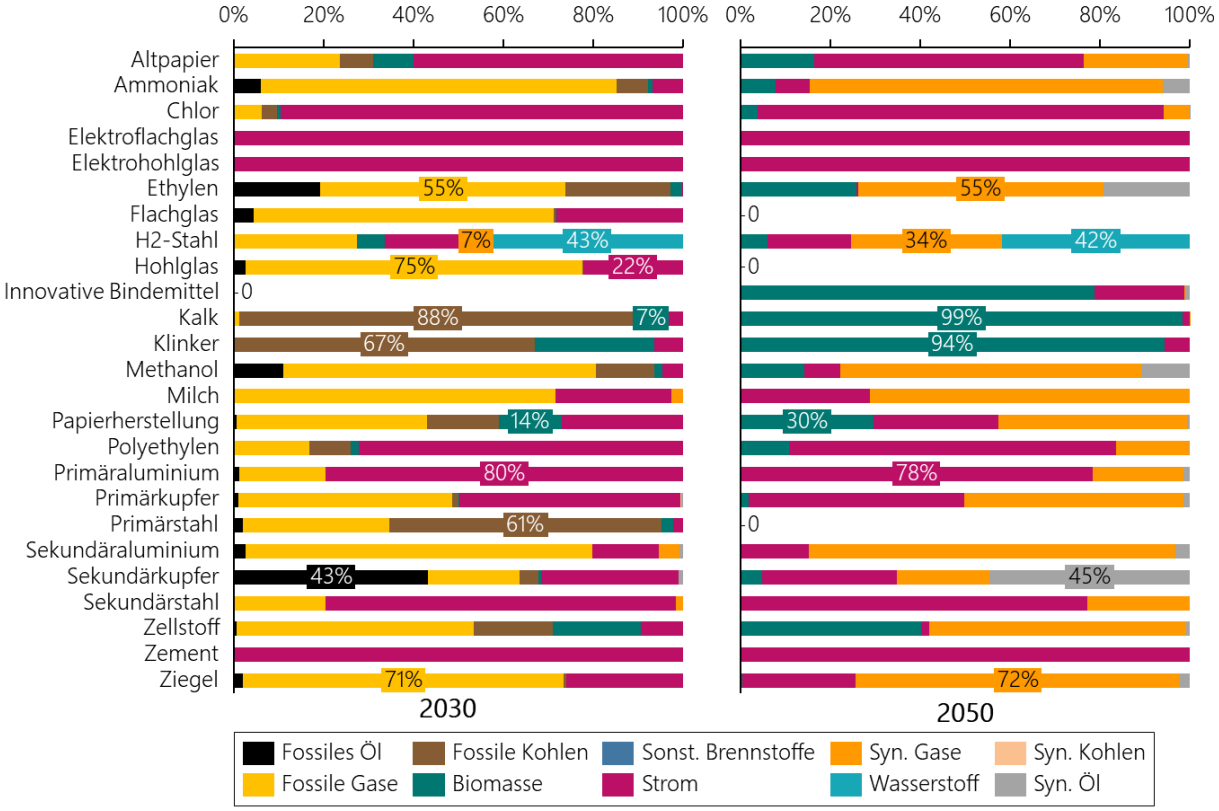

Abbildung 5-2: Optimierter Energieträgermix auf Prozessebene im Technologiemixszenario der Stützjahre 2030 und 2050 im Vergleich

Zwar steigt die industrielle Biomasse zwischen 2020 und 2050 um 38 TWh, den hinterlegten maximalen Grenzwert in Höhe von 120 TWh in 2050 erreicht das Technologiemixszenario jedoch nicht. Der im Szenario eingesetzte Wasserstoff entsteht hauptsächlich durch den Verfahrensroutenwechsel von Hochofen- auf H2-Stahl.

Fossile Brennstoffe verwendet das Technologiemixszenario aufgrund der CO2 Verminderungsziele und des volkswirtschaftlichen CO2 Preises in Höhe von 100 €/tCO2 in 2050 nicht mehr. Im Zeitverlauf werden zunächst fossile Kohlen, anschließend fossile Gase vollständig substituiert.

Abbildung 5-3 visualisiert den im TM-Szenario zwischen den Stützjahren wirkenden energieträgerscharfen Referenz- und Maßnahmeneffekt.

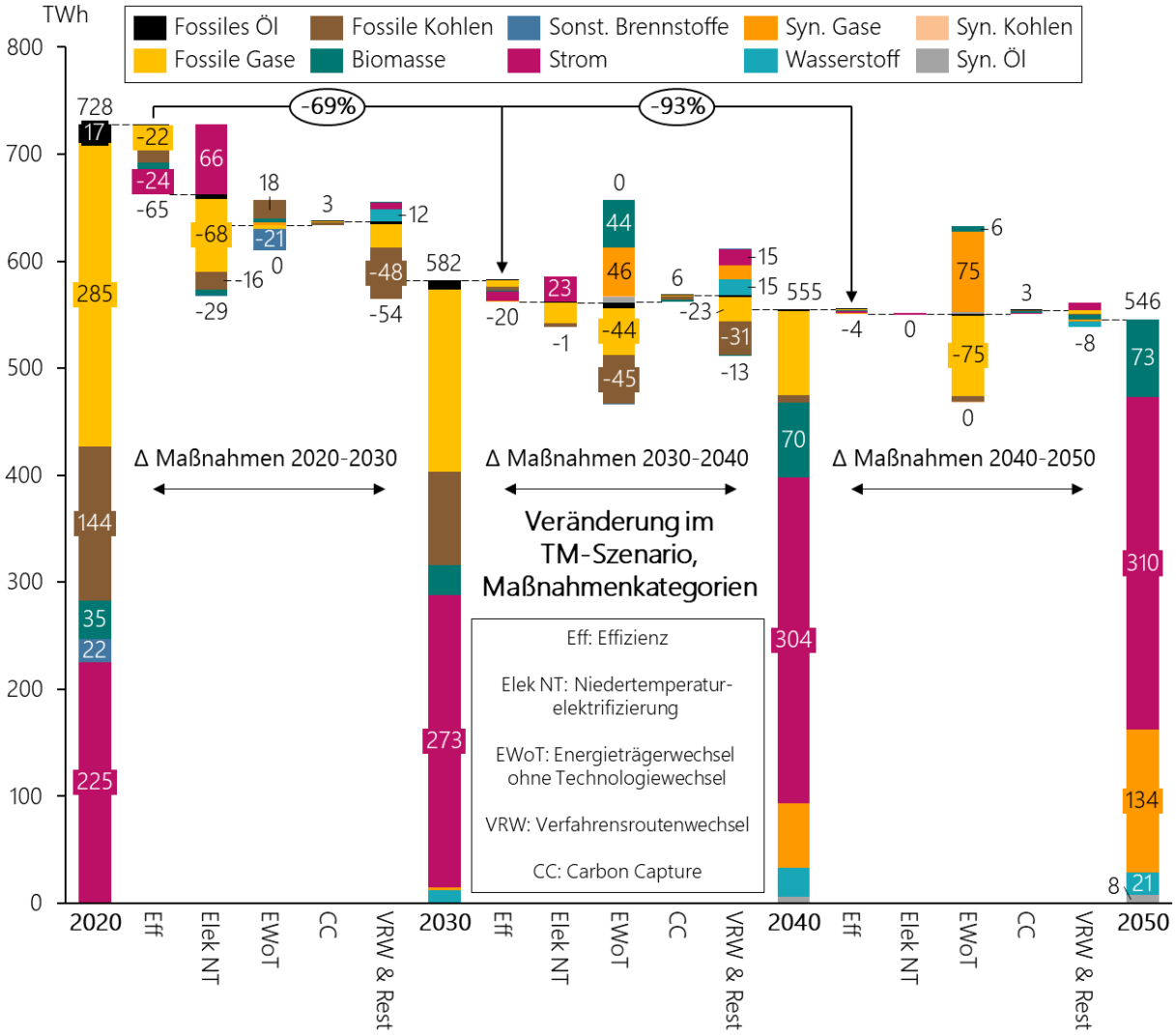

Abbildung 5-3: Energetische Maßnahmeneffekte im Zeitverlauf in Abhängigkeit von Maßnahmenclustern

Effizienzgewinne infolge effizienter Prozess- und Querschnittstechnologien (Eff) verbucht das TM-Szenarios im Wesentlichen in der ersten Dekade des Betrachtungszeitraums (65 TWh, 2020-2030). Effizienzpotenziale sind in den weiteren Perioden erschöpft oder es greifen spezifische energetische Grenzwerte, die eine weitere Senkung des Prozess- und Querschnittsverbrauchs einschränken. Das Modellergebnis erfordert in der industriellen Realwirtschaft eine konsequente Umsetzung von Effizienztechnologien zwischen 2020 und

2030. Auf Technologielebensdauern und natürlichen Reinvestitionszyklen basierend ist das Ergebnis aus Modellsicht jedoch denkbar.

Weitere Effizienzgewinne erzielt das TM-Szenario durch die Elektrifizierung der Raumwärme, des Brauchwarmwassers und der Prozesswärme kleiner 100°C (Elek-NT) mit Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel. Die Niedertemperaturelektrifizierung erhöht den Stromverbrauch zwar um etwa 60 TWh, reduziert den Brennstoffverbrauch im Gegenzug jedoch auch um knapp 95 TWh (Effizienzgewinn: ~35%). Ab 2040 ist die industrielle Wärme im niederen Temperaturbereich nahezu vollständig elektrifiziert.

Da das Szenario bis 2030 keiner CO_2-Zielsetzung unterworfen ist, substituiert der optimierte Brennstoffverbrauch (EWoT) zu Beginn überwiegend sonstige Brennstoffe und ersetzt diese durch Kohlen und Biomasse. Kohlen weisen im Vergleich deutlich geringere Kosten auf und erfordern im Modell keinen Technologiewechsel, um sonstige Brennstoffe zu ersetzen. Die Energiebilanz der Optimierung ist stets ausgeglichen. Damit belegt Abbildung 5-3 die energetische Validität der Optimierung. Die Energiebilanz je Maßnahmencluster resultiert aus den summierten positiven und negativen Maßnahmeneffekten im Betrachtungszeitraum. Die Summe über alle Maßnahmen der Kategorie „EWoT“ ist stets Null. Die Bedeutung der Brennstoffoptimierung steigt insbesondere in den Dekaden zwischen 2030 und 2040. Einerseits nimmt der Energieumsatz des Maßnahmenclusters sichtlich zu. Anderseits ersetzt die Brennstoffoptimierung in Abhängigkeit der CO_2-Zielsetzung vermehrt fossile Kohlen, Gase und Öl durch erneuerbare Brennstoffe. Um das hohe Klimaschutzambitionsniveau zwischen 2040 und 2050 zu erreichen, setzt das Modell als eine der letzten Optionen verstärkt synthetische Gase ein.

