

MODELLIERUNG KOSTENEFFIZIENTER TRANSFORMATIONSPFADE DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Tobias Hübner^{1,2,*}, Serafin von Roon¹

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

²Technische 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 Industriegewende nimmt nicht nur eine wichtige Rolle im prospektiv treibhausgasneutralen Deutschland ein, sondern dient auch als Vorbild für die Transformationsbestrebungen weiterer Industrienationen. Das Gelingen der deutschen industriellen Transformation beeinflusst somit den Erfolg internationaler Klimaambitionen. Die Erweiterung des Methodengerüsts im Sektormodell Industrie (Smlnd) 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 CO₂-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. tCO₂ und nur schwer zu vermindern prozessbedingte Emissionen in Höhe von 35 Mio. tCO₂. Selbst im ambitionierten Zielszenario sind die kumulierten Emissionen zwischen 2020 und 2050 dennoch so hoch, dass sie das in [1] ermittelte, verbleibende deutsche CO₂-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 CO₂-Verminderungsoptionen ein Kraftakt und weitere Technologieentwicklung erforderlich ist, um industrielle CO₂-Neutralität zu erreichen. Das Zielszenario ermittelt annuitätische, kumulierte Mehrkosten von 430 Mrd. €₂₀₁₇ ggü. der Referenz.

Keywords: Industriegewende, 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. tCO₂-Äqui.) zu reduzieren, um die Erderwärmung auf 1,5 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen [2], [3]. Bis einschließlich 2018 hat sich das CO₂-Gesamtbudget zum Erreichen des 1,5 °C-Ziels (2 700 Mrd. tCO₂-Äqui.) durch die weltweiten THG-Emissionen bereits um etwa 2 250 Mrd. tCO₂-Äqui. verringert [2], [3]. Die anthropogenen THG-Emissionen entsprechen derzeit etwa 42 Mrd. tCO₂-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. tCO₂-Äqui. und ist mit etwa 21 % somit nach der Bereitstellung (328 Mio. tCO₂-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 Industrie treibhausgasneutral zu stellen, ist deshalb eine breitgestreute und grundlegende Transformation erforderlich [6]. Nach dem Special Report des IPCC [7] umfasst die Industrierende neben der Energieeffizienz eine Bandbreite von THG-Verminderungsmaßnahmen wie die Elektrifizierung, die CO₂-Abscheidung sowie den Einsatz synthetischer Brennstoffe [8], [9].

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], [10], [11], [12], [13], [14]. Die Simulationen zeigen Wege hin zu einer nahezu vollständigen THG-Verminderung auf und münden in energie- und klimapolitischen Szenarien [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]. Während der Bereitstellungssektor Transformationspfade kostenminimal auf der Basis von linearen Kostenfunktionen ableitet [25], [26], setzt die Industrieforschung meist auf Experteneinschätzungen und andere Priorisierungsinstrumente bei der Umsetzung von THG-Verminderungsmaßnahmen [6], [10], [11], [13], [14]. Aus makroökonomischer Perspektive steuert die Politik mikroökonomische Investitionsentscheidungen durch die Anpassung des regulatorischen Rahmens. Da zwischen 2020 und 2030 in der Industrie eine wegweisende, klimarelevante Investitionsphase ansteht, die den Sektor aufgrund der langen Reinvestitionszyklen über Jahre prägen wird [17], ist eine fundierte Entscheidungsgrundlage für den industriellen Klimaschutz erforderlich. Um aus übergeordneter Perspektive Entscheidungen in der Industrierende zu ermöglichen, wird das Sektormodell Industrie (Smlnd) erweitert [6]. Die methodische Erweiterung schafft die Basis, um eine möglichst (kosten)effiziente Industrierende abzuleiten und Wechselwirkungen zwischen THG-Verminderungsmaßnahmen in die modellgestützte Entscheidungsgrundlage miteinfließen zu lassen.

2 Theoretische Grundlagen zum Sektormodell Industrie

Das Sektormodell Industrie (Smlnd) führt diskrete energie- und emissionsdynamische Berechnungen mit Zeithorizont bis 2050 durch [27]. Smlnd verfügt über mehrere Substrukturen, die die gesamte deutsche Industrie top-down in 14 Wirtschaftszweige (Branchen) nach [28] unterteilt. Eine Matrix kombiniert die Verbräuche der Wirtschaftszweige energieträger- und anwendungsscharf. Insgesamt unterscheidet das Modell zehn Energieträger¹ sowie 13 Strom²- und sieben Brennstoffanwendungen³ [29], [28], [30]. Der Energieverbrauch auf Wirtschaftszweigebene untergliedert sich weiterhin in Prozess- und Querschnittsverbräuche. Die Prozessverbräuche umfassen 25 ausgewählte energie- und emissionsintensive industrielle Produktionsverfahren⁴, die über Aktivitätsgrößen abgebildet werden. Jährliche Produktionsmengen [31], [21] und spezifische Strom- sowie Brennstoffverbräuche bilden die Grundlage zur energetischen Modellierung der industriellen Produktionsverfahren (vgl. Literatur in Tabelle 9-8). Eingehende und ausgehende Materialien 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 Technologiemonellierung und weitere Funktionalitäten des Modells sind [27] zu entnehmen.

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, Elektrohohglas, Ethylen, Flachglas, H2-Stahl, Hohlglass, Innovative Bindemittel, Kalk, Klinker, Methanol, Milch, Papierherstellung, Polyethylen, Primäraluminium, Primärkupfer, Primärstahl, Sekundäraluminium, Sekundärkupfer, Sekundärstahl, Zellstoff, Zement, Ziegel

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 Smlnd basierend auf [27], [6] und [32] erweitert. Es ergeben sich weitere Optionen im Referenz- und Technologiemitmixmodul, die eine konsistente und detaillierte Abbildung und Analyse energiewirtschaftlicher Dimensionen des Industriesektors erlauben.

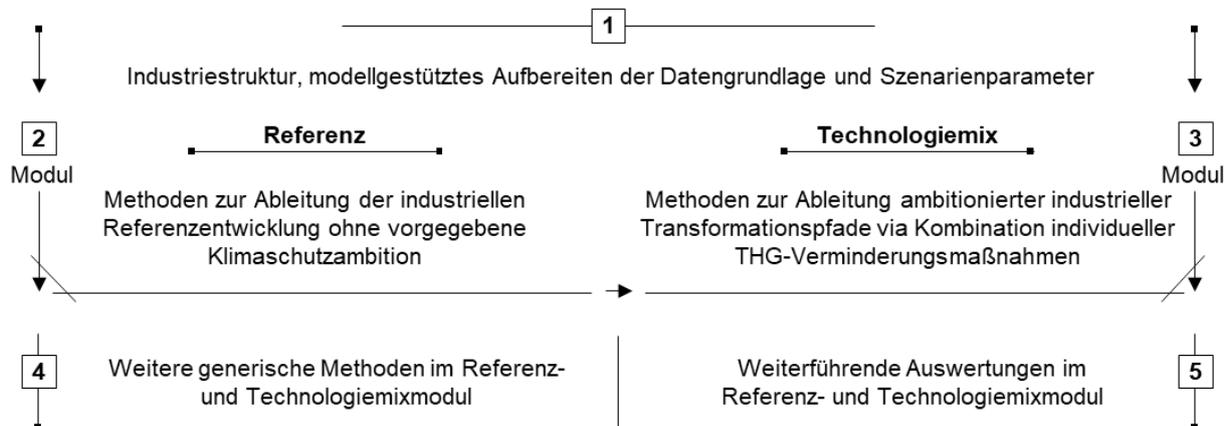


Abbildung 3-1: Überblick zur Methodenstruktur hinsichtlich der Industriemodellierung

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. Methoden zur Ableitung der industriellen Referenzentwicklungen im Referenzmodul (2) bilden die Grundlage für das nachfolgende Technologiemitmixmodul (3). Das Technologiemitmixmodul 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 Technologiemitmixmodul schärft das Verständnis homogener industrieller Modellierung in Smlnd (4). Weiterführende Auswertungen im Referenz- und Technologiemitmixmodul (5) dienen der Ableitung konsistenter teilloptimierter industrieller Transformationspfade. Die entwickelten Methoden werden durch konsistente, industrielle Referenz- und Technologiemitmixszenarien mit Zeithorizont bis 2050 validiert und plausibilisiert. Weiterführende Methoden und Auswertungsoptionen im Referenz- und Technologiemitmixmodul wie z.B. der Vergleich beispielhaft ausgewiesener Simulationsergebnisse mit vorhandenen Industrieszenarien beschließen die Publikation.

3.1 Industriestruktur, modellgestütztes Aufbereiten der Datengrundlage und Szenarienparameter

Um industrielle Transformationspfade zu konstruieren, ist zunächst die grundlegende Abbildung der Industrie in Smlnd festzulegen. Die Definition relevanter Modellierungselemente und –ebenen sowie deren wechselseitig eindeutige Zuordnung bilden die Grundlage. Modellierungselemente sind beispielsweise industrielle Anlagen, Prozesse und Wirtschaftszweige, die über Aktivitätsgrößen und weitere exogene Eingangsgrößen abgebildet werden. Aktivitätsgrößen beschreiben Parameter je Modellierungselement, die den Detailgrad

der simulativen Abbildung bestimmen. Energetische Parameter industrieller Prozesse bildet Smlnd beispielsweise durch die Aktivitätsgrößen „spezifischer Strom- und Brennstoffverbrauch“ und „Produktionsmengen“ ab. Prozesse sind zudem mit den Modellierungsebenen „Anlagen“ und „Wirtschaftszweige“ über eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) verbunden. Abbildung 3-2 zeigt anhand eines einfachen Beispiels wie der Industrierahmen der Modellierung aufgespannt wird.

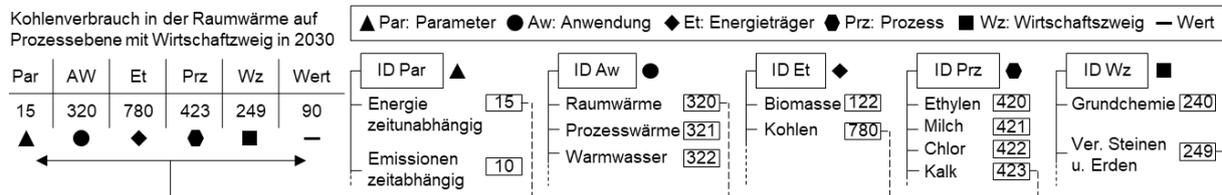


Abbildung 3-2: Industrierahmen durch Modellierungselemente und -ebene sowie Zuordnung über ID's

Neben der Industriestruktur sind einleitend die übergeordneten Szenarienparameter zu definieren. Die relevanten Eingangsparameter der Industriemodellierung und den energiewirtschaftlichen Szenarienrahmen je Modellebene zeigt einführend Tabelle 3-1. Anhand des Detailgrads und der Parameteranzahl aus Tabelle 3-1 kann abgeleitet werden, dass Prozesse und die Prozessebene das Kernstück der industriellen Modellierung in Smlnd bilden.

Tabelle 3-1: Relevante Eingangsparameter je Modellebene der Industriemodellierung und den energiewirtschaftlichen Szenarienrahmen mit zugehörig verwendeten Einheiten

Anlagen- ebene		Prozess- ebene		Wirtschaftszweig- ebene (Prozesse und Querschnitt)		Industrie/ Szenarien- ebene		Energie- systemebene	
R1 T1	Normierte Lastgänge (dl)	R1 T1	Prozessemissions- faktoren (tCO ₂ /t)	R1 T1	Normierte Lastgänge (dl)	R1 T1	Basis- und Endjahr der Simulation (a)	R1 T1	Energieträger- kosten (€/MWh)
R1 T2	THG- Verminderungs- maßnahmen mit Wirkungsebene (div.)	R1 T2	THG- Verminderungs- maßnahmen mit Wirkungsebene (div.)	R1 T2	THG- Verminderungs- maßnahmen mit Wirkungsebene (div.)	R1 T1	Modellierungs- elemente, Modellierungs- ebene mit ID- Struktur	R1 T1	Energie- emissions- faktoren (tCO ₂ /MWh)
R2 T2	Energieträger (MWh | %)	R2 T2	Energieträger (MWh | %)	R1 T1	Prozess- emissionen (tCO ₂)	R1 T1	Budget für Umsetzung von THG- Verminderungs- maßnahmen (€)	R1 T1	Makro- ökonomischer Zins (%)
R1 T2	Produktions- mengen (t)	R1 T2	Produktions- mengen (t)	R1 T2	Temperatur- verteilung Prozesswärme (%)	R1 T1	Übergeordnetes Klimaschutz- ambitionsniveau (% ggü. Jahr)	R1 T1	Makro- ökonomische CO ₂ -Kosten (€)
R2 T2	spezifische Strom- und Brennstoff- verbräuche (MWh/t)	R1 T2	spezifische Strom- und Brennstoff- verbräuche (MWh/t)	R2 T2	Strom- und Brennstoff- intensität (MWh/€)	R1 T1	Umsetzungslogik der THG- Verminderungs- maßnahmen (binär)	R1 T1	Restriktionen für Energieträger wie Biomasse (MWh)
R2 T2	Anlagendaten (z.B. Technologie- verfügbarkeit, technologische Lernkurven, Energie- und Emissionsdaten)	R2 T2	Technologiedaten (z.B. Technologie- verfügbarkeit, technologische Lernkurven, Energie- und Emissionsdaten)	R2 T2	Energieträger- und anwendungs- scharfe Anwendungsbilanz (MWh)				
		R2 T2	Massenbilanz (t | %)	R2 T1	Anzahl Betriebe				
		R1 T1	Recyclingpfade in der Metallurgie	R1 T1	Brutto- wertschöpfung (€)				
		R1 T1	Materialien und homogene Produkte	R1 T1	Fernwärme- schlüsselung				
		R2 T2	Restriktionen Massenströme	R1 T1	Brenner- technologien und Matrix				
		R1 T1	Klimaschutz- ambitionsniveau je Prozess (% ggü. Jahr)						
		R1 T1	Brenner- technologien und Matrix						

Referenzmodul (R)1, Technologiemixmodul (T)1: Über den Simulationszeitraum exogen vorgegeben, keine endogene Veränderung im Modell
R2, T2: Für die historischen Basisjahre exogen vorgegeben, für die Simulationsjahre jedoch vollständig oder teilweise endogen berechnet.

Die gewählte Modellebene je technoökonomischer Eingangsgröße hängt zum einen von der Wirkungsebene, zum anderen von der Datenverfügbarkeit ab.

Exogene Eingangsgrößen können einerseits den vollständigen Simulationszeitraum, andererseits teilweise oder vollständig die historischen Basisjahre (2015 - 2019) umspannen (vgl. Tabelle 3-1). Die Industrie- bzw. Szenarienebene umfasst beispielsweise das über den

gesamten Simulationszeitraum vorgegebene Klimaschutzambitionsniveau (CO₂-Verminderung in Prozent ggü. Referenzjahr).

Parameter der Energiesystemebene ergänzen Eingangsgrößen auf Szenarienebene. Spezifische Kosten (€/MWh) und Emissionen (tCO₂/MWh) stellen exogene Faktoren zur bottom-up Bestimmung von Energieträgerkosten und energiebedingten Emissionen auf verschiedenen Modellebenen dar.