Die CO_2-Abscheidung nimmt aus energetischer Sicht eine untergeordnete Rolle ein und erhöht den Strom- und Brennstoffverbrauch nur geringfügig (~12 TWh zwischen 2020 und 2050). Die Verfahrensroutenwechsel, die weiteren Maßnahmen und der Referenzeffekt senken den Energieverbrauch teils deutlich (VRW & Rest). Als klimarelevant erweist sich vornehmlich der verminderte Kohleverbrauch infolge des Verfahrensroutenwechsels von Hochofen- auf H_2- und Sekundärstahl. Die Verfahrensrouten Elektroflach- und –hohlglas, H_2-Stahl und Sekundärstahl erhöhen den Stromverbrauch erheblich (z.B. kumuliert 15 TWh zwischen 2030 und 2040). Innovative Bindemittel ersetzen Zemente zunehmend. Der Energieverbrauch und die Emissionen sinken.

Entwicklung der energie- und prozessbedingten Emissionen

Abbildung 5-4 enthält die prospektiven energie- und prozessbedingten Emissionen der deutschen Industrie im Referenz- und TM-Szenario. Die linken Balken der Abbildung inkludieren, die rechten Balken je Stützjahr exkludieren die Stromemissionen. Die direkten Brennstoffemissionen synthetischer kohlenstoffhaltiger Brennstoffe bilanziert das Modell aufgrund des angenommenen erneuerbaren Kohlenstoffkreislaufs mit Null.

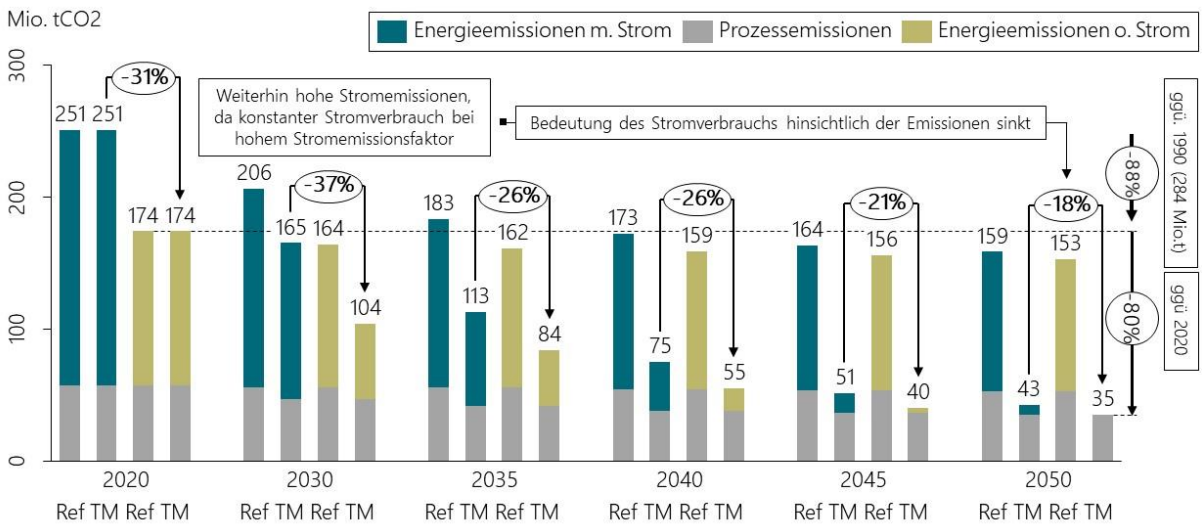

Abbildung 5-4: Energie- und prozessbedingte Emissionen in der Industrie im zeitlichen Verlauf

In 2050 emittiert der Industriesektor im TM-Szenario keine direkten energiebedingten Emissionen mehr. Nur schwer zu vermindernde direkte prozessbedingte Emissionen in Höhe von 35 Mio. tCO_2 verbleiben jedoch in 2050. Die CO_2-Abscheidung bildet eine Option zur Verminderung prozessbedingter industrieller Emissionen im Modell. Eine weitere ergibt sich durch Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie. Ohne die Bilanzierung der Stromemissionen erreicht der industrielle Transformationspfad des TM-Szenarios eine CO_2-Verminderung von 88 % in 2050 ggü. 1990 (80% in 2050 ggü. 2020). Aufgrund der hohen Maßnahmenumsetzung erzielt das TM-Szenario zwischen 2020 und 2030 eine erhebliche Emissionsminderung. Die direkten Emissionen des Referenzszenarios sinken ebenfalls um 21 Mio. tCO_2.

Werden die Stromemissionen mitbilanziert, erzielen Referenz- und TM-Szenario wesentliche Erfolge bei der Emissionssenkung durch die Verminderung des Stromemissionsfaktors in der Bereitstellung. So sinken die absoluten Stromemissionen aufgrund des in den ersten Jahren weiterhin hohen Stromemissionsfaktors (2025: ~300 gCO_2/kWh) und dem nahezu gleichbleibenden Stromverbrauch zwischen 2020 und 2030 deutlich weniger stark als die Brennstoffemissionen im gleichen Zeitraum. Mit weiter sinkendem Stromemissionsfaktor nimmt auch die Bedeutung des Stromverbrauchs hinsichtlich des Emissionsausstoßes ab. In 2050 übersteigt die Summe aus direkten und indirekten Energieemissionen die direkten energiebedingten Emissionen um lediglich 18 %. In 2030 ist Differenz noch mehr als doppelt so hoch.

Die kumulierten Emissionspfade der Referenz und des TM-Szenarios zwischen 2015 und 2050 visualisiert Abbildung 5-5. Die frühzeitige Maßnahmenumsetzung im TM-Szenario bewirkt deutlich niedrigere kumulierte Gesamtemissionen ggü. der Referenz. Im Vergleich zur Referenz emittiert das TM-Szenario zwischen 2015 und 2050 lediglich 5,2 statt 7,1 $GtCO_2$. Das in [1] ermittelte, verbleibende deutsche CO_2-Budget zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,75°C in Höhe von 6,5 Gt ab 2020 verbraucht sich selbst im ambitionierten Technologiemixszenario alleine durch die industriellen Emissionen zu mehr als 60 % bis 2050.

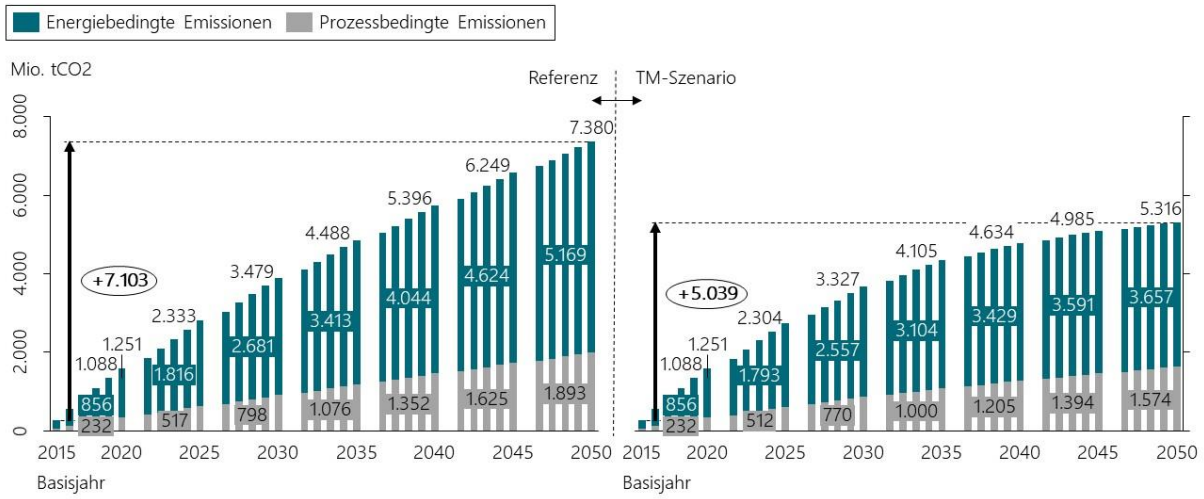

Abbildung 5-5: Kumulierte Emissionen des industriellen Referenz- und Technologiemixszenarios mit Stromemissionen im Zeitverlauf, Basisjahr 2015

Ökonomische Kennwerte

Die annuitätischen und kumulierten Mehrkosten des TM-Szenario ggü. der Referenz und die spezifischen Energieträgerkosten zwischen 2020 und 2050 zeigt Abbildung 5-6.

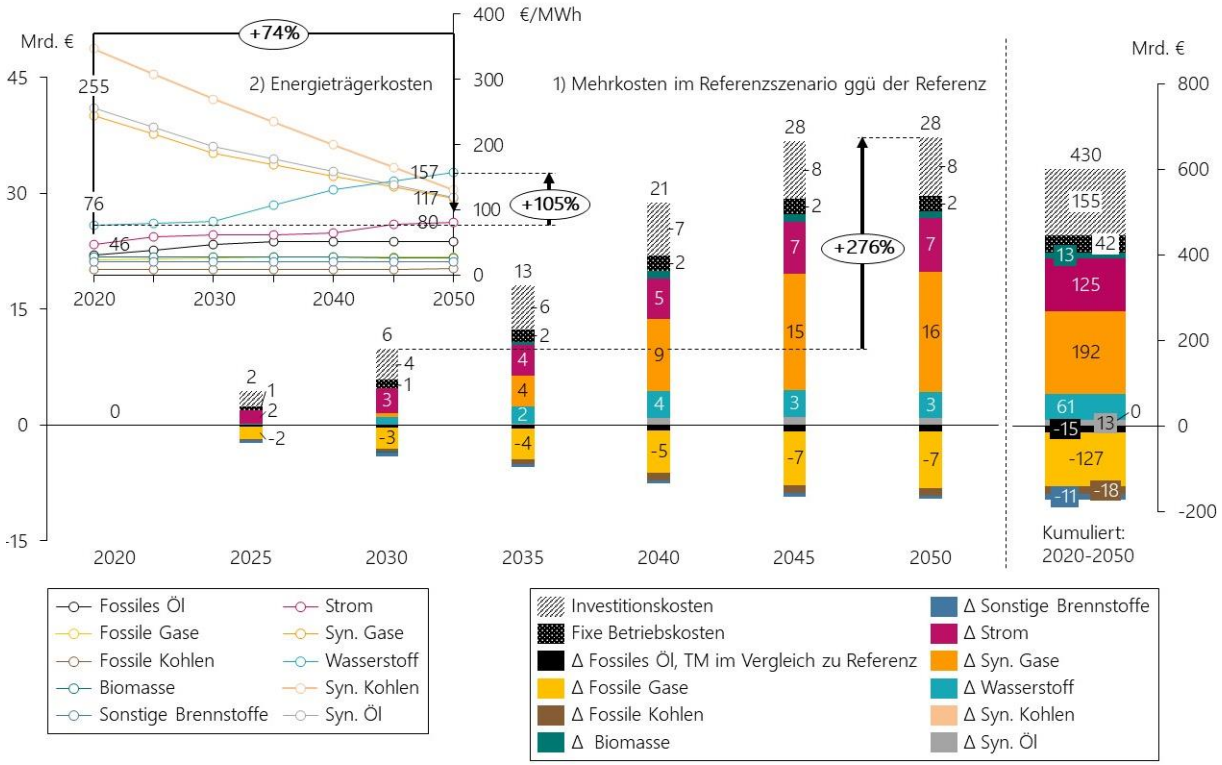

Abbildung 5-6: Annuitätische und kumulierte Mehrkosten im TM-Szenario ggü. der Referenz in Mrd. €$_{2017}$, 1) Energieträger- und Technologiekosten sowie 2) spezifische Energieträgerkosten (€/MWh)

Die wichtigsten ökonomischen Kennwerte fokussieren sich mit Ausnahme der spezifischen Energieträgerkosten auf das Technologiemixszenario. Für die Referenz können keine Technologiebestandskosten ausgewiesen werden. Aus Abbildung 5-6 geht hervor, dass die Energieträgerkosten des TM-Szenarios im Vergleich zur Referenz deutlich ansteigen. Kumuliert ergeben sich zwischen 2020 und 2050 Mehrenergiekosten in Höhe von

234 Mrd. €$_{2017}$ Teure erneuerbare Brennstoffe und elektrische Energie erhöhen die Energieträgerkosten im Vergleich zur Referenz.

Verglichen mit den Energieträgerkosten fallen die kumulierten zusätzlichen Technologiekosten in Höhe von 197 Mrd. € geringer aus. Reinvestitionen, die zusätzliche individuelle Maßnahmen im Technologiemixmodul im Betrachtungszeitraum erfordern, inkludiert das Szenario. [16] geht zwischen 2015 und 2050 von zusätzlichen industriellen Investitionen zwischen 123 und 236 Mrd. €$_{2017}$[6] aus und ermittelt damit ähnliche kumulierte Technologiekosten im Zeitraum. Das TM-Szenario verbucht jedoch auch nach 2050 noch bilanziellen Aufwand, der sich durch die Annualisierung der Kosten ergibt. Im Gegensatz zum TM-Szenario ist die Energiekostendifferenz zwischen den Zielszenarien und der Referenz in [16] negativ. Die Zielszenarien in [16] weisen folglich niedrigere Energiekosten als die Referenz aus. Statt auf kostspielige synthetische Brennstoffe setzen die Zielszenarien in [16] vermehrt auf die Abscheidung von CO_2, um das vorgegebene Klimaschutzambitionsniveau zu erreichen. Neben den absoluten visualisiert Abbildung 5-6 die spezifischen Energieträgerkosten, die im Referenz- und Technologiemixmodul gleich bleiben und dem Modell exogen vorgegeben werden. Während die Energieträgerkosten synthetischer Kohlenwasserstoffe aufgrund des zunehmenden Imports aus Ländern mit besseren Erzeugungsbedingungen deutlich sinken, steigen die Kosten inländischer und im europäischen Wirtschaftsraum erzeugter erneuerbarer Energieträger wie Wasserstoff und Strom. Da Wasserstoff zunächst über die Dampfreformierung und erst mit ambitionierteren CO_2-Verminderungszielen durch die Elektrolyse bereitgestellt wird [37], steigen die makroökonomischen Wasserstoffkosten im Szenario im Zeitverlauf [37].

Produktionsmenge mit Fokus auf Massenbilanzen

Da diese Publikation insbesondere erweiterte Methoden zur Modellierung industrieller Massenbilanzen aufzeigt, liegt das Hauptaugenmerk in der Analyse weniger auf dem prospektiven Verlauf von Produktionsmengen, als mehr auf der modellierten Verknüpfung industrieller Wertschöpfung. Die sich im Referenz- und TM-Szenario ergebende Produktionsmenge weist Tabelle 8-11 im Anhang aus. Abbildung 5-7 veranschaulicht die modellhafte Verknüpfung der Stahl- mit der Zementindustrie über den Stoff „Hüttensand“.

[6] In /BCG-01 18/ werden 120-230 Mrd. €$_{2015}$ an kumulierten technologischen Mehrkosten in der Industrie ausgewiesen. Durch den Verbraucherpreisindex mit Basis 2017 (0,978) dividiert.

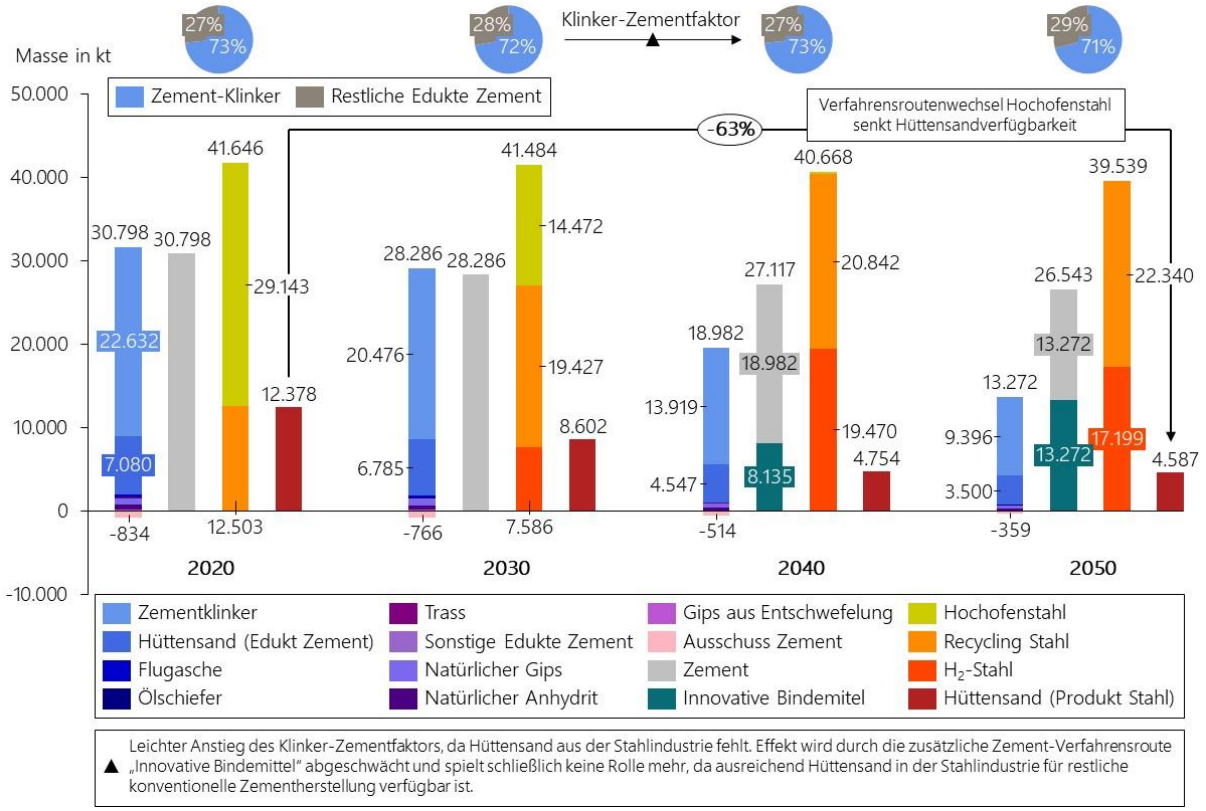

Abbildung 5-7: Verknüpfte Wertschöpfungsketten im Sektormodell Industrie am Beispiel der Stahl- und Zementindustrie, gekoppelt über Hüttensand

Abbildung 5-7 zeigt Zusammenhänge infolge stofflichen Güteraustauschs zwischen der Zementproduktion (grau) sowie deren Edukte (blau und lila) und der Stahlherstellung. So sinken aufgrund der Verfahrenswechsel von Hochofen- auf Sekundär- und H_2-Stahl die verfügbaren Hüttensandmengen. Flugasche und Gips aus der Entschwefelung stehen aufgrund des Kohleausstiegs im Bereitstellungssektor ebenfalls nicht mehr im bisherigen Umfang für die Zementproduktion zur Verfügung. Zwischen 2030 und 2040 entsteht deshalb eine Minderverfügbarkeit bisheriger Edukten in der Zementindustrie. Den fehlenden Hüttensand und die Flugasche gleicht die Zementindustrie im TM-Szenario durch eine Mehrproduktion an Klinker aus. Demgemäß nimmt der Klinker-Zementfaktor zwischen 2030 und 2040 leicht zu. Im gleichen Zeitraum ersetzen Innovative Bindemittel konventionellen Zement jedoch in erheblichem Maße (~8 Mio. t). Die in der Zementindustrie erforderliche Hüttensandmenge sinkt im Zeitraum und kann ab 2040 erneut durch die verbliebene Sekundärstahlproduktion gedeckt werden (0,12 $t_{Hüttensand}/t_{Stahl}$) [38]. Der Klinker-Zementfaktor sinkt bis 2050 auf 71 % und verbleibt damit annähernd auf heutigem Niveau.