Ebenfalls beinhaltet das Modell Daten auf Anlagen-, Prozess- und Wirtschaftszweigebene. Die Anlagenebene umfasst beispielweise die Technologieverfügbarkeit⁵, technologiespezifische Lernkurven und Energie- und Emissionsdaten. Die Verfügbarkeit von Schrotten variiert hingegen je Produktionsprozess (Wirkungsebene). Metallurgische Recyclingpfade sind demgemäß auf Prozessebene hinterlegt. Um die vollständigen Prozessemissionen der Industrie abzubilden, sind die auf Prozessebene über Aktivitätsgrößen ermittelten prozessbedingten Emissionen⁶ um die verbleibenden nicht-prozessspezifisch verfügbaren Prozessemissionen je Basisjahr zu ergänzen. In Abhängigkeit des Parameters (z.B. Produktionsmenge) beinhaltet das Modell mehrere exogene, frei wähl- und kombinierbare Datensätze verschiedener klimapolitischer Szenarien und weiterer Literatur. Kapitel 4 und der Anhang beschreiben die in Referenz- und Technologiemitxmodul gewählten Ausprägungen je Parameter. Die Datensätze verfügen über möglichst einheitliche historische Basisjahre. Die mangelnde Datenverfügbarkeit auf Prozessebene⁷ beispielsweise begrenzt die Vollständigkeit und führt zu einer lediglich Teil- oder Einzelabdeckung je Parameter. Individuelle Module überführen die in tabellenstrukturierten Eingangsdaten aus der Datenbank über die MATLAB und PostgreSQL-Schnittstelle „PgMex“ in das Modell.

Exogene Datensätze wie die Bruttowertschöpfung und die Energieträgerkosten umfassen lediglich Stützjahre. Die „Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial (PCHIP)“ Methode [33], [34] interpoliert die für einzelne exogene Eingangsdaten fehlenden Zwischenjahre anhand der verfügbaren Stützjahre. Die Interpolationsmethode bildet insbesondere lineare Zusammenhänge gut ab [33], [34].

Homogene und generische Simulationsmethoden erfordern es, einzelne Datensätze weiter aufzubereiten. So sind die für die historischen Basisjahre verwendeten energieträger- und anwendungsscharfen Verbräuche der industriellen Anwendungsbilanz des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI Anwendungsbilanz) [28], [35] auf Wirtschaftszweigebene zusammenzufassen. Der Energieträger „Fossiles Öl“ resultiert aus der Kombination von „Heizöl leicht“ und „Heizöl schwer“, der Energieträger „fossile Gase“ aus der Konzentration von „Naturgasen“ und „übrigen Gasen“.

Das Modell schlüsselt ferner den Sekundärenergieträger Fernwärme auf die Primärenergieträger (vgl. Anhang, Tabelle 9-2). Da weder Energieträgerkosten noch Energieemissionsfaktoren für den Energieträger „Kohlen“ aus der ISI Anwendungsbilanz vorliegen, wird je Parameter ein zeitabhängiger gewichteter Mittelwert über Stein- und Braunkohle gebildet [36]. Die Eingangsdaten schaffen die Basis, um die

⁵ Technology Readiness Level (TRL)

⁶ Produktionsmenge und spezifische Prozessemissionsfaktoren

⁷ z.B. spezifische Strom- und Brennstoffverbräuche, THG-Verminderungsmaßnahmen, Lastgänge, Temperaturverteilung Prozesswärme

THG-Verminderungsmaßnahmen-, Technologie- und Restriktionsmatrix zu erzeugen, deren Struktur im Anhang einzusehen ist (vgl. Tabelle 9-13, Tabelle 9-14, Tabelle 9-15, Tabelle 9-16). Das Modell erstellt daneben zur Bewertung der Investitionen verwendete technologiespezifische Lernkurven [27]. Vor den Simulationen im Referenz- und Technologiemixmodul durchlaufen die Eingangsdaten abschließend eine modellgestützte Validierungs- und Plausibilitätsüberprüfung. Die initial durch Multiplikation von spezifischem Verbrauch, Produktionsmenge und Energieträgeraufteilung ermittelten energieträgerscharfen und auf Wirtschaftszweigebene aggregierten Prozessverbräuchen dienen für den Abgleich mit energieträgerscharfen Wirtschaftszweigverbräuchen der historischen Basisjahre. Die Validierungs- und Plausibilisierungsfunktionen stellen sicher, dass die auf Wirtschaftszweigebene aggregierten energieträgerscharfen Prozessverbräuche stets kleiner als die hinterlegten energieträgerscharfen Wirtschaftszweigverbräuche selbst sind. Für die energieträgerscharfen Verbräuche auf Prozess- und Wirtschaftszweigebene gelten folglich die Gleichungen in (3-1) und (3-2):

$$\vec{E}_{t_h,p_w} = \sum_{e=1}^{p_w} \vec{E}_{t_h,p,e} \text{ und } \vec{E}_{t_h,w} = \sum_{j=1}^{aw} E_{t_h,w,j} \quad (3-1)$$

$$\vec{E}_{t_h,p_w} \leq \vec{E}_{t_h,w}$$

$$\sum_{i=1}^{et} \vec{E}_{t_h,p_w} \leq \sum_{i=1}^{et} \vec{E}_{t_h,w} \quad (3-2)$$

\vec{E}_{t_h,p_w}	(MWh)	Vektor mit energieträgerscharfem Verbrauch der Prozesse eines Wirtschaftszweigs	$\vec{E}_{t_h,p,e}$	(MWh)	Anzahl Energieträger je Kategorie (Strom- und Brennstoffe)
p_w	(Stk)	Prozesse eines Wirtschaftszweigs	$\vec{E}_{t_h,w}$	(MWh)	Bruttowertschöpfung des Basisjahrs des Wirtschaftszweigs
et	(Stk)	Energieträger			

Übersteigen die aggregierten Prozessverbräuche den Wirtschaftszweigverbrauch, wird zunächst der spezifische Energieverbrauch anschließend die Energieträgerverteilung je Prozess angepasst. Überschreitet die Differenz je Wirtschaftszweig einen festgelegten Grenzwert, bricht das Modell die Simulationen ab. Infolgedessen sind veränderte Eingangsdaten zu hinterlegen.

3.2 Referenzmodul: Methoden zur Ableitung der Referenzentwicklung

Im Referenzmodul konstruierte Referenzszenarien bilden die Grundlage modellgestützter Analysen in Smlnd. Hauptsächlich basierend auf prospektiven ökonomischen Kenngrößen (€) und Energieintensitäten (€/MWh) der deutschen Industrie umfasst das Referenzszenario die Energie- und Emissionsentwicklung der historischen Basisjahre (2015 - 2019) bis 2050. Die im Folgetext beschriebenen Methoden beziehen sich nicht ausschließlich auf das Referenzmodul und werden teilweise auch für Berechnungen und Analysen im Technologiemixmodul genutzt.

3.2.1 Energieträger- und anwendungsscharfer Energieverbrauch

Der Energieträger- und anwendungsscharfe Energieverbrauch umfasst folgende methodische Bestandteile:

- Übergeordnete Entwicklung des Strom- und Brennstoffverbrauchs
- Energieträger- und anwendungsscharfer Prozess- und Querschnittsverbrauch
- Zeitliche Auflösung energieträger- und anwendungsscharfer Verbräuche

Übergeordnete Entwicklung des Strom- und Brennstoffverbrauchs

Die realen energie- und anwendungsscharfen Verbrauchsdaten der historischen Basisjahre (2015 - 2019) je Wirtschaftszweig beruhen auf der ISI Anwendungsbilanz [28], [37]. Die reale, wirtschaftszweigscharfe Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie zwischen 2015 und 2019 entstammt [31]. Die historischen Strom- und Brennstoffintensitäten je Wirtschaftszweig ergeben sich nach Gleichung (3-3):

$$ei_{t,h,w,bs|st} = \frac{\sum_{i=1}^{et} \sum_{j=1}^{aw} E_{t,h,w,i,j}}{BWS_{t,h,w}} \quad (3-3)$$

$ei_{t,h,w,bs|st}$ (MWh/€)	Strom- und Brennstoffintensität für die historischen Basisjahre, Wirtschaftszweig	et (dl)	Anzahl Energieträger je Kategorie (Strom- und Brennstoffe)
$E_{t,h,w}$ (MWh)	Energieverbrauch für die historischen Basisjahre des Wirtschaftszweigs	$BWS_{t,h,w}$ (€)	Bruttowertschöpfung des Basisjahrs des Wirtschaftszweigs
aw (dl)	Anzahl Anwendungen		

Die prospektiven wirtschaftszweigscharfen Strom- und Brennstoffintensitäten der industriellen Transformationspfade im Referenzmodul resultieren aus der wirtschaftlichen Maßnahmendiffusion des Industriemodells in [21]. Um auf den Energiewerten der historischen Basisjahre aufzusetzen und die Zeitabhängigkeit der Energieintensitätswerte zu negieren, ist die Änderungsrate der prospektiven Strom- und Brennstoffintensitäten ab 2020 zu ermitteln. Die jahresspezifische Änderungsrate errechnet sich nach Gleichung (3-4) und schreibt den Basiswert nach Gleichung (3-5) fort:

$$dx_t = \frac{x_t}{x_{t-1}} \quad (3-4)$$

$$w_t = dx_t \cdot w_{t-1} \quad (3-5)$$

x (div)	Wert, bei dem Änderung berechnet wird	dx_t (div)	Änderungswert im Vergleich zum Vorjahr
w_t (div)	Fortgeschriebener Wert		

Der extrahierte Effizienzfortschritt absoluter Strom- und Brennstoffintensitäten spiegelt den effizienteren Einsatz von industriellen Prozess- und Querschnittstechnologien im Referenzmodul wider. Die jährliche Änderungsrate schreibt die in Gleichung (3-3) berechnete Energieintensität des letzten historischen Basisjahrs (in casu quo 2019) fort. Es ergeben sich die Strom- und Brennstoffintensitäten der Folgejahre. Die zur Berechnung prospektiver Energieverbräuche erforderliche prognostizierte Bruttowertschöpfung entstammt [31], wird in der Studie jedoch lediglich bis 2035 ausgewiesen. Ebenfalls nach den Gleichungen (3-4) und (3-5) schreibt das Referenzmodul die Bruttowertschöpfung aus [31] ab 2035 bis 2050 anhand der jährlichen Änderungsrate basierend auf der Bruttowertschöpfung in [21] fort.

Wie Gleichung (3-6) beschreibt, ergibt sich die prospektive wirtschaftszweigscharfe energetische Referenzentwicklung schließlich übergeordnet aus der Multiplikation von Strom- und Brennstoffintensität mit der Bruttowertschöpfung:

$$E_{t,w,st|bs} = e_{t,w,st|bs} \cdot BWS_{t,w} \quad (3-6)$$

$E_{t,w,st|bs}$ (MWh)	Strom- und Brennstoffverbrauch auf Wirtschaftszweigebene in Zeitschritt t	$BWS_{t,w}$ (€)	Bruttowertschöpfung in Zeitschritt t
$e_{t,w,st|bs}$ (MWh/€)	Strom- und Brennstoffintensität in Zeitschritt t		

Um die in den Energieintensitäten enthaltene Effizienzsteigerung auch auf Prozessebene zu berücksichtigen, bezieht das Referenzmodul die jahresspezifische Änderung der Strom- und Brennstoffintensität nach Gleichung (3-5) auf die spezifischen Strom- und Brennstoffverbräuche der Basisjahre. Anhand des minimalen spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauchs resultiert aus Gleichung (3-7) ein minimaler spezifischer Energieverbrauch je Prozess, der im Technologiemixmodul als Grundlage zur Berechnung eines unteren Grenzwerts dient:

$$e_{t,p,min} = \min e_{t,p,bs} + \min e_{t,p,st} \quad (3-7)$$

$e_{t,p,min}$ (MWh/t)	vorgegebenes Minimum des spezifischen Energieverbrauch je Prozess	$e_{t,p,st}$ (MWh/t)	spezifischer Stromverbrauch des Prozesses
$e_{t,p,bs}$ (MWh/t)	Spezifischer Brennstoffverbrauch des Prozesses		

Um den absoluten Strom- und Brennstoffverbrauch auf Prozessebene zu berechnen, multipliziert Gleichung (3-8) die im Referenzmodul exogen hinterlegten prozessspezifischen Produktionsmengen mit den um die Effizienzsteigerung veränderten spezifischen Strom- und Brennstoffverbräuchen:

$$E_{t,p} = e_{t,p} \cdot m_{t,p} \quad (3-8)$$

$E_{t,p}$ (MWh)	Strom- und Brennstoffverbrauch in Zeitschritt t	$m_{t,p}$ (t)	Produktionsmasse des Produktionsguts i in Zeitschritt t
$e_{t,p}$ (MWh/t)	Spezifischer gravimetrischer Strom- oder Brennstoffverbrauch		

Da der prozessspezifische Energieverbrauch bottom-up über Aktivitätsgrößen und damit im engeren Sinne unabhängig von den Eingangsdaten des Energieverbrauchs auf Wirtschaftszweigebene berechnet wird, stellt das Referenzmodul sicher, dass der Prozessenergieverbrauch eines Wirtschaftszweigs zu keinem Zeitpunkt den Energieverbrauch des Wirtschaftszweigs überschreitet. In jedem Zeitschritt gilt Bedingung (3-9):

$$E_{t,p,w} \leq E_{t,w} \quad (3-9)$$

$E_{t,p,w}$ (MWh)	Energieverbrauch der Prozess auf Wirtschaftszweigebene in Zeitschritt t	$E_{t,w}$ (MWh)	Energieverbrauch Wirtschaftszweige in Zeitschritt t
-------------------	---	-----------------	---

Um Bedingung (3-9) zu erfüllen, werden folgende Voraussetzungen bei der Datenerhebung und den initialen Modellrechnungen eingehalten:

- Die Eingangsdaten sind zu validieren und plausibilisieren
- Da die beiden wesentlichen Treiber des Energieverbrauchs im Referenzmodul die Bruttowertschöpfung auf Wirtschaftszweigebe und die Produktionsmenge auf Prozessebene sind, werden diese beiden Größen möglichst derselben Studie entnommen [31].
- Das Modell überträgt die prozentuale Änderung der Strom- und Brennstoffintensität auf Wirtschaftszweigebe auf die spezifischen Strom- und Brennstoffverbräuche der Prozesse. Das Referenzmodul berücksichtigt demgemäß die hinterlegten Effizienzgewinne auf Wirtschaftszweigebe auch bei den spezifischen Prozessverbräuchen.

Die Entwicklung des strom- und brennstoffscharfen Querschnittsverbrauchs resultiert schließlich nach Gleichung (3-10) aus dem Strom- und Brennstoffverbrauch auf Wirtschaftszweigebe abzüglich dem der Prozesse je Wirtschaftszweig:

$$E_{t,q} = E_{t,w} - E_{t,p,w} \quad (3-10)$$

$E_{t,q}$ (MWh) Strom- und Brennstoffverbrauch Querschnitt in Zeitschritt t

Energieträger- und anwendungsscharfer Prozess- und Querschnittsverbrauch

Die historischen energieträger- und anwendungsscharfen Verbräuche auf Wirtschaftszweigebe bilden die Grundlage, um zunächst die prozentuale Verteilung des Querschnitts- (1) und Prozessenergieverbrauch (2) nach Energieträgern und Anwendungen für die Basisjahre zu ermitteln. Die prozentuale Verteilung dient als Basis zur anschließenden Berechnung des absoluten energieträger- und anwendungsscharfen Querschnitts- und Prozessverbrauchs der Folgejahre.