Maßnahmenumsetzung und Pfadanalyse der Transformation

Neben den Energie- und Emissionskenngrößen wertet das Modell Daten zu Maßnahmen- und Pfadabhängigkeiten aus. Die tatsächliche Diffusion individueller Maßnahmen und Technologien im TM-Szenario visualisiert Abbildung 5-8. Der Maßnahmenhochlauf kann durch drei gebildete Cluster beschrieben werden. Maßnahmen, bei denen die Referenztechnologie eine geringe Lebensdauer aufweist, werden früh und schnell umgesetzt. Bis 2030 sind 25 von insgesamt 218 Maßnahmen und Technologien im TM-Szenario bereits vollständig implementiert. Das erste Cluster inkludiert hauptsächlich Effizienzmaßnahmen. Viele Maßnahmen und Technologien laufen bis 2040 hoch und können damit dem zweiten

Cluster zugeordnet werden. Durch Restriktionen begrenzte Maßnahmen sowie Technologien mit langen industriellen Reinvestitionsperioden (z.B. Mühlen in der Zementindustrie) setzt das Modell nur sehr langsam um (Cluster 3).

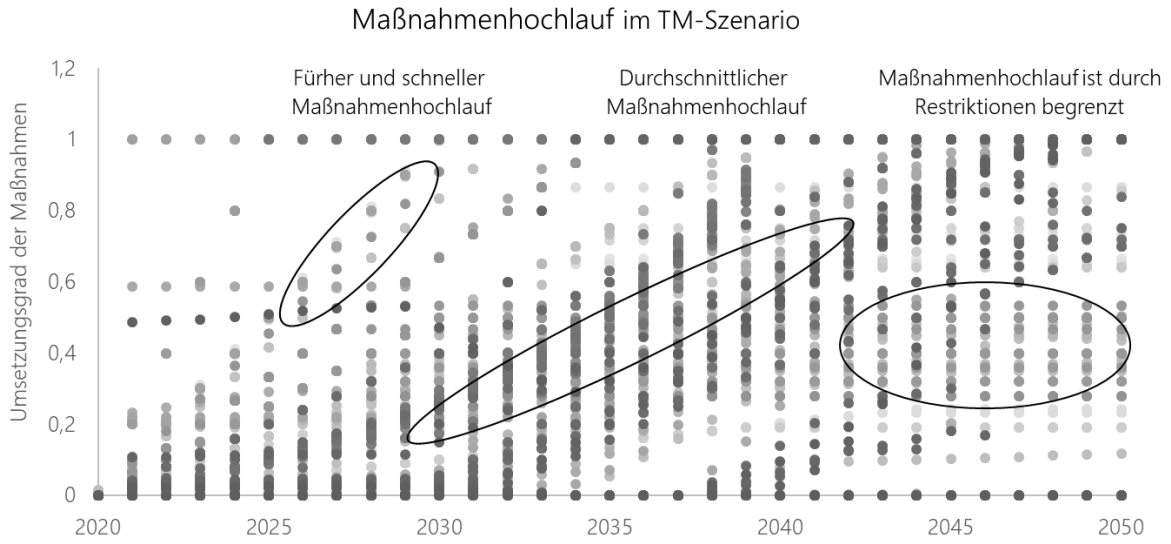

Abbildung 5-8: Maßnahmenhochlauf im TM-Szenario, 218 Maßnahmen und Technologien

Abbildung 5-9 visualisiert die Wechselwirkung zwischen hochofenbasierter Primärstahlerzeugung und der CO_2-Abscheidung im Hochofen und beschreibt damit beispielhaft wechselseitige Beziehungen individueller Maßnahmen im TM-Szenario.

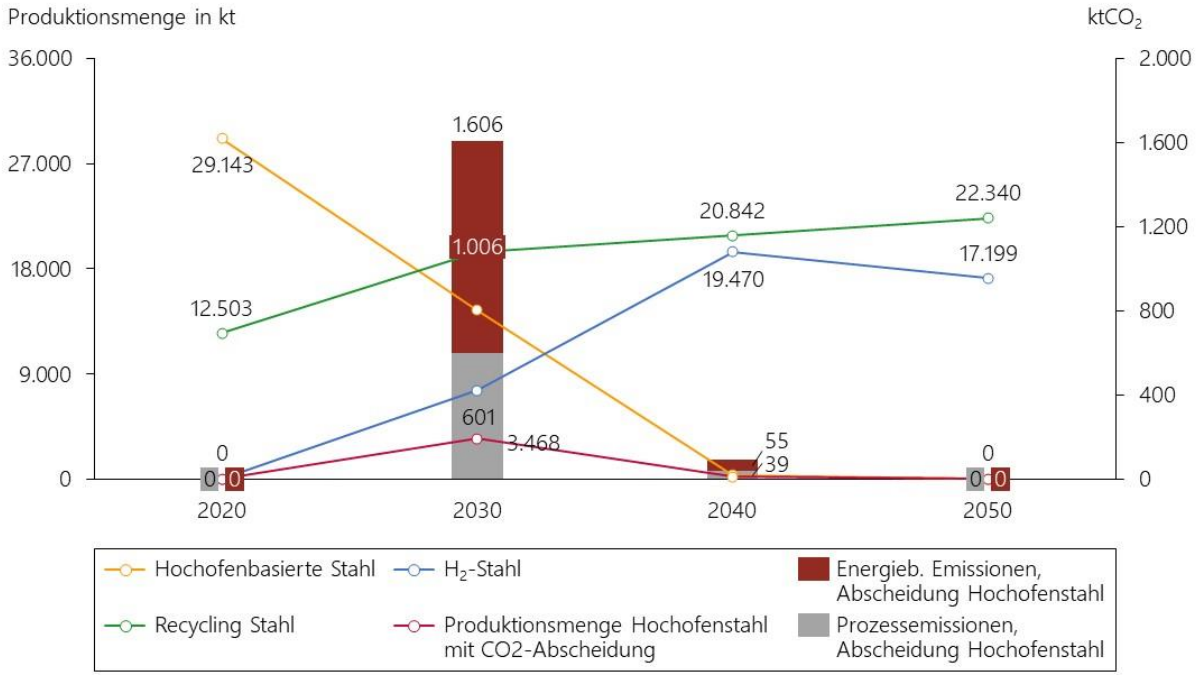

Abbildung 5-9: Wechselwirkungen zwischen individuellen THG-Verminderungsmaßnahmen im industriellen TM-Szenario, Beispiel Verfahrensroutenwechsel Stahl und CO_2-Abscheidung

Ab 2025 implementiert das Modell CO_2-Abscheidungsanlagen an Hochöfen. Da Stahl ab 2025 jedoch zunehmend durch alternativen Verfahren produziert wird, reduzieren sich ab 2030 mit dem Abbau von Hochöfen auch die CO_2-Abscheidungsanlagen. Bis 2040 enthält das TM-Szenario keine hochofenbasierte Stahlerzeugung und damit auch keine

CO_2-Abscheidungsanlagen in der Stahlindustrie mehr. Die maximale mit CO_2-Abscheidung produzierte Menge Hochofenstahl in Höhe von etwa 3,5 Mio t erreicht das TM-Szenario in 2030. Etwa 1,6 Mio. tCO_2 scheiden CO_2-Filteranlagen am Hochofen in 2030 ab. Die CO_2-Abscheidung in der Stahlindustrie dient im Szenario als Brückentechnologie, um die temporären und damit die kumulierten CO_2-Emissionen im Pfad zu reduzieren.

Referenz- und Technologiemix im Vergleich mit weiteren Industrieszenarien

Im Vergleich erreichen Referenz- und TM-Szenario hinsichtlich der CO_2-Verminderung nicht die noch höheren Reduktionswerte anderer industrieller energie- und klimapolitischer Szenarien. Insbesondere das Klimaschutzszenario 2050 [20] erzielt durch eine Kombination aus hoher CO_2-Abscheidung und Energieeffizienz einen negativen CO_2-Ausstoß. Abbildung 5-10 vergleicht die industriellen Referenz- und Zielszenarien der Studien [20] (KSZ-T, KSZ-Z95), [16] (KP-T, KP-Z95), [39] (IEW-T, IEW-Z95-EL, IEW-Z95-TM) und [17] (THG-Z95) mit dem Referenz- und TM-Szenario.

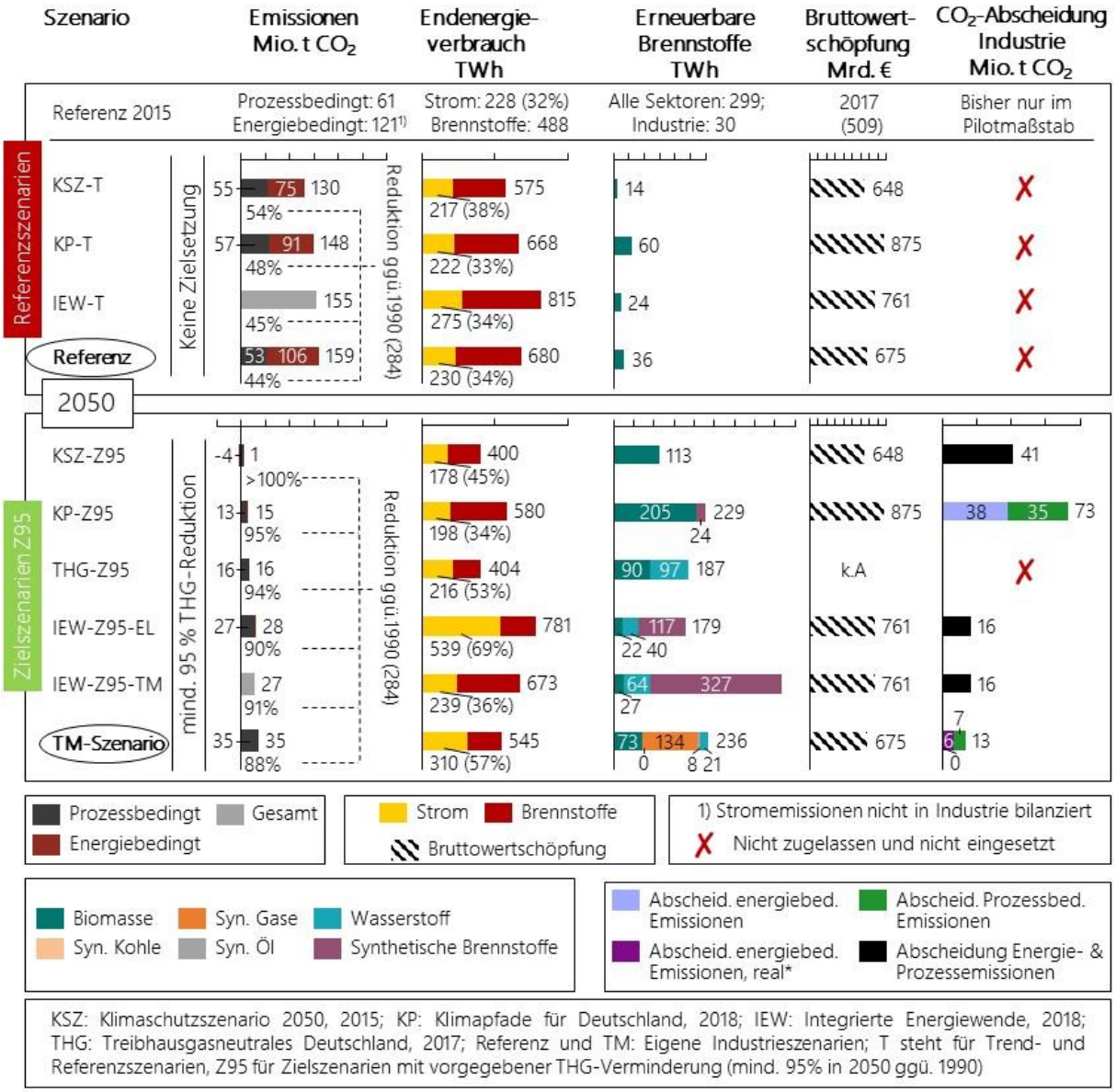

Abbildung 5-10: Szenarienvergleich auf der Basis ausgewählter technoökonomischer Kennwerte

Im Szenarienvergleich weist das TM-Szenario einen mittleren Energieverbrauch auf, der insbesondere durch eine starke Elektrifizierung geprägt ist (Anteil von 57 % am Endenergieverbrauch). Nur das Elektrifizierungsszenario der „Integrierten Energiewende“ [39] erreicht einen noch höheren Elektrifizierungsgrad (69 %). Die Produktion strombasierter Brennstoffe bilanziert [39] jedoch teilweise im Industrie- statt wie die meisten Studien im Bereitstellungsektor.

Sowohl das Treibhausgasneutrale Deutschland (THG-Z95) als auch das Klimaschutzszenario 2050 (KSZ-Z95) erzielen in den Zielszenarien vergleichsweise hohe Effizienzgewinne. Das TM-Szenario errechnet wie KP-Z95 eine geringere Senkung des Energieverbrauchs.

Trotz der begrenzten Verfügbarkeit setzen bis auf die Integrierte Energiewende alle Studien auf einen stärkeren Einsatz von Biomasse in den industriellen Zielszenarien. Die Szenarien gehen folglich entweder von einer Verschiebung der intersektoralen Biomassenutzung zugunsten der Industrie aus oder importieren Biomasse aus anderen Ländern.

Synthetische Brennstoffe setzt das Klimaschutzszenario im Industriesektor nicht ein, Biomasse hingegen in größerem Umfang. Die Zielszenarien der Integrierten Energiewende verwenden wie das TM-Szenario hingegen vermehrt synthetische Brennstoffe zur CO_2-Verminderung. Ein Teil der Klimaschutzambition wird damit ins Ausland verlagert, das in den Szenarien verstärkt synthetische Gase und Flüssigkraftstoffe nach Deutschland exportiert. Trotz eines starken prospektiven Wirtschaftswachstums, erreicht KP-Z95 eine hohe industrielle CO_2-Verminderung. Die hohe Biomassenutzung und die mit Abstand höchste CO_2-Abscheidung im Szenarienvergleich ermöglichen diese Entwicklung.

6 Schlussbetrachtung mit Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Publikation wird das Methodengerüst des Sektormodells Industrie (SmInd) erweitert. Referenz- und Technologiemixmodul des Modells erlauben eine konsistente und detaillierte Abbildung und Analyse bestehender und prospektiver energiewirtschaftlicher Dimensionen des Industriesektors. Die Methoden werden durch konsistente, industrielle Referenz- und Technologiemixszenarien mit Zeithorizont bis 2050 validiert und plausibilisiert. Gleichzeitig bilden die Szenarien eine fundierte Basis unter gegebenen Annahmen die technoökonomische Entwicklung des Industriesektors abzuleiten. Der Vergleich mit vorhandenen Industrieszenarien ordnet die Ergebnisse in den Gesamtkontext bisheriger wissenschaftlicher Arbeiten ein.

Im Vergleich zu [24] werden Methoden zur Abbildung der industriellen Referenzentwicklung erarbeitet. Die Erweiterung des Modells um eine historische Basis mit realen technoökonomischen Daten bildet das Grundgerüst, um den industriellen Rahmen aufzuspannen. Im Gegensatz zu [24] berücksichtigt das Technologiemixmodul bei der Umsetzung Wechselwirkungen individueller THG-Verminderungsmaßnahmen und energiewirtschaftlicher Parameter im gesamten Industriesystem. Wird eine Maßnahme umgesetzt, beeinflusst sie damit technoökonomische Kennwerte der Industrie, konnotierte Parameter anderer individueller Maßnahmen und den weiteren Verlauf des industriellen Transformationspfads. Die individuelle Umsetzung einer Maßnahme beeinflusst folglich die weitere Maßnahmenumsetzung und damit den berechneten Industriepfad im Modell. Die Validierungs- und Plausibilisierungsfunktionen und die Restriktionen stellen im Vergleich zu

[24] sicher, dass die energiewirtschaftlichen Berechnungen konsistente Modellergebnisse generieren. Da Daten zur Altersstruktur von Anlagen und Technologien in der Industrie nur begrenzt zur Verfügung stehen, wird ein heuristischer Algorithmus entwickelt, der die Altersstruktur anhand des „First In, First Out"-Prinzips (FIFO) ermittelt. Die Konstruktion einer Umsetzungsmatrix schafft die Option, die jahresspezifische Technologiediffusion unter Berücksichtigung weiterer Faktoren zu erfassen. Das Modell bestimmt über Restriktionen die absoluten und temporalen Komponenten der Technologiediffusion. Die Restriktionen umfassen ein breites energiewirtschaftliches Spektrum technoökonomischer Parameter und sind stufenlos erweiterbar. Die Definition übergeordneter homogener Produkte („Stahl") ermöglicht den konsistenten, makroökonomischen Wechsel von Verfahrensrouten. Massenbilanzen und modellierte Wertschöpfungsketten erlauben es einzelne industrielle Verkettungseffekte modellseitig zu berücksichtigen. Modellierte industrielle Brennertechnologien bestimmen den kostenoptimalen Brennstoffmix. Je Produktionsprozess legen Brennstoffmatrizen fest, welche Brennstoffwechseloptionen ohne Technologiewechsel bestehen. Die Optimierung des Brennstoffmix erhöht zudem die Freiheitsgrade des vormals hauptsächlich deterministischen Modells.

Die Methoden erlauben es, konsistente industrielle Transformationspfade zu entwickeln. Im Vergleich zur Referenz erreicht das ambitionierte Technologiemixszenario durch die Umsetzung individueller Maßnahmen eine deutlich größere Verminderung des Energieverbrauchs und der Emissionen. Der optimierte Brennstoffmix legt offen, dass synthetische Brennstoffe zu einem gewissen Zeitpunkt erforderlich sind, um die vorgegebene CO_2-Zielsetzung zu erreichen. Die Industrie setzt aus heutiger technologischer Sicht unter Berücksichtigung der Energiekostendifferenz und fehlender Wasserstoffbrenner verstärkt auf synthetische Gase und in geringerem Maße auf Öl. Die direkten energiebedingten Emissionen reduziert das Technologiemixmodul vollständig. In Abhängigkeit des Emissionsfaktors verbleiben Stromemissionen in Höhe von 7,5 Mio. tCO_2 und nur schwer zu vermindernde prozessbedingte Emissionen in Höhe von 35 Mio. tCO_2. Verfahrensroutenwechsel und die Bestandsveränderung durch einen sinkenden Stromemissionsfaktor bedingen die größte CO_2-Verminderung. Im Technologiemixszenario ergibt sich zwischen 2020 und 2050 eine kumulierte CO_2-Verminderung von 130 Mio. tCO_2, wovon 83 Mio. tCO_2 Stromemissionen sind. Ebenfalls erreicht der optimierte Brennstoffwechsel eine erhebliche CO_2-Verminderung in Abhängigkeit der CO_2-Zielsetzung im Zeitverlauf (kumuliert zwischen 2020 und 2050: 42 Mio. tCO_2). Die industriellen kumulierten Emissionen sind selbst im ambitionierten Technologiemixszenario so hoch, dass sie das in [1] ermittelte, verbleibende deutsche CO_2-Budget ab 2020 zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,75°C zu mehr als 60 % bis 2050 aufbrauchen.

Das TM-Szenario weist annuitätische, kumulierte Mehrkosten in Höhe von 430 Mrd. $€_{2017}$ ggü. der Referenz aus. Die Mehraufwendungen verteilen sich zu 46 % auf Technologie- und zu 54 % auf Energiekosten. Eine ähnliche Größenordnung der Technologiekosten weist [16] aus. Im Vergleich verpassen die errechneten Industriepfade knapp die noch höhere CO_2-Verminderung weiterer industrieller energie- und klimapolitischer Szenarien [39], [16], [17], [20]. Alle Vergleichsszenarien erfordern, wie das Technologiemixszenario, einen hohen Einsatz erneuerbarer Brennstoffe und wählen meist zwischen Biomasse ([16], [20]) und synthetischen Brennstoffen (TM-Szenario, [39]).