Um den energieträger- und anwendungsscharfen Querschnittsverbrauch (1) der historischen Basisjahre zu berechnen, ist der aggregierte Prozessenergieverbrauch je Wirtschaftszweig vom Gesamtenergieverbrauch des Wirtschaftszweigs abzuziehen. Da die Anwendungsaufteilung auf Prozessebene nicht vorliegt, ist der Wirtschaftszweigverbrauch zunächst zeitweilig um die Dimension der Anwendungsaufteilung zu reduzieren. Ist der energieträgerscharfe Querschnittsverbrauch ermittelt, schlüsselt ihn das Referenzmodul anschließend mit der prozentualen Anwendungsverteilung je Energieträger auf Wirtschaftszweigebe erneut auf die Anwendungen:

$$pw_{hz} = pw_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{\sum_{j=1}^{aw} a_{i,j}} \text{ mit } a_{i,j} \in \underline{A}: \{1, \dots, et\} \times \{1, \dots, aw\} \rightarrow D(i,j) \mapsto a_{i,j} \quad (3-11)$$

$$E_{q,w} = \sum_{j=1}^{aw} \left(E_{w,j} - \sum_{e=1}^{pw} \vec{E}_{p,w,e} \right) \cdot pw_w \quad (3-12)$$

$pw_{hz} = pw_{i,j}$ (%)	Prozentuale horizontale Verteilung je Element der Matrix \underline{A}	$E_{w,j}$ (MWh)	Energieträgeranwendungsmatrix je Wirtschaftszweig
pw_w (%)	Prozentuale Verteilung Anwendungen je Wirtschaftszweig	$\vec{E}_{p,w,e}$ (MWh)	Vektor mit Prozessenergie nach Energieträgern je Wirtschaftszweig
$a_{i,j}$ (div)	Element a der Matrix \underline{A} in Zeile i und Spalte j	$\vec{E}_{e,p,w}$ (MWh)	Vektor mit Energieträgerverteilung je Prozess und Wirtschaftszweig
$E_{q,w}$ (MWh)	Energieträgeranwendungsmatrix Querschnittsverbrauch je Wirtschaftszweig	pw_w (dl)	Anzahl Prozesse je Wirtschaftszweig

Die ermittelten Matrizen schaffen die Grundlage, um nach der allgemeingültig formulierten Gleichung (3-13) die prozentuale Verteilung des energieträger- und anwendungsscharfen Querschnittsverbrauchs zu berechnen:

$$pw_g = p_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{\sum_{i=1}^{et} \sum_{j=1}^{aw} a_{i,j}} \text{ with } a_{i,j} \in \underline{A}: \{1, \dots, et\} \times \{1, \dots, aw\} \rightarrow D(i, j) \mapsto a_{i,j} \quad (3-13)$$

$pw_g = pw_{i,j}$ (%)	Prozentuale gesamte Verteilung je Element der Matrix \underline{A}	$\underline{E}_{w,j}$ (MWh)	Prozentuale gesamte Verteilung je Element der Matrix \underline{A}
-----------------------	--	-----------------------------	--

Um den energetischen Prozessverbrauch je Wirtschaftszweig und Anwendung zu ermitteln, wird zunächst der berechnete Querschnittsverbrauch vom Wirtschaftszweigverbrauch je historischem Basisjahr abgezogen. Der energie- und anwendungsscharfe Prozessverbrauch wird anschließend mittels prozentualem Anteil je Energieträger auf die Einzelprozesse je Wirtschaftszweig realloziert (vgl. Gleichung (3-14) & (3-15)). Es resultieren die energieträger- und anwendungsscharfe Prozessverbräuche (2) der historischen Basisjahre:

$$\overline{pw} = p_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^d a_i} \text{ with } a_i \in \vec{A}: \{1, \dots, et\} \rightarrow D(i, j) \mapsto a_{i,j} \quad (3-14)$$

$$\underline{E}_p = (\underline{E}_w - \underline{E}_{q,w}) \cdot \overline{pw} \quad (3-15)$$

\underline{E}_p (MWh)	Energieträgeranwendungsmatrix je Prozess	$\overline{pw} = p_i$ (%)	Prozentuale Verteilung je Element des Vektors \vec{A}
-------------------------	--	---------------------------	---

Wiederum aus Gleichung (3-13) folgt die prozentuale Verteilung des energieträger- und anwendungsscharfen Prozessverbrauchs der historischen Basisjahre.

Um den energie- und anwendungsscharfen Prozess- und Querschnittsverbrauch im Referenzmodul für die Folgejahre abzuleiten, wird die prozentuale Verteilung des Energieverbrauchs je Anwendung und Energieträger des letzten verfügbaren Basisjahres beibehalten. Der Prozess- und Querschnittsverbrauch ergibt sich nach Gleichung (3-16):

$$\underline{E}_{t,p|q} = \underline{pw}_{t_{hl},p|q} \cdot \underline{E}_{t,p|q} \text{ für } t > t_{hl} \quad (3-16)$$

$\underline{E}_{t,p|q}$ (MWh)	Matrix mit energieträger- und anwendungsscharfen Prozess- und Querschnittsverbräuchen	$\underline{pw}_{t_{hl},p|q}$ (%)	Prozentuale Verteilung des energieträger- und anwendungsscharfen Prozess- bzw. Querschnittsverbrauchs des letzten historischen Basisjahrs
$\underline{E}_{t,p|q}$ (MWh)	Übergeordneter Strom- und Brennstoffentwicklung Prozess- und Querschnittsverbrauch		

Anhand des Querschnittsverbrauchs ermittelt das Referenzmodul einen unteren Grenzwert für die Strom- und Brennstoffintensität im Technologiemitxmodul. Als Aufteilungsschlüssel der Bruttowertschöpfung fungiert der Energieanteil. Die minimale Strom- und Brennstoffintensität addiert sich zur minimalen Energieintensität je Querschnitt (vgl. Gleichungen in (3-17)).

$$BWS_{t,p|q} = \frac{E_{t,p|q}}{E_{t,w}} \cdot BWS_{t,w} \quad (3-17)$$

$$ei_{t,min,q} = \min \frac{E_{t,q,st}}{BWS_{t,q}} + \min \frac{E_{t,q,bs}}{BWS_{t,q}}$$

$BWS_{t,p,q}$ (€)	Bruttowertschöpfung Prozesse und Querschnitts auf Wirtschaftszweigebene	$ei_{t,min,q}$ (%)	Grenzwert Energieintensität des Querschnitts auf Wirtschaftszweigebene
$E_{t,q,st}$ (MWh)	Stromverbrauch Querschnitt	$E_{t,q,bs}$ (MWh)	Brennstoffverbrauch Querschnitt

Der energieträger- und anwendungsscharfe Energieverbrauch auf Wirtschaftszweigebene geht schließlich nach Gleichung (3-18) aus der jährlichen bottom-up Aggregation von Prozess- und Querschnittsverbrauch hervor:

$$\underline{E}_{t,w} = \underline{E}_{t,p} + \underline{E}_{t,q} \quad (3-18)$$

$\underline{E}_{t,w}$ (MWh) Matrix mit energieträger- und anwendungsscharfen Verbräuchen auf Wirtschaftszweigebene

Zeitliche Auflösung energieträger- und anwendungsscharfer Verbräuche

Auf Basis der jahresspezifischen Energieverbräuche im Referenzmodul werden die im Modell enthaltenen, nach realen Daten synthetisierten, normierten Lastgängen mit dem anwendungs- und energieträgerscharfen Wirtschaftszweigverbrauch multipliziert [27]. Es liegen normierte Lastprofile mit Stundenauflösung nach [38] für Strom, Brennstoffe sowie energieträgerunabhängig für Raumwärme und Warmwasser vor. Im Gegensatz zu [27] erzeugt das Modell zeitabhängige Energiedaten je Anwendung und Energieträger. Die Lastgänge resultieren aus der Matrixmultiplikation energieträger- und anwendungsscharfer Verbräuche mit normierten Lastprofilen. Tabelle 3-2 weist die Zuordnung verfügbarer Lastprofile zu den Anwendungen aus.

Tabelle 3-2: Lastgangskonstruktion in Abhängigkeit der Anwendung und des synthetischen normierten Lastprofils

Energieträger		Strom										Brennstoffe			
		Raumwärme	Warmwasser	Prozesswärme	Druckluft	Pumpen	Sonst. mech. Energie	IKT	Prozesskälte	Klimakälte	Beleuchtung	Raumwärme	Warmwasser	Prozesswärme	Mechanische Energie
Normiertes Lastprofil	Raumwärme, Warmwasser	x*	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o	o
	Strom	o	o	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
	Brennstoffe	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x

*x: Trifft zu, o: Trifft nicht zu

Insgesamt entstehen bei neun Brennstoffen und vier Anwendungen 36 Brennstofflastgänge. Aus zehn Stromanwendungen folgen ferner zehn Stromlastgänge.

Neben den Lastgängen auf Wirtschaftszweigebene generiert Smlnd Lastgänge auf Prozessebene. Da bislang keine lückenlos erfassten Referenzlastprofile je Prozess vorliegen, ergeben sich die Lastgänge ebenfalls durch die Multiplikation normierter Wirtschaftszweiglastprofile mit den absoluten jahresspezifischen Prozessenergieverbräuchen.

3.2.2 Emissionsentwicklung im Referenzmodul

Die energiebedingten Emissionen ermittelt Smlnd anhand der Multiplikation von zeitabhängigen energieträgerscharfen Verbräuchen und Emissionsfaktoren abzüglich der abgeschiedenen CO₂-Emissionen. Die prozessbedingten Emissionen auf Prozessebene ergeben sich bottom-up durch die Multiplikation der im Referenzmodul exogen vorgegebenen prozessspezifischen Paramatern „prozessbedingter Emissionsfaktor“ und „Produktionsmenge“ (vgl. [27]). Die CO₂-Abscheidung ist im Referenzmodul nicht zugelassen. Da die holotische Abdeckung der prozessbedingten Emissionen auf Prozessebene bisher nicht möglich ist, werden die verbleibenden Prozessemissionen top-down anhand des nationalen Inventarberichts auf die Wirtschaftszweige verteilt [32]. Die nach Gleichung (3-4) berechneten prospektiven prozessbedingten Emissionen auf Prozessebene schaffen die Grundlage, um die aus dem nationalen Inventarberichten stammenden prozessbedingten Emissionen auf Prozess- und Querschnitt zu verteilen. Die jeweilige Methode hängt davon ab, ob dem jeweiligen Wirtschaftszweig Prozesse zugeordnet sind.

- Dem Wirtschaftszweig sind Prozesse zugeordnet (F1): Die prospektiven Prozessemissionen auf Wirtschaftszweigebene ergeben sich durch die Multiplikation der gewichtet gemittelten Änderungsrate prozessbedingter Emissionen *über die wirtschaftszweigspezifischen Prozesse* je Stützjahr (vgl. Gleichung (3-5)) und den Prozessemissionen des Wirtschaftszweigs des letzten, historischen Basisjahr.
- Dem Wirtschaftszweig sind keine Prozesse zugeordnet (F2): Die zukünftigen Prozessemissionen auf Wirtschaftszweigebene ergeben sich durch die Multiplikation der gewichtet gemittelten Änderungsrate prozessbedingter Emissionen *über alle im Modell hinterlegten Prozesse* je Stützjahr und den Prozessemissionen des Wirtschaftszweigs im letzten, historischen Basisjahr.

Gleichung (3-19) teilt die prozessbedingten Emissionen analog zum Energieverbrauch in prozessbedingte Querschnitts- und Prozessemissionen auf:

$$pem_{t,qw} = pem_{t,w} - pem_{t,pw} \quad (3-19)$$

pem_{qw} (tCO ₂) Prozessbedingte Emissionen Querschnittsebene	pem_w (tCO ₂) Prozessbedingte Emissionen Wirtschaftszweigebene
pem_{pw} (tCO ₂) Prozessbedingte Emissionen der Prozesse je Wirtschaftszweig	

Die Aufschlüsselung der Prozessemissionen auf die Ebenen im Modell birgt zweifachen Nutzen:

1. Das Vorgehen ermöglicht es die Prozessemissionen weiterhin bottom-up über die Aktivitätsgrößen „Prozessemissionsfaktor (tCO₂/t_p)“ und „Produktionsmenge“ je Prozess zu berechnen und anschließend auf Wirtschaftszweigebene zu aggregieren.
2. Trotz nur teilweiser Prozessabbildung können durch die Trennung die Prozessemissionen auf Wirtschaftszweigebene im Technologiemitmixmodul auf Basis des Referenzmoduls top-down fortgeschrieben werden.

Die Prozessemissionen je Wirtschaftszweig setzen sich folglich aus dem prozessbedingten Querschnitt und den prozessspezifischen Prozessemissionen zusammen. Eine Validierungsfunktion stellt sicher, dass die über Aktivitätsgrößen berechneten

prozessbedingten Emissionen je Prozess und Wirtschaftszweig die Prozessemissionen auf Wirtschaftszweigebeene nicht übersteigen.

3.2.3 Energieträger- und Technologiekosten

Der Energieträgerkosten resultieren aus der Multiplikation energieträgerscharfer Energieverbräuche und exogener Energieträgerkosten [27]. Das Berechnen der Energieträgerkosten erfolgt sowohl auf Prozess-, als auch auf Wirtschaftszweigebeene. Das Referenzmodul setzt keine zusätzlichen THG-Verminderungstechnologien um, weshalb auch keine zusätzlichen Technologiekosten anfallen.

3.2.4 Produktionsanlagen und Technologieumsetzung mit Altersstruktur sowie THG-Verminderungsmaßnahmen

Das Referenzmodul erfasst zum einen den Prozessbestand, zum anderen die Technologieumsetzung mit Altersstruktur. Dabei implementiert das Referenzmodul keine zusätzlichen individuellen THG-Verminderungsmaßnahmen. Der künftige Energieverbrauch und die Emissionen resultieren vielmehr durch die vorherig beschriebenen generischen Methoden. Dennoch beinhalten die im Referenzmodul konstruierten Referenzszenarien einen generischen Effizienzfortschritt, der von Effizienzgewinnen exogener Szenarien herrührt. Dieser generische Prozess- und Querschnittstechnologie übergreifende Effizienzfortschritt kann einzelnen Maßnahmen bzw. Technologien nicht zugeordnet werden. Die Referenzszenarien gehen deshalb davon aus, dass der Anwendungsgrad⁸ einer THG-Verminderungstechnologie oder -maßnahme zeitunabhängig ist und dementsprechend nach Gleichung (3-20) konstant bleibt:

$$AWG_{t_0} = AWG_t \quad (3-20)$$

| AWG (dl) Anwendungsgrad einer Technologie, Basisjahr (t_0) und weitere Simulationsjahre (t) |

Dennoch erfasst die Referenz, neben den durch die Produktionsmenge reflektierten Prozessen, den aktuellen Technologiebestand mittels „eingefrorenem“ Anwendungsgrad und veränderlichem Umsetzungsparameter⁹ je THG-Verminderungsmaßnahme. Durch diese Annahme kann das Referenzmodul den hinterlegten Technologiebestand ermitteln.

Die im Modell hinterlegten Maßnahmenkategorien selbst sowie die Technologiekategorien und zugrundeliegenden Umsetzungsparameter je Maßnahmenkategorie zeigt Abbildung 3-3.

⁸ Der Anwendungsgrad beschreibt das zum Zeitpunkt t vorhandene Potenzial zur Umsetzung von Maßnahmen, Technologien oder Prozessen. Der Parameter liegt dementsprechend im Wertebereich zwischen 0 und 1 und bildet die komplementäre Menge zum Umsetzungsgrad.