Trotz breiter Methodenentwicklung weist die Modellierung weiterhin Limitationen auf. So sind Effekte eines möglichen industriellen „Carbon Leakage“ nicht berücksichtigt. Mit der Bruttowertschöpfung ist der zu adressierende Parameter jedoch bereits hinterlegt. Durch die Variation der Bruttowertschöpfung könnten wirtschaftliche Effekte untersucht werden. Effekte von Sonderabschreibung berücksichtigt das Industriemodell bisher nicht. Die Technologiediffusion basiert hingegen auf natürlichen Reinvestitionszyklen. Der schnelle und zeitnahe Austausch klimaschädlicher Technologien könnte die kumulierten Emissionen des Transformationspfads reduzieren. Nebstdem bildet der entwickelte FIFO-Algorithmus die konstruierte Altersstruktur der Technologien zwar ab, ermittelt aber lediglich einen theoretischen Wert, der die reale industrielle Altersstruktur nicht vollständig wiedergeben kann. Reale Daten würden die Belastbarkeit der industriellen Szenarien erhöhen. Ebenfalls erhöht die Abbildung des Anlagenparks über Produktionskapazitäten die Belastbarkeit des Modells, da Auslastungseffekte bei der Technologieumsetzung Berücksichtigung finden könnten. Die Modellierung von Bestands- im Vergleich zu reinen Konversionstechnologien schafft die Option die technoökonomische Referenz detaillierter zu modellieren. Die erhöhte Effizienz durch Wasserstoffsysteme in der Industrie klammert das Modell bisher aus. Sauerstoff kann als Koppelprodukt der Wasserelektrolyse eine reinere Verbrennung in industriellen Prozessen bewirken und damit den Brennstoffverbrauch und infolgedessen die CO_2-Emissionen vermindern. Die industrielle Gesamtoptimierung von Maßnahmen und Technologien könnte zudem helfen, Konkurrenzsituation einzelner Technologien im Modell besser abzubilden. Zwar ist aufgrund der Heterogenität im Industriesektor die Konkurrenzsituation individueller Technologien geringer als in der Bereitstellung, zur Ableitung kosteneffizienter industrielle Transformationspfade ist eine Technologieauswahl dennoch praxisnäher.

Die modellgestützte Analyse des Industriesektors legt offen, dass selbst bei Umsetzung bis hin zu den letzten und teuersten CO_2-Verminderungsoptionen ein Kraftakt erforderlich ist, um industrielle CO_2-Neutralität zu erreichen. Neben der technologischen Forschung und Entwicklung sind engagierte Akteure in der Industrie notwendig, die die wissenschaftlichen Ergebnisse als aktiven Maßnahmenplan verstehen. Daneben schafft die Modellierung industrieller Szenarien die wissenschaftliche Basis, um geeignete politische Rahmenbedingungen abzuleiten. Die wissenschaftlichen Ergebnisse zu nutzen obliegt nun den Marktakteuren und den politischen Entscheidungsträgern der Bundesrepublik Deutschland.

Finanzierung und Förderung:

Das dieser Publikation zugrundeliegende Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SFK3O0-2 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Publikation liegt vollständig bei den Autoren.

Bundesministerium für Bildung und Forschung

7 Literaturverzeichnis

[1] Stefan, Rahmstorf: Wie viel CO2 kann Deutschland noch ausstoßen?. In: https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/wie-viel-co2-kann-deutschland-noch-ausstossen/. (Abruf am 2020-03-13); Heidelberg: SciLogs, 2019.

[2] Masson-Delmotte, Valérie et al.: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger - Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Genf: IPCC, 2018.

[3] IPCC-Sonderbericht über 1,5 °C globale Erwärmung - Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Bonn: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, 2019.

[4] M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J.G.J., Vignati, E. Fossil CO2 emissions of all world countries - 2018 Report, EUR 29433 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97240-9, doi:10.2760/30158, JRC113738.

[5] Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Berlin: BMU, 2018.

[6] Hübner, Tobias et al.: 2019 Small-scale modeling of individual GHG abatement measures in the industry. In: 8th International Ruhr Energy Conference (INREC) (University Duisburg-Essen) 09/2019. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.

[7] Fleiter, Tobias et al.: A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), 2018.

[8] Kube, Mathias et al.: Marktverfügbare Innovationen mit hoher Relevanz für die Energieeffizienz in der Industrie. Berlin: Ecofys, 2017.

[9] Primes model version 2018 - Detailed model description. Athens: E3M-Lab, National Technical University of Athens, 2019.

[10] Schneider, Clemens et al.: Risks and opportunities associated with decarbonising Rotterdam's industrial cluster. In: Environmental Innovation and Societal Transitions 05/2019. Wuppertal: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, 2019.

[11] Lorenczik, Stefan et al.: Kosteneffiziente Umsetzung der Sektorenkopplung. Köln: ewi Energy Research & Scenarios GmbH, 2018.

[12] Fattler, Steffen; Conrad, Jochen; Regett, Anika et al.: Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems (Dynamis) - Hauptbericht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2019.

[13] Hübner, Tobias et al.: Industrie 2050: Energiewende in der Industrie. In: et-Energiewirtschaftliche Tagesfragen (Ausgabe 8, 2019). Essen: etv Energieverlag GmbH, 2019.

[14] Joas, Fabian et al.: Klimaneutrale Industrie - Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, Wuppertal: Agora Energiewende, 2019.

[15] Purr, Katja et al.: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: RESCUE-Studie. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019.

[16] Gebert, Philipp et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.

[17] Günther, Jens et al.: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Berlin: Umweltbundesamt, 2017.

[18] Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.

[19] Capros, P. et al.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. Brüssel: Europäische Kommission, 2016.

[20] Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015

[21] 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.

[22] Böing, Felix; Murmann, Alexander; Pellinger, 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

[23] Hübner, Tobias et al.: Die Rolle von Kraft-Wärme-Kopplung im zukünftigen Energiesystem. In: BWK - Das Energiefachmagazin 05/2019. Düsseldorf: VDI Fachmedien GmbH & Co. KG Unternehmen für Fachinformationen, 2019.

[24] Hübner, Tobias: Small-Scale Modelling of Individual Greenhouse Gas Abatement Measures in Industry. Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2020.

[25] Rohde, Clemens: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2019.

[26] BMWi: Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin: BMWi, 2018.

[27] Unger, H.; Wagner, H.-J.; et al.: Validierung und kommunale Disaggregierung des Expertensystems HERAKLES - Abschlussbericht zum Vorhaben 258 114 98. Bochum: Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum (LEE), 2002

[28] Projektionsbericht 2019 für Deutschland. Berlin: Bundesregierung, 2019.

[29] Hübner, Tobias et al.: Modellgestützte Analyse synthetischer Brennstoffe in der Industrie bei ambitioniertem Klimaschutz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.

[30] Chan, Yeen et al.: Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 1: Technology Analysis. Karlsruhe, London: Fraunhofer ISI, 2019.

[31] Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris, Geneva: International Energy Agency (IEA), 2018.

[32] Building carbon neutrality in Europe - Engaging for concrete solutions. Brussels: Cembureau, 2018.

[33] The role of CEMENT in the 2050 LOW CARBON ECONOMY. Brüssel, Belgien: European Cement Association, 2013

[34] Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead, Revision 2017. Düsseldorf: European Cement Research Academy GmbH (ECRA), 2017

[35] Uhlenbruck, Neele et al.: Verbundvorhaben NECOC – Schaffung negativer Emissionen durch Auftrennung von atmosphärischem CO2 in wirtschaftlich verwertbares Carbon Black und Sauerstoff. In: https://www.tvt.kit.edu/21_3547.php. (Abruf am 2020-05-15); Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2020.

[36] Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. München, Frankfurt: Dechema, 2019.

[37] Fattler, Steffen et al.: Dynamis Hauptbericht - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2019.

[38] Report - Wissenschaftsprojekte des FEhS-Instituts 1/2019. Duisburg: Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS), 2019.

[39] Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.

[40] Fraunhofer ISI: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017 - Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2018.

[41] EEX Emissionsmarkt / EUA Primary Market Auction 2015: https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/auction-market/european-emission-allowances-auction/european-emission-allowances-auction-download; Leipzig: EEX, 2015 (überarbeitet: 2015).

[42] Guminski, Andrej et al.: Model based evaluation of industrial greenhouse gas abatement measures. Wien, Österreich: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2019.

[43] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2018.

[44] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017

[45] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016

[46] Klimaschutzszenario 2050 - 1. Modellierungsrunde. Freiburg, Berlin: Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2014

[47] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018.

[48] Brunke, Jean-Christian: Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland - Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven. Dissertation. Herausgegeben durch die Universität Stuttgart - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, geprüft von Voß, Alfred und Sauer, Alexander: Stuttgart, 2016.

[49] Rohde, Clemens: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017 - Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2018.

[50] Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungsplanung 2019-2030. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2018.

[51] Preiszusammensetzungen - Superbenzin, Dieselkraftstoff, leichtes Heizöl in: https://www.mwv.de/statistiken/preiszusammensetzung/. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV), 2017

[52] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017

[53] Kreidelmeyer, Sven et al.: Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger - Endbericht zum Projekt "Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe". Basel: Prognos AG, 2020.

[54] Deutsch, Matthias et al.: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, 2018.

[55] Bründerlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin: dena, 2018.

[56] 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.

[57] Machhammer, Otto et al.: Financial and Ecological Evaluation of Hydrogen Processes on Large Scale. In: Chemical Engineering & Technology 39 (6). Weinheim: Wiley-VCH, 2016.

[58] Heizwerte - bauforumstahl e. V.: https://www.bauforumstahl.de/brandbelastungen-und-heizwerte; bauforumstahl e. V.: bauforumstahl e. V., 2002.

[59] Böing, F., & Regett, A. (2019). Hourly CO2 Emission Factors and Marginal Costs of Energy Carriers in Future Multi-Energy Systems. Energies, 12(12), 2260. Basel, Switzerland: MDPI AG, 2019.