⁹ Der Umsetzungsparameter dient als Grundlage, um die im Modell implementierten Maßnahmen und Technologien zu beschreiben. Je nach Technologie und Maßnahme sind verschiedene Umsetzungsparameter zu unterscheiden (vgl. Abbildung 3-3)

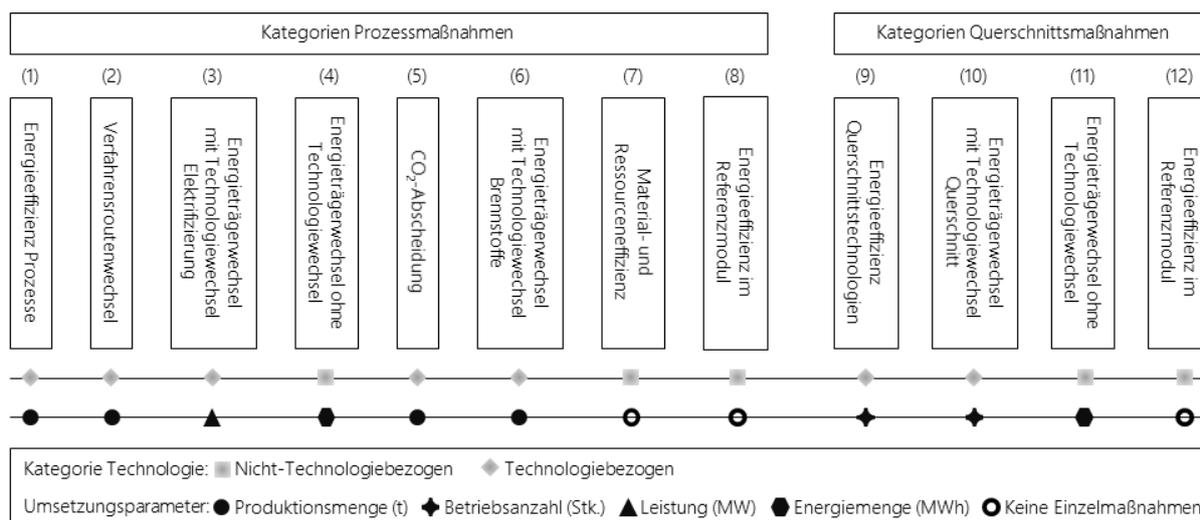


Abbildung 3-3: Maßnahmenkategorien, Technologiekategorisierung und zugrundeliegende Umsetzungsparameter im Modell

Verschiedene zugrundeliegende Umsetzungsparameter dienen zur Erfassung des aktuellen Technologiebestandes. Beispielsweise fungiert die Produktionsmenge, die Anzahl der Betriebe oder die installierte Leistung je Prozess oder Einzeltechnologie als Parameter, der den Umsetzungsgrad¹⁰ wiedergibt. Smlnd ermittelt den Technologiebestand technologiebezogener THG-Verminderungsmaßnahmen (1), (3), (5), (6), (9), (10). Maßnahmen ohne Technologiewechsel bleiben demgemäß außen vor (4), (7), (8), (11), (12). Maßnahmenkategorie (2) bezieht sich auf den gesamten Prozess und ist dementsprechend bereits durch die produktionsspezifische Prozessmodellierung berücksichtigt. Technologien der dritten Maßnahmenkategorie (3) weisen in den historischen Basisjahren annahmegemäß einen Umsetzungsgrad von Null auf und sind im Referenzmodul dementsprechend zu vernachlässigen.

Das Referenzmodul erweitert den bis zu diesem Punkt altersunabhängigen Technologiebestand je Umsetzungsparameter um eine Altersstruktur. Da Altersstrukturdaten von Anlagen und Technologien in der Industrie nur begrenzt zur Verfügung stehen, verwendet Smlnd zur Ableitung der Altersstruktur je Technologie einen heuristischen Algorithmus.

Zur Konstruktion einer Altersstruktur für technologiebezogene Maßnahmen sind zwei Kategorien zu unterscheiden: Prozess- (1) und Querschnittstechnologien (2).

Da Datensätze zu den vollumfänglichen Produktionskapazitäten industrieller Prozesse bislang nicht vorliegen, dient die mit einer Technologie produzierte Menge eines industriellen Gutes als Grundlage zur Konstruktion des Technologiebestandes von Prozesstechnologien (1). Entsprechend ergibt sich der Technologiebestand nicht wie zu erwarten über Produktionskapazitäten oder anlagenspezifische Parameter, sondern über die zur Verfügung stehenden generischen Prozessproduktionsmengen. Produktionskapazitäten würden zusätzlich einen Rückschluss auf die tatsächlichen Produktionsanlagen und die Auslastung erlauben.

¹⁰ Der Umsetzungsgrad beschreibt das zum Zeitpunkt t vorhandene Ausmaß der Implementierung von Maßnahmen, Technologien oder Prozessen. Der Parameter liegt dementsprechend im Wertebereich zwischen 0 und 1 und bildet die komplementäre Menge zum Anwendungsgrad.

Um den prozessspezifischen Technologiebestand je Prozess und THG-Verminderungstechnologie im Basisjahr zu ermitteln, errechnet das Referenzmodul nach Gleichung (3-21) den Umsetzungsgrad auf Basis des literarisch erhobenen Anwendungsgrads. Anschließend wird die jahresspezifische Prozessproduktionsmenge nach Gleichung (3-22) mit dem Umsetzungsgrad multipliziert.

$$UMG_{t_0,tc} = 1 - AWG_{t_0,tc} \quad (3-21)$$

$$m_{t_0,tc} = m_{t_0,p} \cdot UMG_{t_0,tc} \quad (3-22)$$

$UMG_{t_0,tc}$ (dl)	Umsetzungsgrad einer Technologie	$AWG_{t_0,tc}$ (dl)	Anwendungsgrad einer Technologie
$m_{t_0,tc}$ (t)	Produktionsmenge, die mit Technologie produziert wird in Zeitschritt t_0	$m_{t_0,p}$ (t)	Produktionsmenge des Produktionsprozesses in Zeitschritt t_0

Bei Verfahrensrouten bildet die gesamte Prozessproduktionsmenge den Technologiebestand. Die Methode ist auch für Technologien anwendbar, die nicht den gesamten Produktionsprozess betreffen¹¹. Smlnd ermittelt in diesem Zusammenhang die bspw. mit einzelnen Effizienztechnologien wie optimierte Steuerungs- und Leitsysteme erzeugte Produktionsmenge.

Die literarisch erhobene Lebensdauer je Technologie fungiert als zugrundeliegender Parameter, um eine Altersstruktur des Technologiebestandes zu konstruieren. Bei individuellen Technologien wie Effizienzmaßnahmen liegen die Lebensdauern in der Maßnahmenmatrix bereits vor. Produktionsprozesse nutzen den nach Gleichung (3-23) über alle Technologielebensdauern je Prozess gebildeten Median als Grundlage [36].

$$\tilde{ld}_{0,5} = \begin{cases} ld_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} & \text{falls } c = \frac{n+1}{2}, c \in \mathbb{N} \\ \frac{1}{2} \cdot \left(ld_{\left(\frac{n}{2}\right)} + ld_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right) & \text{falls } c = \frac{n}{2}, c \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (3-23)$$

$\tilde{ld}_{0,5}$ (a)	Median der Lebensdauern aller hinterlegten Technologien eines Prozesses	n (dl)	Anzahl der Technologien je Prozess
------------------------	---	----------	------------------------------------

Mangels Altersstrukturdaten des industriellen Anlagenparks im Status Quo, werden die zuvor ermittelten Produktionsmengen je Technologie und Prozess in den historischen Basisjahren gleichmäßig auf die Lebensdauer verteilt. Die Altersstruktur des Produktions- und Technologiebestandes resultiert demgemäß nach Gleichung (3-24) aus der Multiplikation von Produktionsmenge je Technologie und dem Kehrwert der Lebensdauer. Es resultiert ein Vektor mit gleichmäßig über die Lebensdauer verteilten Produktionsmengen je Technologie.

$$\vec{m}_{t_0,A,tc} = \frac{1}{ld} \cdot m_{t_0,tc} \text{ mit den Indices } A = \{1 \dots ld\}, \quad A \in \mathbb{N} \quad (3-24)$$

ld (a)	Lebensdauer je Technologie	$\vec{m}_{t_0,A,tc}$ (t)	Produktionsmengenvektor mit Altersstruktur je Technologie im Basisjahr
----------	----------------------------	--------------------------	--

Der über die historischen Basisjahre hinausgehenden Prozess- und Technologiebestand mit Altersstruktur wird mittels „First In, First Out“-Prinzip (FIFO) [39] und der exogenen Produktionsmengenänderung im Referenzmodul konstruiert. Zur Fortschreibung der Altersstruktur in den weiteren Simulationsjahren wird die jeweilige Produktionsmenge am Lebensende jahresspezifisch durch Reinvestition ersetzt. Da der Umsetzungsgrad im

¹¹ Methode daneben anwendbar für „Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel“ (6) und „CO₂-Abscheidung“ (5)

Referenzmodul annahmegemäß konstant ist, verändert sich der Prozess- und Technologieausstattung lediglich durch die jahresabhängig schwankende exogene Produktionsmenge. Nach dem FIFO-Prinzip wirkt die sich ändernde Produktionsmenge stets zuvörderst auf die älteren Anlagen. Die erforderliche sich ändernde Produktionsmenge des Prozess- und Technologiebestandes berechnet zunächst Gleichung (3-25):

$$\Delta m_{t,tc} = (m_{t,p} - m_{t-1,p}) \cdot UMG_{t_0,tc} \quad (3-25)$$

$\Delta m_{t,tc}$ (t)	Produktionsmengenänderung der Technologie tc zum Zeitpunkt t im Bestand	$\{m_{t,p}, m_{t-1,p}\}$ (t)	Produktionsmenge des Prozesses p zu den Zeitpunkten t und t-1
-----------------------	---	------------------------------	---

Das Modell weist Verfahrensrouten den Umsetzungsgrad „1“ zu. Die Konstruktion des prospektiven Anlagenparks erfolgt dementsprechend in Abhängigkeit der vollständigen Produktionsmengenänderung des Prozesses. Ist die Änderung der Produktionsmenge ($\Delta m_{t,tc}$) positiv, gilt:

$$m_{t,tc,1} = m_{t-1,tc,ld} + \Delta m_{t,tc} \quad (3-26)$$

$$\vec{m}_{t,tc,c} = \vec{m}_{t-1,tc,d} \text{ mit den Indices } c = \{2 \dots ld\} \text{ und } d = \{1 \dots ld - 1\}, \{c, d\} \in \mathbb{N}$$

$m_{t,tc,1}$ (t)	Masse des Produktionsgutes im Prozess- oder Technologiebestand von tc zum Zeitpunkt t an Stelle 1 des Altersstrukturvektors	$\vec{m}_{t,tc,c}$ (t)	Masse des Produktionsgutes im Prozess- oder Technologiebestand von tc zum Zeitpunkt t an den Stellen c des Altersstrukturvektors
c und d (dl)	Indices des Altersstrukturvektors	ld (a)	Lebensdauer der Technologie

Die positive Delta-Produktionsmenge wird zur Produktionsmenge addiert, die auf der ältesten Anlage oder Technologie des Vorjahres ($m_{t-1,tc,ld}$) produziert wird. Im Referenzmodul wird davon ausgegangen, dass die ältesten Anlagen in gleichem Maße durch neue Anlagen bzw. Technologien ersetzt werden. Die durch die positive Produktionsmengenänderung entstandene zusätzliche Produktionsmenge verursacht zusätzliche Investitionen im aktuellen Jahr, die sich in der auf neuen Anlagen produzierten Produktionsmenge widerspiegelt.

Ist die Änderung der Produktionsmenge ($\Delta m_{t,tc}$) negativ, muss nach dem FIFO-Prinzip zunächst die Produktionsmenge bestimmt werden, die auf den ältesten Produktionsanlagen produziert wird und durch die negative Produktionsmenge entfällt. Der hinterlegte Vektor zur Altersstruktur ist umzukehren, um die sich ändernde Produktionsmenge der ältesten Anlagen addieren zu können. Die Zählvariable c erhöht sich solange, bis die Summe der originären Produktionsmenge je Anlagenalter dem Betrag der abzuziehenden Produktionsmenge entspricht. Die Formeln in (3-27) definieren den sich ergebenden Vektor abschnittsweise. S_{mlnd} reinvestiert die eventuell verbleibende Menge des letzten Anlagenalters und übernimmt sie in das neue Jahr. Der Rest des Strukturvektors altert um ein Anlagenjahr und verschiebt sich dementsprechend nach Gleichung (3-28) (rollierendes Prinzip).

$$um_{t-1,tc} = m_{t-1,tc,g} \text{ mit } g = \{ld \dots 1\}, g \in \mathbb{N}$$

$$c = c + 1, \text{ bis gilt: } \sum_{j=1}^c um_{t-1,tc,j} \geq |\Delta m_{t,tc}| \text{ mit } c \in \mathbb{N}$$

$$vm_{t,tc,i} = \begin{cases} 0 & ld - c + 1 > i \leq ld \text{ mit } \{ld, i, c\} \in \mathbb{N} \\ \sum_{j=1}^c um_{t-1,tc,j} + \Delta m_{t,tc} & i = ld - c + 1 \text{ mit } \{i, c\} \in \mathbb{N} \\ m_{t-1,tc} & 1 \leq i \leq ld - c \text{ mit } \{i, c\} \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (3-27)$$

$$m_{t,tc,1} = vm_{t,tc,ld} \quad (3-28)$$

$$m_{t,tc,p} = vm_{t,tc,d} \text{ mit den Indices } p = \{2 \dots ld\} \text{ und } d = \{1 \dots ld - 1\}, \{p, d\} \in \mathbb{N}$$

um_{tc}	(t)	Umgekehrter Massenvektor der Technologie	$vm_{t,tc,i}$	(t)	Abschnittsweise (Index i) definierte Altersstruktur des Produktionsvektors der Technologie tc nach Abzug der Produktionsmengenänderung
c	(dl)	Zählvariable			

Das FIFO-Funktionsprinzip sowie eine beispielhafte Matrix mit Prozess- bzw. Technologiebestand und Altersstruktur zeigt Tabelle 9-19 im Anhang.

Querschnittsmaßnahmen (2) nutzen zur Konstruktion des Technologiebestandes den Umsetzungsparameter „Anzahl der Betriebe“ je Technologie. Die Methoden zur Berechnung des Technologiebestandes mit Altersstruktur folgen den Methoden auf Prozessebene. Die Erzeugung des altersstrukturierten Technologiebestandes je Querschnittsmaßnahme ermöglicht es eine Aussage über den Umsetzungsgrad und die Reinvestitionszyklen von Querschnittstechnologien auf Unternehmensebene treffen zu können.

Eine besondere Rolle nehmen industrielle Brennertechnologien ein, da diese bestimmen, welche Brennstoffe ohne Technologiewechsel in der Industrie einsetzbar sind. Im Referenzszenario sind Brennstoffmatrizen je Produktionsprozess hinterlegt, die Brennstoffwechsoptionen beinhalten. Das Modell unterscheidet bisher zwei Brennertypen. In Tabelle 3-3 ist die Matrix für den als Standardmodell definierten Brenner hinterlegt, der lediglich einen Wechsel von fossilen konventionellen Brennstoffen auf gleichwertige erneuerbare synthetische Brennstoffen und Biomasse zulässt.

Tabelle 3-3: Angenommene Brennstoffmatrix für die Standardversion einer industriellen Brennertechnologie

Energieträger	Wechsel zu								
	Fossiles Öl	Fossile Gase	Fossile Kohlen	Biomasse	Sonstige Brennstoffe	Synth. Gase*	Wasserstoff	Synth. Kohlen*	Synth. Öl*
Fossiles Öl	x**	o	o	o	o	o	o	o	x
Fossile Gase	o	x	o	o	o	x	o	o	o
Fossile Kohlen	o	o	x	x	o	o	o	x	o
Biomasse	o	o	x	x	o	o	o	x	o
Sonstige Brennstoffe	o	o	x	x	x	o	o	x	o
Synth. Gase*	o	x	o	o	o	x	o	o	o
Wasserstoff	o	o	o	o	o	o	x	o	o
Synth. Kohlen*	o	o	x	x	o	o	o	x	o
Synth. Öl*	x	o	o	o	o	o	o	o	x

*Synthetische gasförmige, flüssige und feste Kohlenwasserstoffe **

x: Wechsel ist ohne Technologiewechsel möglich, o: Wechsel ist ohne Technologiewechsel nicht möglich

Das Modell unterscheidet Brennermatrizen auf Prozess- und Querschnittsebene. Die Brennermatrizen werden in Kombination mit deren jeweiligem Anteil auf Prozess- oder Querschnittsebene hinterlegt. In der Klinkerproduktion wird etwa davon ausgegangen, dass 80 % der Drehrohröfen als Multi-Fuel- und nur 20% als konventionelle Brenner ausgeführt sind. Konventionelle Brenner werden als in der Brennstoffwahl begrenzt definiert (vgl. Tabelle 9-18).

3.2.5 Massenbilanz und homogene Produkte im Referenzmodul

Um die Auswirkungen nicht-energetischer Parameter auf den Energieverbrauch und die Emissionen zu untersuchen, werden weiterhin prozessspezifische Massenbilanzen hinterlegt. Eine Matrix mit den Eingangs- und Ausgangsgrößen je Prozess bildet die Massenbilanz. Beispielsweise fallen bei der Primärstahlproduktion pro Tonne Stahl etwa 0,31 t Hüttensand an [40], [41], [42]. Die prozentuale Verteilung der historischen Eingangs- und Ausgangsgrößen im Referenzmodul dient nebst dem zur Fortschreibung der Massenbilanzen über die Basisjahre hinaus. Die prozessspezifischen Massenbilanzen ermöglichen die modellhafte Verknüpfung von Material- und Produktionsflüssen. Abbildung 3-4 visualisiert modellierte Effekte der verknüpften industriellen Wertschöpfungsketten am Beispiel der Zement- und Stahlindustrie mit Fokus auf Hüttensand und Klinker.

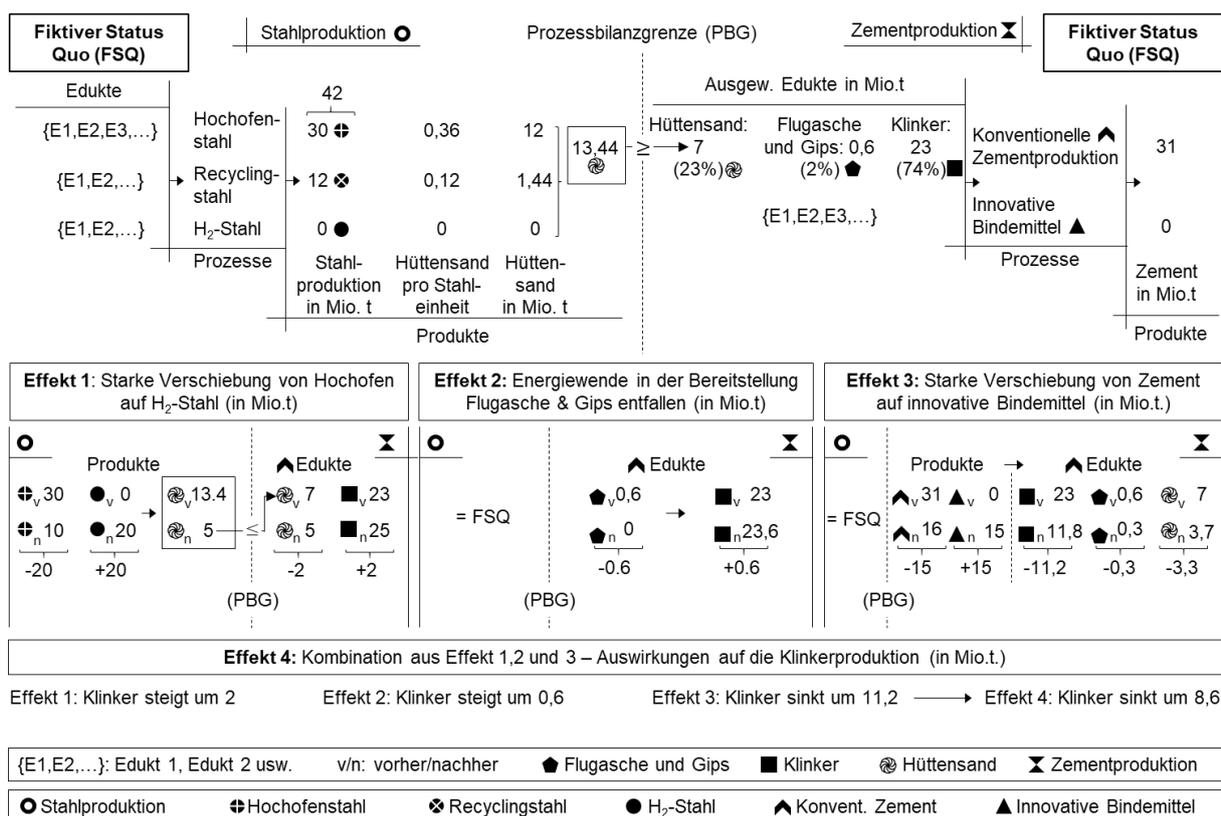


Abbildung 3-4: Effekte der verknüpften industriellen Wertschöpfungsketten im Modell am Beispiel der Zement- und Stahlindustrie mit Fokus auf Hüttensand und Klinker

In den meisten Prozessen ändert sich die prozentuale Verteilung der Massenbilanz durch die Umsetzung von THG-Verminderungsmaßnahmen nicht. Insbesondere ist jedoch der Effekt in der Zementindustrie durch den Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie und des damit verbundenen verminderten Hüttensandkontingents berücksichtigt. Das Referenzmodul setzt voraus, dass der prozentuale Anteil des Materialausschusses und der Exportanteil in der

Klinkerproduktion konstant bleiben. Dies gilt ebenso für die Materialien Ölschiefer, Trass, natürlichen Gips, natürlichen Anhydrit und Sonstige Edukte zur Zementherstellung. Die in der Zementindustrie verwendeten Materialien Flugasche und Gips aus der Rauchgasentschwefelung entstehen jedoch überwiegend im Energie- und Umwandlungssektor bei der Verbrennung von Steinkohle und Braunkohle [43]. Da diese Materialien mit dem beschlossenen Kohleausstieg in Deutschland [44], [45], [46] nicht mehr ausreichend zur Verfügung stehen, geht auch das Modell vom vollständigen Rückgang bis 2038 aus. Dementsprechend ändert sich der Anteil von Flugasche- und Gips aus Rauchgasentschwefelung im Referenzmodul in Abhängigkeit des vorgegebenen Transformationspfads der Bereitstellung. Die Verfügbarkeit von Hüttensand hängt hingegen hauptsächlich von den Verfahrensrouten und den Produktionsmengen der deutschen Stahlindustrie ab. Sinken die zunehmend geringeren Mengen verfügbaren Materialien wie Flugasche und Hüttensand unter den Produktionswert, der für die exogen hinterlegte Zementproduktionsmenge benötigt wird, findet ein Ausgleich durch die Erhöhung der inländischen Klinkerproduktion statt. Infolgedessen steigt der Klinker-Zementfaktor, der den prozentualen Anteil von inländisch produzierten Klinker an der Zementproduktion in Deutschland wiedergibt. Die Struktur der Zementbilanz enthält Tabelle 9-17 im Anhang.

Neben dem Konzept der Massenbilanz definiert das Modell homogene Produkte. Homogene Produkte fassen industrielle Güter verschiedener Verfahrensrouten zusammen. Beispielsweise produzieren sowohl der Hochofen als auch der Elektrolichtbogenofen Stahl. Das Modell vernachlässigt bei dieser Methode etwaige Qualitätsunterschiede. Das Konzept ermöglicht den Wechsel zwischen Verfahrensrouten im Technologiemitmixmodul. Die Zuordnung der Prozesse zu den übergeordneten homogenen Produktionsgütern zeigt Tabelle 9-10 im Anhang.

3.2.6 Datensätze im Referenz- als Grundlage für das Technologiemitmixmodul

Das Technologiemitmixmodul verwendet die Anzahl deutscher Betriebe als wesentliches Kriterium zur Umsetzung von Querschnittsmaßnahmen. Daher schreibt das Referenzmodul die Betriebsanzahl anhand der Bruttowertschöpfung je Wirtschaftszweig basierend auf Realdaten der historischen Basisjahre fort. Die Änderungsrate der Bruttowertschöpfung ergibt sich nach Gleichung (3-4). Die prospektive Betriebsanzahl je Simulationsjahr berechnet das Modell nach Gleichung (3-5), indem es die Änderungsrate auf das letzte Basisjahr der Betriebsanzahl bezieht.

Das Referenzmodul setzt alternative Verfahrensrouten wie die Herstellung von Elektrogas nicht ein. Um auch für diese Verfahren modellseitig die literarisch nicht verfügbare Anwendungsverteilung auf Prozessebene zu erlangen, sind individuelle Methoden zu bemühen. Folgende Heuristik beschreibt das Vorgehen bei der Elektrifizierung brennstoffbasierter Prozesse. Als konkretes Beispiel dienen die Verfahrensrouten Hohlgas (Referenzroute) und Elektrohohlgas (alternative Route):

- Zunächst ist die Verteilung der Brennstoffanwendungsaufteilung von Hohlglas zu berechnen.
- Anschließend werden alle Brennstoffanwendungen außer die der Prozesswärme von Hohlglas zusammengefasst und deren jeweiliger prozentualer Anteil gebildet. Es ergeben sich die Anteile der Prozesswärme sowie der restlichen Anwendungen (P1) des Prozesses. Die Berechnung der prozentualen Prozesswärmeverteilung nach Temperaturniveau von Hohlglas beschließt den zweiten Schritt der Heuristik (P2).
- Darauffolgend ist die prozentuale Verteilung der Stromanwendungen mit Ausnahme der Prozesswärme (P3) von Hohlglas zu berechnen. Die Heuristik geht davon aus, dass die Anwendungsaufteilung aller Anwendungen mit Ausnahme der Prozesswärme bei der Elektrifizierung gleichbleiben.
- Die neue anwendungsbezogene Stromverteilung (P3) integriert die brennstoffbasierte Prozesswärmeverteilung des originären Prozesses. Die neue Stromverteilung von Elektrohohlglas verwendet hierzu zum einen die Prozesswärmeverteilung nach Temperaturniveau von Hohlglas (P2). Zum anderen multipliziert das Modell die neue Stromverteilung (P3) mit dem Anteil der restlichen Brennstoffanwendungen (P1). Die Heuristik nimmt an, dass der Prozesswärmeanteil bei der Elektrifizierung gleichbleibt und dementsprechend der Anteil verbleibender brennstoffbasierter Anwendungen auf die neue Stromverteilung übertragbar ist.

Die prozentuale Anwendungsaufteilung der H₂-Stahlerzeugung basiert annahmegemäß brennstoffseitig auf der Produktion von Hochofenstahl und stromseitig auf der Erzeugung von Sekundärstahl im Elektrolichtbogenofen.

3.3 Technologiemitmixmodul: Methoden zur Ableitung ambitionierter industrieller Transformationspfade mittels der Kombination individueller THG-Verminderungsmaßnahmen

Die im Technologiemitmixmodul berechneten Szenarien fußen auf dem Referenzmodul [27]. Kapitel 3.3.2 beschreibt die Integration der Referenzveränderung im Technologiemitmixmodul. Um prospektive energiewirtschaftliche Parameter der deutschen Industrie bei hohem Klimaschutzambitionsniveau ableiten und technologiespezifische Analysen durchführen zu können, fließen neben der Referenzentwicklung zusätzliche individuelle THG-Verminderungsmaßnahmen in das Technologiemitmixmodul ein (vgl. Kapitel 3.3.3). Abbildung 3-5 zeigt einleitend die übergeordneten Kategorien der THG-Verminderungsmaßnahmen des Modells. Die Maßnahmenkategorien verlangen individuelle Umsetzungsmechanismen, die ebenfalls Kapitel 3.3.3 beschreibt.

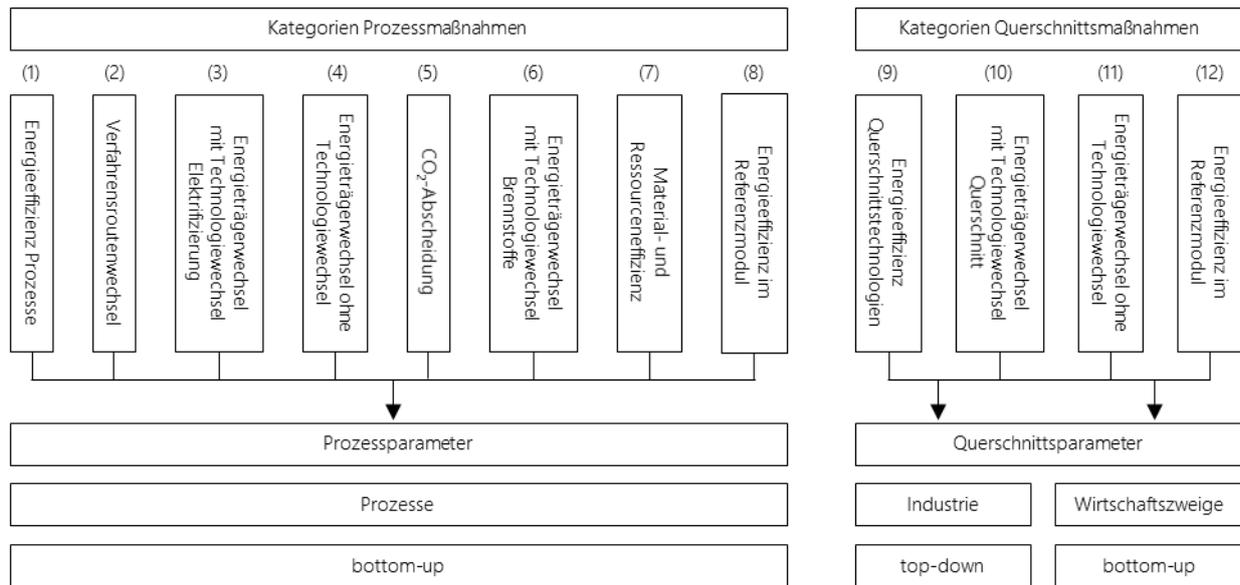


Abbildung 3-5: Maßnahmenkategorien, Wirkungsebene und Wirkungsart

Das Technologiemitmixmodul unterscheidet neun aktive THG-Verminderungskategorien (1), (2), (3), (4), (5), (6), (9), (10), (11). Von den aktiven sind drei passive Maßnahmenkategorien abzugrenzen, die keine individuellen Maßnahmen enthalten (7), (8), (12). Der Energieeffizienz des Referenzmoduls bedingt keine individuelle Maßnahmenumsetzung im Technologiemitmixmodul (8), (12). Die sich ändernde Material- und Ressourceneffizienz auf Prozessebene ist zudem lediglich indirekt über die veränderliche Produktionsmenge im Technologiemitmixmodul hinterlegt (7).

Im Vergleich zu [27] wird das Technologiemitmixmodul von Smlnd damit um die Maßnahmenkategorien (3) und (4) erweitert. Smlnd integriert weiterhin die vormals generische Effizienz auf Wirtschaftszweigebene in Maßnahmenkategorie (12).

Im Gegensatz zu [27] ist neben den zusätzlichen methodischen Erweiterungen (vgl. Kapitel 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3) weiterhin hervorzuheben, dass Interdependenzen der individuellen Maßnahmen und der energiewirtschaftlichen Parameter im gesamten Industriesystem bei der Umsetzung im Technologiemitmixmodul Berücksichtigung finden. Wird eine Maßnahme umgesetzt, beeinflusst sie damit technoökonomische Kennwerte der Industrie, konnotierte Parameter anderer individueller Maßnahmen und den weiteren Verlauf des industriellen Transformationspfads¹². Die individuelle Umsetzung einer Maßnahme beeinflusst folglich die weitere Maßnahmenumsetzung und damit den berechneten Industriepfad im Modell. Dies erfordert eine direkte Einbindung des Maßnahmeneffekts in die Umsetzungsentscheidung (vgl. Kapitel 3.3.3).