[60] VDP: Papier Kompass 2015/2016. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2017.

[61] Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang: Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotentiale, Hemmnisse und Instrumente in: ISI Schriftenreihe "Innovationspotentiale". Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2013

[62] Chemiewirtschaft in Zahlen 2016. Frankfurt am Main: Verband der Chemischen Industrie e. V., 2016

[63] Weigel, Max: Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren - Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel. Wuppertal: Bergischen Universität Wuppertal, 2014.

[64] Laufendes, Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018 - 2021). München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.

[65] Auszug Ofenumfrage Kalbverband; Köln: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V. (BVK), 2018.

[66] Metallstatistik 2016. Berlin: WirtschaftsVereinigung Metalle (WVM), 2017

[67] Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2016. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2016

[68] Environmental Profile Report - Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Brussels: European Aluminium (eaa), 2018.

[69] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zementindustrie in Deutschland 2016 - Zahlen und Daten. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016

[70] 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.

[71] Leisin, Matthias: Branchensteckbrief der Glasindustrie. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2019.

[72] Scalet, Bianca et al.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. Sevilla: Joint Research Centre of the European Commission (JRC), 2013

[73] 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

[74] Kalk - Statistisches Jahresheft 2018. Köln: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V. (BVK), 2018.

[75] Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015 - Environmental Data of the German Cement Industry. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016

[76] Umweltschutz im Aurubis-Konzern und aktualisierte Umwelterklärung 2019 der Aurubis AG der Standorte Hamburg und Lünen. Hamburg: Aurubis AG, 2019.

[77] Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2011 und 2012. Essen: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), 2013

[78] Papier 2019 - Ein Leistungsbericht. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), 2019.

[79] Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2017: https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html; Berlin: AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2019 (überarbeitet: 2019).

[80] Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarb. Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden - Tabelle 2: Energieverbrauch nach Energieträgern; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2016.

[81] Brush, Adrian; Masanet, Eric; Worrell, Ernst: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Dairy Processing Industry - An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2011

[82] Remus, Rainer et al.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production - Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) in: EUR - Scientific and Technical Research series. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013

[83] Zahlen und Daten 2018 - Zementindustrie in Deutschland; Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), 2018.

8 Anhang

Tabelle 8-1: Rahmendaten der Szenarien und zugehörige Literatur

Eingangsdaten	Literatur	Eingangsdaten	Literatur
ISI Anwendungsbilanz 2015 - 2019	[25], [40]	CO_2-Kosten	Realer Wert für Basisjahr: [41] Bis: 2035: [28] Ab 2035: [18]
Temperaturverteilung Prozesswärme nach Wirtschaftszweigen	[27]	Normierte Lastgänge Wirtschaftszweigebene	Auf der Basis eigener Industriedaten und synthetisiert nach [42]
Bruttowertschöpfung	Bis 2035: [28] Änderung ab 2035: [18]	Makroökonomischer Zins	[37] mit Urquelle /UCL-01 11/, Zinssatz reflektiert Wert, zu dem sich Staaten Geld für Investitionen leihen können
Änderung der Strom- und Brennstoffintensität	Eigene Berechnung auf Basis von Referenzszenario in [18], wirtschaftliche Diffusion von THG-Verminderungsmaßnahmen [7]	Maximalgrenze für Recycling in den metallurgischen Prozessen Sekundstahl, Sekundäraluminium, Sekundärkupfer	[18]
Produktionsmengen	Bis 2035: [28] Änderung ab 2035: [18]	Betriebe je Wirtschaftszweig	/Destatis-14 18/
Prozessemissionen je Wirtschaftszweig	Methodik beschrieben in [29], Urquellen: [43], [44], [45], [16], [46], [47]	THG-Verminderungs-maßnahmen, Technologie- und Anlagendaten	Hauptsächlich [37], Weitere in [24], [48], [18], [29], [49], und auf der Basis von Experteneinschätzungen

Tabelle 8-2: Grundlegende Einheiten je Parameter in SmInd

Parameter	Einheit
Energie	MWh
Emissionen	tCO_2
Produktionsmengen/Massen	t
Spezifische Energieverbräuche	MWh/tProdukt
Energieträgerkosten	€/MWh
Energiebedingte Emissionsfaktoren	tCO_2/MWh
Prozessbedingte Emissionsfaktoren	tCO_2/tProdukt
Verteilungen/Anteile/Zins	%
Kosten/Preise/Wertschöpfung	€
Energieintensität	MWh/€
Anzahl	Stück (Stk.)

Tabelle 8-3: Verwendete volkswirtschaftliche Energieträgerkosten in den Szenarien

Energieträger	⌀ Energieträgerkosten [€/MWh]		Literatur und Herkunft
	2020	2050	
Kohlen	8	9,6	[50] Szenario B, [21], Durchschnitt aus Steinkohle und Braunkohle
Fossile Gase	22,7	28,1	[50] Szenario B, [21]
Mineralöl	29,8	51,8	FfE-Schätzung auf Basis von [50], [51], [52]
Biomasse	27,6	26,3	FfE-Berechnung nach [37]
Sonstige Brennstoffe	20	20	Schätzung auf der Basis von Industriedaten, verwendet in [37]
Strom	43,3	80,4	Simulationsergebnis FfE-ISAaR, FfE Fuel Scenario aus [37]
Wasserstoff	76,4	157	Wasserstoffproduktion in Deutschland über die drei inländischen Szenarien mit EE-erzeugtem Wasserstoff in [53] und Berücksichtigung der Dampfreformierung (inkl. Transport). Anteil Dampfreformierung aus Fuel Szenario [37], sinkt bis 2050 auf 0, dementsprechend steigt der Wasserstoffpreis da Wasserstoff in 2050 in [37] vollständig aus Wasserelektrolyse erzeugt wird
Synthetische gasförmige Kohlenwasserstoffe (synth. Gase)	245	117	Mittelwert über Importkosten und heimische Produktion [54] mit Mittelwert aus Importanteilen von [21], [20], [55], [16] je Stützjahr zusammengefasst in [56]
Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (synth. Öl)	255	119	Mittelwert über Importkosten und heimische Produktion [54] mit Mittelwert aus Importanteilen von [21], [20], [55], [16] je Stützjahr zusammengefasst in [56]
Synthetische feste Kohlenwasserstoffe (synth. Kohlen)	350	130	Berechnung aus synthetischen Methankosten und Abscheidung des Kohlenstofffeststoffs über Methanpyrolyse [36] und /AGORA 01 18/, [57], [35], [58] und angenommener konstanter Wasserstoffgutschrift von 150 € pro MWh Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen

Tabelle 8-4: Verwendete energiebedingte Emissionsfaktoren in den Szenarien

Energieträger	⌀ Emissionsfaktoren Energie [tCO_2/MWh]		Literatur und Herkunft
	2020	2050	
Fossile Kohlen	0,347	0,340	FfE-Berechnung nach [45], Gewichteter Mittelwert über Steinkohle und Braunkohle
Fossile Gase	0,198	0,198	[45]
Fossiles Öl	0,277	0,277	FfE-Berechnung nach [45]
Biomasse	0*	0*	Erneuerbarer Kohlenstoffkreislauf
Sonstige Brennstoffe	0,293	0,293	FfE-Berechnung nach [45],
Strom	0,232	0,023	Simulationsergebnis FfE-ISAaR, Szenario Fuel aus [37], Methoden nach [59]
Wasserstoff	0	0	Wasserstoffeinsatz verursacht bei der Verbrennung und in der Brennstoffzelle im Industriesektor keine Emissionen
Synthetische gasförmige Kohlenwasserstoffe (synth. Gase)	0*	0*	Erneuerbarer Kohlenstoffkreislauf
Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (synth. Öl)	0*	0*	Erneuerbarer Kohlenstoffkreislauf
Synthetische feste Kohlenwasserstoffe (synth. Kohlen)	0*	0*	Erneuerbarer Kohlenstoffkreislauf

*Biomasse und synthetische kohlenstoffbasierte Brennstoffe werden im Szenario trotz direkter Emissionen bei der Verbrennung mit null Emissionen ausgewiesen. Dies ist auf den angenommenen erneuerbaren Kohlenstoffkreislauf der Brennstoffe zurückzuführen.

Tabelle 8-5: Verwendete energiebedingte Emissionsfaktoren erneuerbarer Brennstoffe zur Erfassung der realen brennstoffbedingten CO_2-Abscheidung

Energieträger	⌀ Emissionsfaktoren Energie [tCO_2/MWh]		Literatur und Herkunft
	2020	2050	
Biomasse	0,320	0,371	FfE-Berechnung nach [45]
Synthetische gasförmige Kohlenwasserstoffe (synth. Gase)	0,198	0,198	vgl. „Fossile Gase“ in Tabelle 8-4
Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (synth. Öl)	0,277	0,277	vgl. „Mineralöl“ in Tabelle 8-4
Synthetische feste Kohlenwasserstoffe (synth. Kohlen)	0,347	0,340	vgl. „Kohlen“ in Tabelle 8-4

Tabelle 8-6: Zeitunabhängige prozessbedingte Emissionsfaktoren in den Szenarien

Produktionsprozess	∅ Prozessemissionsfaktoren [tCO_2/tProdukt]	**Literatur und Herkunft**
Altpapier	0	[44] und [60]
Ammoniak	0,603	[61]
Chlor	0,001	[44] und [62]
Elektroflachglas	0,178	Siehe Flachglas
Elektrohohlglas	0,043	Siehe Hohlglas
Ethylen	0,001	[44] und [62]
Flachglas	0,178	[61]
H_2-Stahl	0,13	[63]
Hohlglas	0,043	[61]
Innovative Bindemittel	0,434	Projekt Energiewende in der Industrie [64]
Kalk	0,73	[65]
Klinker	0,394	[61]
Methanol	0,789	[44]
Milch	0	[44]
Papierherstellung	0,002	[44] und [60]
Polyethylen	0	[44] und [62]
Primäraluminium	1,57	[44] und [66]
Primärkupfer	0,109	Expertenaussage
Primärstahl	0,5587	[44] und [67]
Sekundäraluminium	0,0033	[68]
Sekundärkupfer	0,353	Expertenaussage
Sekundärstahl	0,0074	[44]
Zellstoff	0,002	[44] und [60]
Zement	0	[69]
Ziegel	0,117	[61]