Durch die in Kapitel 3.1 beschriebenen Validierungs- und Plausibilisierungsfunktionen und den nachfolgend im Technologiemitmixmodul hinterlegten Restriktionen ist zudem im Vergleich zu [27] sichergestellt, dass alle energiewirtschaftlichen Parameter einen konsistenten industriellen Rahmen aufspannen. Beispielsweise ist gewährleistet, dass der aggregierte Energieverbrauch aller Prozesse eines Wirtschaftszweigs stets geringer als der Gesamtverbrauch des Wirtschaftszweigs ist.

¹² z.B. Energieverbrauch, Emissionen, Kosten und Produktionsmengen

Abweichend von [27] und dem Referenzmodul findet im Technologiemitmixmodul eine zeitabhängig kombinierte Auswertung energiewirtschaftlicher Parameter statt. Im Referenzmodul hingegen ergeben sich die energiewirtschaftlichen Parameter basierend auf den Eingangsdaten, top-down durch Fortschreibung oder bottom-up über Aktivitätsgrößen. Die Berücksichtigung von Interdependenzen einzelner Parameter erfolgt mit Ausnahme der Validierung und Plausibilisierung nicht.

3.3.1 Methoden zur Konstruktion der Datenstruktur im Technologiemitmixmodul

Um Technologiemitmixszenarien im Technologiemitmixmodul erstellen zu können, ist eine geeignete Datenstruktur zu wählen. Die modulübergreifend konsistente Datenstruktur je energiewirtschaftlichem Parameter ergibt sich durch die Konstruktion des Technologiemitmixmoduls basierend auf dem Referenzmodul.

Neben den energiewirtschaftlichen Parametern ist die in Kapitel 3.1 generierte zeitunabhängige THG-Verminderungsmaßnahmenmatrix um zeitabhängige Faktoren zu erweitern. So variiert der Anwendungsgrad alternativer Verfahrensrouten hinsichtlich des homogenen Produktionsgutes jahresabhängig. Beispielsweise unterscheidet sich der Anteil des im Elektrolichtbogenofen produzierten Sekundärstahls an der gesamt hergestellten Stahlmenge je Jahr. Je individueller Maßnahme kann eine über natürliche Reinvestitionszyklen hinausgehende, veränderte Umsetzungsgeschwindigkeit hinterlegt werden.

Überdies wird im Technologiemitmixmodul eine Matrix konstruiert und fortgeschrieben, die alle relevanten Parameter hinsichtlich der Umsetzung einer THG-Verminderungstechnologie enthält. Tabelle 9-21 im Anhang beschreibt den genauen Aufbau der Umsetzungsmatrix im Technologiemitmixmodul. Unter anderem basierend auf der Umsetzungsmatrix bestimmt das Modell die jahresspezifische Umsetzungsmenge. Die zugrundeliegenden Umsetzungsparameter der Maßnahmenmatrix richten sich nach der Maßnahmenkategorie (vgl. Abbildung 3-3).

Validierungs- und Plausibilisierungsfunktionen ergänzen die Konstruktions- und Erweiterungsmethoden des Technologiemitmixmoduls. Validierungsfunktionen stellen beispielsweise sicher, dass die Maßnahmenumsetzung frühestens nach dem letzten historischen Basisjahr beginnt.

3.3.2 Jahresspezifische Referenzveränderung und Initialisierung im Technologiemitmixmodul

Das Technologiemitmixmodul berücksichtigt die Veränderungen des Referenzmoduls. Die Referenzveränderungen des Technologiemitmixmoduls unterscheidet vier Parametertypen:

1. Nicht-Aktivitätsgrößen basiert und damit auch nicht bottom-up zu berechnende Parameter: z.B. Prozessverbrauch, Produktionsmenge, Querschnittsverbrauch, Prozessemissionen Querschnitt
2. Bottom-up/Top-down aus Aktivitätsgrößen zu berechnende Parameter: z.B. spezifischer Energieverbrauch, prozessbedingte Emissionen auf Prozessebene, Energieträgerkosten
3. Keine zu berücksichtigende Referenzveränderung bei Parameter vorhanden, nur maßnahmenbasierte Änderung im Technologiemitmixmodul: z.B. Brennermatrix, Umsetzungsmatrix
4. Gleichbleibende Parameter als exogene Eingangsgrößen im Technologiemitmixmodul: z.B. Bruttowertschöpfung, Betriebsanzahl

3.3.2.1 Nicht-Aktivitätsgrößenbasierte Fortschreibung der Referenzveränderung

Nicht-Aktivitätsgrößen basierte Parameter ergeben sich in der Referenzveränderung des Technologiemitmixmoduls allgemein nach Gleichung (3-29) [27]. Sind in den vorherigen Simulationsjahren bereits individuelle THG-Verminderungsmaßnahmen umgesetzt, ist der Maßnahmeneffekt bei der Referenzveränderung zu berücksichtigen (3-30) [27].

$$PE_{TM,t} = PE_{TM,t-1} + \Delta PE_{t,Ref} \quad (3-29)$$

$$PE_{TM,t} = PE_{TM,t-1} + \Delta PE_{t,Ref} + ME_{P,t-1} \quad (3-30)$$

$\{PE_{TM,t}, PE_{TM,t-1}\}$ (div)	Parameter P zum Zeitpunkt t und t-1	$ME_{P,t-1}$ (div)	Kumulierter Maßnahmeneffekt hinsichtlich Parameter P zum Zeitpunkt t-1
$\Delta PE_{t,Ref}$ (div)	Delta des Parameters im Referenzfall		

Individuelle Effekte und Interdependenzen bei der Umsetzung von THG-Verminderungsmaßnahmen würden zum Unterschreiten vorgegebener Grenzwerte wie der Nullbarriere einzelner Parameter führen. Deshalb wird das Technologiemitmixmodul restriktionsbasiert aufgebaut. Die Referenzveränderung des Technologiemitmixmoduls konstruiert dafür abziehbare Matrizen der Nicht-Aktivitätsgrößen basierten Parameter. Dieses Vorgehen stellt das Einhalten vorgegebener Grenzwerte sicher. Je technoökonomischem Parameter gelten unterschiedliche Grenzwerte.

Produktionsmenge mit Altersstruktur

Produktionsmengen mit Altersstruktur sind Nicht-Aktivitätsgrößen basiert und werden dementsprechend im Technologiemitmixszenario fortgeschrieben. Folgende Restriktionen in (3-31) und (3-32) gelten für die Fortschreibung der Produktionsmengen je Prozess im Technologiemitmixmodul:

$$\vec{m}_{t,A} + \Delta \vec{m}_{t,A,RM} \geq 0 \quad (3-31)$$

$$\sum_{d=1}^A \vec{m}_{t,A,d} + \Delta \vec{m}_{t,A,RM,d} \geq 0 \quad (3-32)$$

$\Delta \vec{m}_{t,A,RM}$ (t)	Delta-Produktionsmenge aus der Referenzentwicklung je Anlagenalter	$m_{t,A}$ (t)	Produktionsmenge je Anlagenalter
-------------------------------	--	---------------	----------------------------------

Auch bei der Fortschreibung von Produktionsmengen mit Altersstruktur gilt das FIFO-Prinzip und der im Referenzmodul beschriebene Algorithmus, der zuvörderst ältere Anlagen nach den Formeln (3-26), (3-27) und (3-28) ersetzt. Ist die über das Anlagenalter aggregierte

Produktionsmenge infolge der Referenzveränderung negativ, wird das Umlegen auf andere Verfahrensrouten mit homogenen Produktionsgütern geprüft. Beispielsweise könnten Produktionsanteile von Flachglas auf Elektroflachglas verschoben werden (vgl. Tabelle 3-1). Das Technologiemitmixmodul ändert die Produktionsmenge homogener Güter und damit die Wirtschaftsleistung im Vergleich zum Referenzmodul nicht. Lediglich die Verschiebung von Produktionsgütern zwischen Verfahrensrouten ist zulässig. Um Produktionsmengen zu verschieben, ist zunächst der Anteil je Verfahrensrouten an den positiven und negativen Produktionsmengen hinsichtlich des homogenen Produkts nach den Formeln in (3-33) zu ermitteln. Die zu verschiebende negative Produktionsmenge je Verfahrensrouten ergibt sich je nach Anteil am homogenen Produkt der jeweiligen Verfahrensrouten. Der von den Verfahrensrouten mit initial negativer Produktionsmenge abzuziehende Wert ermittelt sich ebenfalls nach Gleichung (3-34).

$$m_{p, vr} = \sum_{d=1}^{ld} \bar{m}_{vr,d} \text{ mit } \sum_{d=1}^{ld} \bar{m}_{vr,d} \geq 0$$

$$m_{vr,n} = \sum_{d=1}^{ld} \bar{m}_{vr,d} \text{ mit } \sum_{d=1}^{ld} \bar{m}_{vr,d} < 0 \quad (3-33)$$

$$\bar{p}w_{p, vr} = \frac{m_{p, vr}}{m_{t, hp}} \text{ und } \bar{p}w_{vr,n} = \frac{m_{vr,n}}{\sum_{c=1}^{vr} \bar{m}_{vr,c}} \text{ mit } \sum_{c=1}^{vr} \bar{m}_{vr,c} < 0$$

$$\overrightarrow{korr}_{p, vr} = \bar{p}w_{p, vr} \cdot m_{vr,n} \text{ und } \overrightarrow{korr}_{vr,n} = \bar{p}w_{vr,n} \cdot |m_{vr,n}| \quad (3-34)$$

$m_{p, vr}$	(t)	Produktionsmenge der Verfahrensrouten mit initial positiver Produktionsmenge	$m_{vr,n}$	(t)	Produktionsmenge der Verfahrensrouten mit initial negativer Produktionsmenge
$\bar{p}w_{vr,n}$	(%)	Prozentualer Anteil je Verfahrensrouten mit initial negativer Produktionsmenge an der initial negativen Produktionsmenge	$\bar{p}w_{p, vr}$	(%)	Prozentualer Anteil je Verfahrensrouten am homogenen Produkt mit initial positiver Produktionsmenge
$\overrightarrow{korr}_{vr,n}$	(t)	Korrekturwert Verfahrensrouten mit initial negativer Produktionsmenge	$\overrightarrow{korr}_{p, vr}$	(t)	Korrekturwert Verfahrensrouten mit initial positiver Produktionsmenge
$m_{t, hp}$	(t)	Produktionsmenge des homogenen Produkts			

Die Berücksichtigung negativer Produktionsmengen bei Verfahrensrouten mit initial positiver Produktionsmenge erfolgt mit dem nach dem FIFO-Prinzip funktionierenden Algorithmus der Formeln (3-26), (3-27) und (3-28).

Ergeben sich Verschiebungen infolge negativer Produktionsmengen in der Referenzveränderung, sind auch die energieträger- und anwendungsscharfen Verbräuche der Referenz- und Substitutionsroute anzupassen. Der Korrekturwert resultiert aus der Multiplikation veränderter Produktionsmengen mit dem spezifischen Verbrauch und der prozentualen Energieträger- und Anwendungsaufteilung nach Gleichung (3-35).

$$korr_{1,p,st,bs} = e_{st,bs,vr} \cdot \sum_{j=1}^A \overrightarrow{korr}_{vr,j} \quad (3-35)$$

$korr_{1,p,st,bs}$	(MWh)	Korrekturwert Energie für entstandene Produktionsmengenverschiebung	$e_{st,bs,vr}$	(MWh/t)	Spezifischer Strom- und Brennstoffverbrauch je Verfahrensrouten
--------------------	-------	---	----------------	---------	---

Um die jahresspezifische Referenzmassenbilanz im Technologiemitmixmodul zu erstellen, wird die veränderte Produktionsmenge mit der prozentualen Verteilung der In- und Outputs je Prozess multipliziert. Ändern sich durch den Transformationsprozess Edukte bzw. Produkte der hinterlegten industriellen Prozesse, ändert sich auch die prozentuale Verteilung der

Massenbilanz. Dementsprechend gehen Änderungen der Massenbilanz ausgewählter Prozesse in den Transformationspfad mit ein.

$$\begin{aligned} \vec{m}_{p,mb,ed} &= \vec{p}\vec{w}_{mb,ed} \cdot m_p \\ \vec{m}_{p,mb,pd} &= \vec{p}\vec{w}_{mb,pd} \cdot m_p \end{aligned} \quad (3-36)$$

$\vec{p}\vec{w}_{mb}$ (%)	Prozentuale Verteilung der Massenbilanz von Edukten und Produkten	$\vec{m}_{p,mb}$ (t)	Massenbilanz je Prozess von Edukten und Produkten
---------------------------	---	----------------------	---

In den meisten Prozessen ändert sich die prozentuale Verteilung der Massenbilanz des Prozesses nicht. Insbesondere ist jedoch der Effekt in der Zementindustrie durch den Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie (Hüttensand) und des in der Referenz hinterlegten Kohleausstiegs (Flugasche) zu berücksichtigen. Auch im Technologiemitmixmodul wird vorausgesetzt, dass die prozentualen Anteile des Materialausschusses und des Exportanteils an der Klinkerproduktion im Transformationspfad konstant bleiben. Dies gilt ebenso für die Materialien Ölschiefer, Trass, natürlichen Gips, natürlichen Anhydrit und Sonstige Edukte. Die Verfügbarkeit von Hüttensand hängt hingegen vom industriellen Transformationspfad selbst ab. Durch die Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie sinkt der verfügbare Hüttensand in einigen Szenarien, wodurch die Zusatzproduktion von Klinker notwendig ist. Die zusätzliche Menge Klinker berechnet sich im Technologiemitmixmodul wie folgt:

$$m_{h,ht} = m_{zm} - [m_{kl} - (m_{kl} \cdot pw_{kl,exp}) + (pw_{ma} \cdot m_{zm}) + (m_{zm} \cdot \vec{p}\vec{w}_r)]$$

1) wenn $m_{h,ht} \leq m_{ht,max}$ dann gilt: $m_{ht} = m_{h,ht}$

2) wenn $m_{h,ht} > m_{ht,max}$ dann gilt: $m_{ht} = m_{ht,max}$ und $m_{kl} = m_{kl} + (m_{h,ht} - m_{ht,max})$ (3-37)

$$\vec{korr}_{kl,1} = m_{h,ht} - m_{ht,max}$$

$$\vec{korr}_{2,p,st,bs} = e_{p,st,bs} \cdot \sum_{d=1}^A \vec{korr}_{kl,d}$$

$m_{h,ht}$ (t)	Hypothetisch notwendiger Hüttensand	m_{zm} (t)	Produktionsmenge Zement
m_{kl} (t)	Produktionsmenge Klinker	$pw_{kl,exp}$ (%)	Exportanteil am Klinker
pw_{ma} (%)	Anteil Materialausschuss bei der Zementproduktion	$\vec{p}\vec{w}_r$ (t)	Masseanteil der restlichen Inputs der Massenbilanz (vgl. Tabelle 9-17)
$m_{h,max}$ (t)	Maximal verfügbarer Hüttensand in der Stahlproduktion	m_{ht} (t)	tatsächlicher Hüttensand
$\vec{korr}_{kl,1}$ (t)	Korrekturwert Klinkerproduktion mit Neuinvestition	$\vec{korr}_{2,p,st,bs}$ (MWh)	Korrekturwert Energie zusätzliche Klinkerproduktion

Gleichung (3-14) berechnet außerdem die prozentuale Verteilung der edukt- und produktscharfen Massenbilanz. Die Produktionsmenge mit Altersstruktur resultiert schließlich unter Berücksichtigung, der Korrekturfaktoren aus der Produktionsmengenverschiebung (3-34), der Massenbilanz (3-37) und der Referenzveränderung nach Gleichung (3-38):

$$\Delta \vec{m}_{t,g} = \Delta \vec{m}_{t,RM} + \vec{korr}_{vr} + \vec{korr}_{kl} \quad (3-38)$$

$$\vec{m}_{t,p} = \vec{m}_{t-1,p} + \Delta \vec{m}_{t,g}$$

$\vec{m}_{t,p}$ (t)	Produktionsmengenvektor mit Altersstruktur in t je Prozess	$\Delta \vec{m}_{t,g}$ (t)	Gesamter abziehbarer Massenvektor mit Altersstruktur
---------------------	--	----------------------------	--

Energieträger- und anwendungsscharfer Verbrauch

Um den Energieverbrauch auf Prozessebene im Technologiemitmixmodul anhand der Referenzveränderung fortzuschreiben, müssen neben dem Deltawert weitere energetische Korrekturwerte berücksichtigt werden:

1. Veränderung des Energieverbrauchs durch Verschiebung von Produktionsanteilen auf weitere Verfahrensrouten in der Referenzveränderung des Technologiemitmixmoduls (vgl. Gleichung (3-35))
2. Veränderung des Energieverbrauchs aufgrund Neuberechneter Massenbilanzen in der Referenzveränderung des Technologiemitmixmoduls (vgl. Gleichung (3-37))
3. Energetische Neubewertung der Produktionsmengenänderungen im Referenzmodul infolge gesteigerter Effizienz im Technologiemitmixmodul durch Maßnahmenumsetzung
4. Veränderte Produktionsmenge infolge eines Verfahrensroutenwechsels im Technologiemitmixmodul und daraus folgende Neubewertung des Energiedeltas der Referenzveränderung

Die Korrekturwerte aus (1) bzw. (2) berechnen sich nach den Gleichungen (3-35) bzw. (3-37). Korrekturwert (3) ist obligatorisch, sobald Effizienzgewinne im Technologiemitmixmodul bei gleichzeitig veränderlicher Produktionsmenge im Referenzmodul eine Neubewertung der im Referenzmodul berechneten absoluten Energiedifferenz erfordern (vgl. Gleichung (3-39)). Korrekturwert (4) ist notwendig, falls der Wechsel von Verfahrensrouten im Technologiemitmixmodul zu einer über die Referenzveränderung hinausgehenden Produktionsmengenänderung führt und eine Neubewertung des im Referenzmodul ermittelten absoluten Energiedeltas erfordert (vgl. Gleichung (3-40)). Der zu berücksichtigende gesamte energieträger- und anwendungsscharfe Deltaverbrauch der Referenzveränderung ergibt sich schließlich nach Gleichung (3-41):

$$korr_{3,p,st,bs} = (e_{p,st,bs,RM,t-1} - e_{p,st,bs,TM,t-1}) \cdot \sum_{d=1}^A \Delta \vec{m}_{t,g,d} \quad (3-39)$$

$$ve = e_{p,st,bs,RM,t-1} - e_{p,st,bs,RM,t} \quad (3-40)$$

$$korr_{4,p,st,bs} = ve \cdot (m_{t,p,TM} - m_{t,p,RM})$$

$$\Delta E_{p,st,bs,1} = \Delta E_{p,bs,st,RM} + (korr_{1,p,st,bs} + korr_{2,p,st,bs} - korr_{3,p,st,bs} - korr_{4,p,st,bs}) \cdot pw_{p,et,aw} \quad (3-41)$$

$korr_{3,p,st,bs}$	(MWh)	Energetischer Korrekturwert (3)	$korr_{4,p,st,bs}$	(MWh)	Energetischer Korrekturwert (4)
$pw_{p,et,aw}$	(%)	Prozentuale energieträger- und anwendungsscharfe Verteilung des absoluten Delta-Energiewerts	$e_{p,st,bs,TM,t-1}$	(MWh/t)	spezifischer Strom- und Brennstoffverbrauch im Technologiemitmixmodul zum Zeitpunkt t-1
$e_{p,st,bs,RM,t-1}$	(MWh/t)	spezifischer Strom- und Brennstoffverbrauch im Referenzmodul zum Zeitpunkt t	$\Delta \vec{m}_{t,g}$	(t)	Gesamter abziehbarer Massenvektor mit Altersstruktur zum Zeitpunkt t
$e_{p,st,bs,RM,t-1}$	(MWh/t)	spezifischer Strom- und Brennstoffverbrauch im Referenzmodul zum Zeitpunkt t-1	$m_{t,p,TM}$	(t)	Produktionsmenge des Prozesses p zum Zeitpunkt t im Technologiemitmixmodul
$\Delta E_{p,st,bs,1}$	(MWh)	Gesamter abzuziehender Energievektor zum Zeitpunkt	$\Delta E_{p,bs,st,RM}$	(MWh)	Delta-Strom- und Brennstoffmatrix aus der Referenzentwicklung
$m_{t,p,RM}$	(t)	Produktionsmenge des Prozesses p zum Zeitpunkt t Referenzmodul			

Die Referenzveränderung des Technologiemitmixmoduls konstruiert abziehbare energetische Matrizen je Prozess, die die vorgegebenen Grenzwerte berücksichtigen. Jeder Prozess beinhaltet ein spezifisches Energieverbrauchsminimum, das sich basierend auf Gleichung (3-7) des Referenzmodul ergibt. Das Technologiemitmix- kann im Vergleich zum Referenzmodul eine höhere maximale Effizienz je Prozess erreichen. Der minimale spezifische Energiegrenzwert des Referenzmoduls sinkt um den exogen vorgegebenen Wert „ze“. Es gelten die Formeln in (3-42):

$$e_{t,min,TM} = e_{t,min,RM} \cdot (1 - ze) \tag{3-42}$$

$$e_{t,st} + e_{t,bs} \geq e_{t,min,TM}$$

$e_{t,min,TM}$	(MWh/t)	Minimaler spezifischer Energieverbrauch je Prozess im Technologiemitmixmodul	$e_{t,min,RM}$	(MWh/t)	Minimaler spezifischer Energieverbrauch je Prozess im Referenzmodul
ze	(dl)	Zusätzliche Effizienzsteigerung im Technologiemitmixmodul			

Zur Berücksichtigung der Referenzänderung wird der Deltaverbrauch auf Prozessebene zunächst nach Anwendungen zusammengefasst, um den veränderten Energieträgern im Technologiemitmixmodul Rechnung zu tragen. Um Nullwerte bei einzelnen Energieträger-Anwendungskombinationen zu vermeiden, ist die Nullbarriere als Grenze hinterlegt. Die abziehbare Energiematrix ergibt sich schließlich durch abschnittsweise Definition nach den Gleichungen in (3-43):

$$\Delta E_{p,st,bs,2} = \sum_{i=1}^{et} E_{t,p,st,bs,1,i} \cdot p_{t-1,p,et,TM}$$

$$VE_{p,st,bs,1} = E_{p,st,bs} + \Delta E_{p,st,bs,n} \tag{3-43}$$

$$\Delta E_{p,st,bs,3} = \begin{cases} -VE_{p,st,bs,1} & \text{für } \forall VE_{p,st,bs,1} < 0 \\ \Delta E_{p,st,bs,n} & \text{für } \forall VE_{p,st,bs,1} \geq 0 \end{cases}$$

$$VE_{p,st,bs,2} = E_{p,st,bs} + \Delta E_{p,st,bs,3}$$

$\Delta E_{p,st,bs,3}$	(MWh)	Nach Anwendungen zusammengefasster und neu auf die energieträgerverteilter Delta-Energieverbrauch	$VE_{p,st,bs,1}$	(MWh)	Vorläufiger Energiewert unter Berücksichtigung der Referenzveränderung
$\Delta E_{p,st,bs,2}$	(MWh)	Neue abschnittsweise definierte abziehbare Energiematrix	$VE_{p,st,bs,2}$	(MWh)	Vorläufiger Energiewert unter Berücksichtigung der Nullbarriere je Anwendung und Energieträger

Das Modell stellt das Einhalten des in Gleichung (3-42) vorgegebenen spezifischen Minimalwerts je Prozess nach dem in (3-44) beschriebenen Algorithmus sicher:

$$ve_{t,p} = \frac{\sum_{i=1}^{et} \sum_{j=1}^{aw} VE_{p,st,bs,3,i,j}}{m_{t,p}}$$

wenn 1) $ve_t \geq e_{t,min,TM}$ gilt $\Delta E_{p,st,bs,4} = \Delta E_{p,st,bs,3}$

$$\text{wenn 2) } ve_t < e_{t,min,TM} \text{ dann } \Delta \vec{e}_{t,st,bs,1} = \begin{cases} 0 & \text{für } \forall \vec{e}_{t,bs,st} - \vec{e}_{t-1,bs,st} \geq 0 \\ \vec{e}_{t,st,bs} - \vec{e}_{t-1,st,bs} & \text{für } \forall \vec{e}_{t,bs,st} - \vec{e}_{t-1,bs,st} < 0 \end{cases} \quad (3-44)$$

$$\Delta e_g = e_{t,min,TM} - \Delta e_t \text{ und } \Delta \vec{e}_{t,st,bs,2} = \Delta e_g \cdot \overline{pw}_{t,st,bs,e_1}$$

$$\Delta E_{p,st,bs,4} = \Delta E_{p,st,bs,3} + (\Delta \vec{e}_{t,bs,st,2} \cdot m_{t,p}) \cdot \overline{pw}_{t,p,et,aw}$$

$\Delta E_{p,st,bs,4}$ (MWh)	Abziehbare Matrix der Referenzänderung nach Berücksichtigung des spezifischen Minimalwerts je Prozess	$\overline{pw}_{p,e}$ (%)	Prozentuale Verteilung der Differenz von spezifischen und minimalen spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauch
$ve_{t,p}$ (MWh/t)	Vorübergehend veränderter spezifischer Strom- und Brennstoffverbrauch		

Die abziehbare Matrix wird schließlich nach Gleichung (3-45) auf den aktuellen Energiewert im Technologiemitmixmodul bezogen. Ferner berechnet Smlnd den spezifischen Verbrauch nach Gleichung (3-46) neu.

$$\underline{E}_{t,p,st,bs} = \underline{E}_{t-1,p,st,bs} + \Delta E_{p,st,bs,4} \quad (3-45)$$

$$e_{t,p,st,bs} = \frac{E_{t,p,st,bs}}{m_{t,p}} \quad (3-46)$$

Das Vorgehen auf Prozessebene findet auch auf Ebene des Querschnittsverbrauchs je Wirtschaftszweig Anwendung. Um den Energieverbrauch auf Querschnittsebene im Technologiemitmixmodul anhand der Referenzveränderung fortzuschreiben, müssen neben dem Deltawert weitere energetische Korrekturwerte berücksichtigt werden:

1. Energetische Neubewertung der Bruttowertschöpfungsänderungen im Referenzmodul infolge gesteigerter Effizienz im Technologiemitmixmodul
2. Veränderte Bruttowertschöpfung infolge wirtschaftlicher Variation im Technologiemitmixmodul und daraus folgende Neubewertung des Energiedeltas der Referenzveränderung

Da die Bruttowertschöpfung und damit die wirtschaftlichen Parameter im Vergleich zum Referenz- im Technologiemitmixmodul gleichbleiben, wirkt lediglich Effekt (1). Korrekturwert (1) ist obligatorisch, sobald Effizienzgewinne im Technologiemitmixmodul bei gleichzeitig veränderlicher Bruttowertschöpfung im Referenzmodul eine Neubewertung der im Referenzmodul berechneten absoluten Energiedifferenz erfordern (vgl. Gleichung (3-47)).

$$korr_{t,1,q,st,bs} = (e_{t-1,q,st,bs,RM} - e_{t-1,q,st,bs,TM}) \cdot \Delta BWS_{t,q} \quad (3-47)$$

Die vorläufige abziehbare Matrix zur Berücksichtigung der energetischen Referenzveränderung auf Querschnittsebene resultiert aus Gleichung (3-48).

$$\Delta E_{q,st,bs,1} = \Delta E_{q,st,bs,RM} + korr_{1,q,st,bs} \cdot \overline{pw}_{q,et,aw} \quad (3-48)$$

Statt dem spezifischen Verbrauch dient die Energieintensität (MWh/€) je Wirtschaftszweig als unterer Grenzwert. Die zusätzliche maximale Effizienz über den Betrachtungszeitraum wird dabei exogen vorgegeben und auf die im Referenzmodul (vgl. Gleichung (3-17)) berechnete untere Grenze bezogen:

$$ei_{t,min,TM} = ei_{t,min,RM} \cdot (1 - ze) \quad (3-49)$$

$$ei_{st} + ei_{bs} \geq ei_{t,min,TM}$$

$ei_{t,min,TM}$	(MWh/t)	Minimaler Effizienzwert im Technologiemixmodul	$e_{t,min,RM}$	(MWh/t)	Minimaler Effizienzwert im Referenzmodul
ze	(dl)	Zusätzliche Effizienzsteigerung im Technologiemixmodul			

Analog zu den Gleichungen in (3-43) und (3-44) passt das Modell zunächst die abziehbare Matrix hinsichtlich des Nullgrenzwerts einzelner Matrixelemente und anschließend hinsichtlich der Energieintensitätsgrenze an. Statt dem spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauch je Prozess dient der Strom- und Brennstoffintensitätswert je Querschnitt als Grenzwert. Gleichung (3-50) berücksichtigt die Referenzveränderung auf Querschnittsebene. Letztlich aktualisiert Gleichung (3-51) die Strom- und Brennstoffintensität.

$$\underline{E}_{t,q,st,bs} = \underline{E}_{t-1,q,st,bs} + \Delta \underline{E}_{q,st,bs,4} \quad (3-50)$$

$$ei_{t,q,st,bs} = \frac{E_{t,q,st,bs}}{BWS_{t,q}} \quad (3-51)$$

$\underline{E}_{t,q,st,bs}$	(MWh)	Energieträger- und anwendungsscharfe Strom- und Brennstoffmatrix	$\Delta \underline{E}_{q,st,bs,4}$	(MWh)	Unter Berücksichtigung der Restriktionen berechneter Delta-Energiewert
$ei_{t,q,st,bs}$	(MWh/€)	Strom- und Brennstoffintensität je Querschnitt			

Fortschreibung weiterer Nicht-Aktivitätsgrößen basierter Parameter

Neben den Produktionsmengen mit Altersstruktur und dem prozess- und querschnittsscharfen Energieverbräuchen schreibt die Referenzveränderung des Technologiemixmoduls auch die Prozessemissionen je Querschnitt fort. Da das Modell bislang keine Maßnahmen zur Minderung der Querschnittsprozessemissionen kennt, sind auch keine Restriktionen in der Referenzveränderung zu beachten. Demgemäß wird das Delta der im Referenzmodul nach Gleichung (3-19) ermittelten Prozessemissionen je Querschnitt nach Gleichung (3-131) berechnet und nach Gleichung (3-52) zum Vorjahreswert addiert:

$$pem_{t,q} = pem_{t-1,q} + \Delta pem_{t,q,RM} \quad (3-52)$$

$\{pem_{t,q}, pem_{t-1,q}\}$	(t)	Prozessbedingte Emissionen Querschnitt zum Zeitpunkt t und t-1	$\Delta pem_{t,q,RM}$	(MWh)	Prozessbedingte Emissionen Querschnitt zum Zeitpunkt t-1
------------------------------	-----	--	-----------------------	-------	--

Die Referenzänderung des Technologiemixmoduls beeinflusst neben Prozessen und Querschnitt auch Kennwerte individueller THG-Verminderungstechnologien. Demgemäß sind die Umsetzungsparameter je THG-Verminderungstechnologie zu berechnen. Vor der zusätzlichen individuellen Maßnahmenumsetzung im Technologiemixmodul entsprechen die Parameter des Technologiebestandes und der Umsetzungsmatrix den Werten im Referenzmodul.