Tabelle 8-7: Spezifischer Strom- und Brennstoffverbrauch je Prozess mit zugehöriger Quellenangabe für das Basisjahr 2015

Produktionsprozess	⌀ spezifischer Stromverbrauch [MWh/tProdukt]	⌀ spezifischer Brennstoffverbrauch [MWh/tProdukt]	Literatur und Berechnung
	Basisjahr 2015		
Altpapier	0,25	0,139	[61]
Ammoniak	0,206	3,028	[70]
Chlor	2,846	0,338	Gewichtet gemittelter Wert des spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauchs über Chlorherstellungsverfahren in [70] mit Produktionsmenge aus [36] Brennstoffverbrauch entsteht bei Dampfbereitstellung zur Produktion von Natronlauge, [48]
Elektroflachglas	2,643	0	[71], [61], [72] Berechnet aus Durchschnitt Elektroglas im Spezialglas und Haushaltsglas für Elektroflachglas. Verhältnis Flachglas zu Hohlglas auf Durchschnittswert angerechnet
Elektrohohlglas	1,057	0	[61], [72], Berechnet aus Durchschnitt Elektroglas im Spezialglas und Haushaltsglas für Elektroflachglas. Verhältnis Flachglas zu Hohlglas auf Durchschnittswert angerechnet
Ethylen	0	1,447	[36], Anteil Ethylen an High Value Chemicals (HVC) von 32 % im Steamcracker bei Brennstoffverbrauch von 4.583 MWh/tHVC
Flachglas	0,917	2,583	[71], [61]
H_2-Stahl	0,703	3,783	[73]
Hohlglas	0,389	1,611	[61]
Innovative Bindemittel	0,112	0,447	[48]
Kalk	0,106	1,141	[74]
Klinker	0,057	0,797	[75], Stromanteil der Klinkerherstellung an Zementproduktion (51%) nach [34]
Methanol	0,167	3,861	[70] ohne Dampfabgabe an andere Prozesse in Höhe von 2GJ/t
Milch	0,139	0,444	[61]
Papierherstellung	0,528	1,528	[61]
Polyethylen	0,567	0,178	[61]
Primäraluminium	15,115	3,606	[68], Bayer-Prozess, Aluminiumelektrolyse und initiales Vergießen
Primärkupfer	1,23	1,214	[76]
Primärstahl	0,079	4,502	[61], Energieaufwand für die Koksherstellung, Dampferzeugung, und Sauerstofferzeugung nicht berücksichtigt, Energieaufwand für Sintererzeugung inkludiert.
Sekundäraluminium	0,15	0,892	[68]
Sekundärkupfer	0,856	1,877	[76]
Sekundärstahl	0,533	0,131	[61]
Zellstoff	0,667	3,722	[61]
Zement	0,054	0	[75], Stromanteil der Klinkerherstellung an Zementproduktion (49%) nach [34]
Ziegel	0,153	0,439	[77]

Tabelle 8-8: Brennstoffanteile je Prozess in Prozent (%) mit zugehöriger Quellenangabe für das Basisjahr 2015

Produktions-prozess	Energieträger (%)*										Literatur und Herkunft
	M	FG	FW	K	Bio	SB	SG	W	SFL	SFE	
Altpapier	0,48	49,51	13,99	8,33	23,13	4,55	0	0	0	0,48	[78], Gleichverteilung über Papierprozesse
Ammoniak	33	67	0	0	0	0	0	0	0	33	[61], Verbrennung von Heizöl und Erdgas (Edukt zur Wärmebereitstellung)
Chlor	2,05	52,82	20	6,15	0	18,97	0	0	0	2,05	Nach WZ 20.1 Grundstoffchemie, [79], Dampf für Natronlauge
Elektroflach-glas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Kein Brennstoffeinsatz
Elektrohohl-glas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Kein Brennstoffeinsatz
Ethylen	100	0	0	0	0	0	0	0	0	100	[36], nur Naphta (Mineralöl) in Deutschland
Flachglas	9,25	89,99	0,76	0	0	0	0	0	0	9,25	Nach WZ 23.11 Herstellung von Flachglas, [80]
H_2-Stahl	0	41,26	0	0	7,48	0	0	51,26	0	0	[73], Substitution des verbleibenden Kohleanteils durch Biomasse
Hohlglas	5,09	94,85	0,06	0	0	0	0	0	0	5,09	Nach WZ 23.13 Herstellung von Hohlglas, DESTATIS-27 16
Innovative Bindemittel	1,1	0,4	0	33,7	21,98	42,81	0	0	0	1,1	VDZ-03 16, nach Referenzprozess Zementherstellung
Kalk	0	13,17	0	82,05	0	4,78	0	0	0	0	[74]
Klinker	1,1	0,7	0	33,6	21,89	42,7	0	0	0	1,1	[75], Annahme: kein Brennstoffverbrauch in der Zementmahlung. Biomasseanteil an alternativen Brennstoffen nach Expertenaussage
Methanol	60	40	0	0	0	0	0	0	0	60	[36]
Milch	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	[81]
Papier-herstellung	0,48	49,51	13,99	8,33	23,13	4,55	0	0	0	0,48	[78], Gleichverteilung über Papierprozesse
Polyethylen	2,05	52,82	20	6,15	0	18,97	0	0	0	2,05	Nach WZ 20.1 Grundstoffchemie aus [79]
Primär-aluminium	5,72	94	0,25	0	0	0,03	0	0	0	5,72	[68]
Primärkupfer	2,61	93,83	0	3,56	0	0	0	0	0	2,61	[76]
Primärstahl	0	7,57	0	92,43	0	0	0	0	0	0	[73] für Hochofen, [82] für Sauerstoffaufblaskonverter (BOF)
Sekundär-aluminium	3,7	96,3	0	0	0	0	0	0	0	3,7	[68]
Sekundär-kupfer	63,78	29,42	0	6,81	0	0	0	0	0	63,78	[76]
Sekundärstahl	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	[73]
Zellstoff	0,48	49,51	13,99	8,33	23,13	4,55	0	0	0	0,48	[78], Gleichverteilung über Papierprozesse
Zement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	[75], Annahme: kein Brennstoffverbrauch in der Zementmahlung
Ziegel	2,81	96,63	0	0,56	0	0	0	0	0	2,81	[77]

*M: Fossiles Öl, FG: Fossile Gase, K: Fossile Kohlen, B: Biomasse, SB: Sonstige Brennstoffe, W: Wasserstoff,
Synthetische kohlenwasserstoffbasierte Brennstoffe wie Synth. Gase (SG), Synth. Öl (SFL) und Synth. Kohlen (SFE) werden bisher nicht in industriellen Prozessen eingesetzt [29].

Tabelle 8-9: Produktionsprozesse und homogene Produktionsgüter in SmInd

Produktionsprozess	Homogenes Produktionsgut im Modell
Altpapier	Papier
Ammoniak	Ammoniak
Chlor	Chlor
Elektroflachglas	Flachglas
Elektrohohlglas	Hohlglas
Ethylen	Ethylen
Flachglas	Flachglas
H_2-Stahl	Stahl
Hohlglas	Hohlglas
Innovative Bindemittel	Zement
Kalk	Kalk
Klinker	Klinker
Methanol	Methanol
Milch	Milch
Papierherstellung	Papier
Polyethylen	Polyethylen
Primäraluminium	Aluminium
Primärkupfer	Kupfer
Primärstahl	Stahl
Sekundäraluminium	Aluminium
Sekundärkupfer	Kupfer
Sekundärstahl	Stahl
Zellstoff	Zellstoff
Zement	Zement
Ziegel	Ziegel

Tabelle 8-10: Massenbilanz mit Eingangs- und Ausgangsmaterialien der Prozesse

Prozess	Literatur
H_2-Stahl	[38], [28], [18]
Primärstahl	[38], [28], [18]
Sekundärstahl	[38], [28], [18]
Zement	[83]

Tabelle 8-11: Produktionsmengen von Industrieprozessen im Modell nach [28] und [18] in kt

	Referenzszenario				Technologiemixszenario			
Industrielle Prozesse	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Altpapier	17 793	17 718	17 651	18 565	17 793	17 718	17 651	18 565
Ammoniak	2 631	2 651	2 825	2 815	2 631	2 651	2 825	2 815
Chlor	4 644	5 206	5 297	5 289	4 644	5 206	5 297	5 289
Elektroflachglas	0	0	0	0	0	919	2 411	2 577
Elektrohohlglas	0	0	0	0	0	1 412	4 043	5 366
Ethylen	5 015	5 221	5 282	5 227	5 015	5 221	5 282	5 227
Flachglas	2 447	2 392	2 411	2 577	2 447	1 473	0	0
H_2-Stahl	0	0	0	0	0	7 586	19 470	17 199
Hohlglas	5 095	4 981	5 022	5 366	5 095	3 569	979	0
Innovative Bindemittel	0	0	0	0	0	0	8 135	13 272
Kalk	6 428	6 320	6 125	5 796	6 428	6 320	6 125	5 796
Klinker	22 911	20 728	19 455	18 573	22 911	20 728	14 099	9 516
Methanol	895	887	940	921	895	887	940	921
Milch	18 987	19 387	18 749	18 724	18 987	19 387	18 749	18 724
Papierherstellung	22 349	21 955	22 895	23 478	22 349	21 955	22 895	23 478
Polyethylen	1 562	1 562	1 651	1 825	1 562	1 562	1 651	1 825
Primäraluminium	572	541	524	485	572	397	349	304
Primärkupfer	412	387	379	387	412	387	354	347
Primärstahl	29 143	28 651	27 763	26 274	29 143	14 472	356	0
Sekundäraluminium	691	683	762	853	691	827	937	1 034
Sekundärkupfer	299	280	284	292	299	280	309	332
Sekundärstahl	12 503	12 833	12 905	13 265	12 503	19 427	20 842	22 340
Zellstoff	1 591	1 497	1 293	1 113	1 591	1 497	1 293	1 113
Zement	30 798	28 286	27 117	26 543	30 798	28 286	18 982	13 272
Ziegel	12 825	11 779	11 230	10 793	12 825	11 779	11 230	10 793