Für die Maßnahmenkategorien (1), (5), (6), (9) und (10) aus Abbildung 3-5 werden die Parameter der maßnahmenindividuellen Umsetzungsmatrix zu Jahresbeginn in der Referenzveränderung befüllt (vgl. Anhang, Tabelle 9-21). Zugrundeliegende Umsetzungsparameter und deren Veränderung zum Vorjahr werden eingetragen. Die Änderung des zugrundeliegenden Umsetzungsparameters im Vergleich zum Startwert der

Maßnahmenumsetzung ergibt sich nach Gleichung (3-53). Der Änderungsfaktor gewährleistet die Umsetzung der Maßnahmen in Abhängigkeit der initialen Investitionszyklen.

$$aef1_{t,m} = \frac{UP_{t,g,m}}{UP_{t_s,g,m}} \quad (3-53)$$

$aef1_{t,m}$ (dl)	Änderungsfaktor Umsetzungsparameter je Maßnahme m zum Zeitpunkt t	$UP_{t,g,m}$ (div)	Zugrundeliegender Umsetzungsparameter der Maßnahme m zum Zeitpunkt t
t_s (a)	Jahr der ersten Maßnahmenumsetzung von m im Technologiemixmodul		

Umsetzungs- und Anwendungsgrad werden zu Jahresbeginn vom Jahresende des Vorjahres übernommen. Aus dem relativen Umsetzungs- und Anwendungsgrad zu Jahresbeginn gehen nach den Gleichungen in (3-54) die absolute Umsetzung und das absolute Anwendungspotenzial je Maßnahme hervor.

$$\begin{aligned}
 UMG_{b,t} &= UMG_{e,t-1} \\
 AWG_{b,t} &= AWG_{e,t-1} \text{ mit } AWG + UMG = 1 \\
 bt_{b,t} &= bt_{e,t-1} + UMG_{b,t} \cdot \Delta UP_{g,m} \\
 nt_{b,t} &= nt_{e,t-1} + AWG_{b,t} \cdot \Delta UP_{g,m}
 \end{aligned} \quad (3-54)$$

$\{b, e\}$ (indices)	Jahresbeginn, Jahresende	bt (div)	Absolute Umsetzung (bestückt)
$\Delta UP_{g,m}$ (div)	Delta des Umsetzungsparameters zum Vorjahr	nt (div)	Absolutes Anwendungspotenzial (nicht-bestückt)

Die Gleichungen in (3-54) verteilen den sich ändernden zugrundeliegenden Umsetzungsparameter in Abhängigkeit des Umsetzungs- und Anwendungsgrads auf die bestückte und nicht-bestückte Menge. Das Prinzip wird mithilfe eines einfachen Beispiels bei steigender Produktionsmenge in der Papierherstellung (+10 t) anhand der Effizienzmaßnahme „Optimierung der Prozesssteuerung“ (Umsetzungsgrad: 0,2) erläutert: Die zusätzliche Produktionsmenge wird in dem Maß mittels „optimierter Prozesssteuerung“ hergestellt, wie es der durch den Umsetzungsgrad beschriebene Technologiebestand der deutschen Papierindustrie vorgibt. Bei einem Umsetzungsgrad der Effizienzmaßnahme von 0,2 werden zwei der zusätzlichen zehn Tonnen mittels „optimierter Prozesssteuerung“ produziert. Acht Tonnen hingegen erzeugt die Papierindustrie ohne „optimierte Prozesssteuerung“. Das Prinzip gilt ebenso bei Produktionssenkung.

Im Gegensatz zu den Maßnahmenkategorien (1), (5), (6), (9) und (10) verwendet der Verfahrensroutenwechsel (2) die gesamte Produktionsmenge des zugehörigen homogenen Gutes und dessen Veränderung zum Vorjahr in der Umsetzungsmatrix. Das Vorgehen ermöglicht den multilateralen Wechsel von Verfahrensrouten innerhalb homogener Güter wie Stahl¹³. Umsetzungs- und komplementärer Anwendungsgrad bleiben nach Gleichung (3-54) beim Jahreswechsel konstant. Bestückung und Nicht-Bestückung ergeben sich nach den Gleichungen in (3-55):

13 Bspw. sind für die Stahlproduktion die Verfahrensrouten hochofenbasierter Primärstahl, Sekundärstahl und H2-Stahl hinterlegt.

$$bt_{b,t} = bt_{e,t-1} + \Delta UP_{sr} \quad (3-55)$$

$$nt_{b,t} = nt_{e,t-1} + \Delta UP_{hp} - \Delta UP_{sr}$$

hp	(index)	Homogenes Produkt	sr	(index)	Substitutionsroute
------	---------	-------------------	------	---------	--------------------

Der Änderungsfaktor hinsichtlich des zugrundeliegenden Umsetzungsparameters beim Verfahrensroutenwechsel berechnet sich auf Basis der Produktionsmenge des homogenen Gutes in Anlehnung an Gleichung (3-53).

Maßnahmenkategorie (3)¹⁴ nutzt hingegen die installierte Leistung als Umsetzungsparameter. Umsetzungs- und Anwendungsgrad sowie die Bestückungsparameter ergeben sich nach den Gleichungen in (3-56) und (3-57):

$$bt_{b,t} = \begin{cases} \frac{E_{t,st}}{Vls_t} & \text{wenn gilt: } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} < bt_{e,t-1} \\ bt_{e,t-1} & \text{wenn gilt: } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} \geq bt_{e,t-1} \end{cases}$$

$$nt_{b,t} = \frac{E_{t,bs}}{Vls_t} \quad (3-56)$$

$$UP_{b,t} = bt_{b,t} + nt_{b,t}$$

$$\Delta UP_{b,t} = UP_{b,t} - UP_{b,t-1}$$

$E_{t,st}$	(MWh)	Stromverbrauch zum Zeitpunkt t des zugrundeliegenden Prozesses	Vls_t	(h)	Volllaststunden des Lastgangs des zugrundeliegenden Prozesses im Jahr t
------------	-------	--	---------	-----	---

Daraus folgt, dass die Elektrifizierung solange durchgeführt wird, bis die Prozesstechnologie vollständig mit der Maßnahme durchdrungen ist. Bei sinkender elektrischer Leistung beispielsweise durch Energieeffizienz, sinkt auch die elektrische Leistung der Prozesstechnologie.

Um eine gleichmäßige Umsetzung in Abhängigkeit der hinterlegten Diffusionsgeschwindigkeit je Technologie zu erreichen, wird eine Änderungsrate für die absolute Umsetzungsänderung bei Maßnahmenkategorie (3) ermittelt. Weiterhin wird die Änderungsrate auf Basis der Umsetzungsänderung nach den Gleichungen in (3-57) berechnet. Dies ist notwendig, da sich das Verhältnis zwischen Bestückung und Nicht-Bestückung auch ohne Umsetzung der Maßnahme und in Abhängigkeit mehrerer Parameter ändert.

$$aef2_{t,m} = \frac{nt_{b,t} - nt_{e,t-1}}{nt_{e,t-1}} \quad (3-57)$$

$$aef_{t,UP,m} = aef2_{t,m} \cdot aef1_{t-1,m} + aef1_{t-1,m} \text{ mit } aef1_{t_s,m} = 1$$

$aef2_{t,m}$	(dl)	Änderungsfaktor der Umsetzung von Maßnahme m	$aef1_{t,m}$	(dl)	Änderungsfaktor des zugrundeliegenden Umsetzungsparameters
--------------	------	--	--------------	------	--

Umsetzungs- und Anwendungsgrad resultieren schließlich aus Gleichung (3-58).

$$UMG_{b,t} = \frac{bt_{b,t}}{UP_{t,g,m}} \text{ und } AWG_{b,t} = \frac{nt_{b,t}}{UP_{t,g,m}} \quad (3-58)$$

Da die Maßnahmenumsetzung der Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel auf Prozess- und Querschnittsebene nicht technologiebasiert ist (4), (11), wird auch keine

¹⁴ Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel (Elektrifizierung) auf Prozessebene (vgl. Abbildung 3-5)

Bestückung und Nicht-Bestückung hinterlegt. Die Umsetzungsmatrizen dienen bei Maßnahmen ohne Technologiewechsel lediglich als Grundlage zur Berechnung der relevanten Umsetzungsrestriktionen.

Ebenfalls wird der über die unterschiedlichen Umsetzungsparameter je THG-Verminderungstechnologie abgebildete Technologiebestand in der Referenzveränderung für alle Maßnahmenkategorien fortgeschrieben. Die relevante Änderung des Technologiebestandes resultiert aus Gleichung (3-59). Der heuristische Algorithmus nach dem FIFO-Prinzip der Gleichungen (3-26), (3-27) und (3-28) berücksichtigt die Änderung des Technologiebestands.

$$\Delta UP_{g,m} = bt_{e,t} - bt_{e,t-1} \quad (3-59)$$

3.3.2.2 Aktivitätsgrößenbasierte Parameter in der Referenzveränderung

Die Referenzveränderung des Technologiemitmixmoduls berechnet aktivitätsgrößenbasierte Parameter bottom-up.

Wie im Referenzmodul wird der Lastgang auf Prozess- und Wirtschaftszweigebene durch die Multiplikation des energieträger- und anwendungsscharfen Energieverbrauchs mit den normierten stündlichen Lastprofilen (vgl. Tabelle 3-2) erzeugt [27].

Die energiebedingten Emissionen im Technologiemitmixmodul ergeben sich analog zum Referenzmodul aus der Multiplikation von zeitabhängigen energieträgerscharfen Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren abzüglich der abgeschiedenen CO₂-Emissionen je Prozess und Wirtschaftszweig [27]. Neben den über die Referenzveränderung fortgeschriebenen prozessbedingten Querschnittsemissionen berechnet Smlnd die prozessspezifischen Prozessemissionen durch die Multiplikation von spezifischen Emissionsfaktoren mit der Produktionsmenge abzüglich der CO₂-Abscheidung [27].

Um die im Technologiemitmixmodul hinterlegte CO₂-Abscheidung auf Prozessebene bottom-up inkludieren zu können, ist ihr jeweiliger Wert nach nahezu jeder Parameteränderung zu aktualisieren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass jegliche Anpassung energie- und prozessbedingter Emissionen der verbundenen Prozesse mit der CO₂-Abscheidung wechselwirkt. Einerseits ist die Abscheidung energiebedingter (vgl. Gleichung (3-60)), andererseits prozessbedingter Emissionen zu berechnen (vgl. Gleichung (3-62)). Gleichung (3-61) ermittelt weiterhin die Abscheidung energiebedingter Emissionen unter Berücksichtigung der im Modell mit Nullemissionen hinterlegten erneuerbaren Brennstoffe wie Biomasse und synthetische Kohlenwasserstoffe. Hierzu werden die jeweils tatsächlich anfallenden Emissionen bei der Verbrennung herangezogen.

$$\bar{m}_{CO_2,ab,en} = \frac{m_{p,cc}}{m_p} \cdot r_{ab} \cdot \bar{e}m_{et} \quad (3-60)$$

$$\bar{m}_{CO_2,ab,ener} = \frac{m_{p,cc}}{m_p} \cdot r_{ab} \cdot \bar{e}m_{et,er} \quad (3-61)$$

$$m_{CO_2,ab,p} = m_{p,cc} \cdot r_{ab} \cdot ef_p \quad (3-62)$$

$m_{p,cc}$	(t)	Produktionsmenge, bei der CO ₂ abgeschieden wird	ef_p	(tCO ₂ /t _p)	spezifischer prozessbedingter Emissionsfaktor
r_{ab}	(%)	Abscheiderate der CO ₂ -Abscheidung	m_p	(t _p)	Produktionsmenge des Prozesses
$\bar{e}m_{et}$	(tCO ₂)	Zeitabhängiger energiebedingter Emissionsgang	$\bar{m}_{CO_2,ab,en}$	(tCO ₂)	Zeitabhängiger abgeschiedener energiebedingter Emissionsgang
$\bar{e}m_{et,er}$	(tCO ₂)	Zeitabhängiger energiebedingter Emissionsgang unter Berücksichtigung der tatsächlichen Emissionen von EE-Brennstoffen	$\bar{m}_{CO_2,ab,ener}$	(tCO ₂)	Zeitabhängiger abgeschiedener energiebedingter Emissionsgang unter Berücksichtigung der tatsächlichen Emissionen von EE-Brennstoffen

Gleichung (3-63) bezieht schließlich die CO₂-Abscheidung auf Prozess- und Wirtschaftszweige mit ein.

$$\bar{m}_{CO_2,en} = \bar{m}_{CO_2,oA,en} - \bar{m}_{CO_2,ab,en} \quad (3-63)$$

$$m_{CO_2,p} = m_{CO_2,oA,p} - m_{CO_2,ab,p}$$

$\bar{m}_{CO_2,en}$	(tCO ₂)	Energiebedingter Emissionsgang nach Berücksichtigung der CO ₂ -Abscheidung	$m_{CO_2,p}$	(tCO ₂)	Prozessbedingte Emissionen nach Berücksichtigung der CO ₂ -Abscheidung
$\bar{m}_{CO_2,oA,en}$	(tCO ₂)	Energiebedingter Emissionsgang vor Berücksichtigung der CO ₂ -Abscheidung	$m_{CO_2,oA,p}$	(tCO ₂)	Prozessbedingte Emissionen vor Berücksichtigung der CO ₂ -Abscheidung

3.3.2.3 Parameter mit Änderung im Technologiemitx-, aber nicht im Referenzmodul

Parameter wie die Brennermatrix, die sich ausschließlich infolge der Maßnahmenumsetzung ändern, benötigen keine fortlaufende Anpassung infolge der Referenz. Dementsprechend ist lediglich der Effekt fortlaufender Maßnahmenumsetzung der vergangenen Simulationsjahre bei der Fortschreibung einzubeziehen. Die Maßnahmenumsetzung beeinflusst beispielsweise den Anteil je Brenner auf Prozess- oder Querschnittsebene. Diese Änderung ist in den folgenden Simulationsjahren zu berücksichtigen. Da sich die Brennertechnologie im Referenzmodul nicht ändert, wird diese für das Basisjahr aus dem Referenzmodul verwendet und anschließend im Technologiemitxmodul in der Referenzveränderung aus dem Vorjahr übernommen.

3.3.2.4 Gleichbleibende Parameter im Technologiemitxmodul

Parameter, die sich im Vergleich zum Referenzmodul im Technologiemitxmodul nicht ändern, werden aus dem Referenzmodul übernommen. Beispielsweise beeinflusst das Technologiemitx- die im Referenzmodul exogen vorgegebene industrielle Bruttowertschöpfung nicht. Die Anzahl der Betriebe ändert sich endogen im Referenzmodul, ist im Technologiemitxmodul jedoch auch eine rein exogene Eingangsvariable ohne zusätzliche Anpassung.

3.3.3 Individuelle THG-Verminderungsmaßnahmen im Technologiemixmodul

Individuelle THG-Verminderungsmaßnahmen bestimmen die Entwicklung energiewirtschaftlicher Parameter industrieller Transformationspfade im Technologiemixmodul. Neben der Referenzveränderung ist dementsprechend ein individueller Maßnahmeneffekt zu berücksichtigen (vgl. Gleichung (3-30)). Dafür ist zunächst die jahresspezifische Maßnahmenliste in Abhängigkeit von hinterlegten Technologieverfügbarkeiten zu reduzieren. Je Simulationsjahr sind die Maßnahmen anschließend nach den THG-Verminderungskosten zu priorisieren und abschließend unter Berücksichtigung von Restriktionen umzusetzen und auszuwerten.

3.3.3.1 Jahresspezifische Maßnahmenliste abhängig von Technologieverfügbarkeiten

Um jahresspezifische Maßnahmenlisten zu ermitteln, sind Maßnahmen zu streichen, die im jeweiligen Simulationsjahr keine ausreichende Technologiereife innehaben. Folgende Bedingung filtert und konstruiert eine jahresspezifische Maßnahmenliste in Abhängigkeit der Technologieverfügbarkeit. Sobald Gleichung (3-64) gilt, verbleibt die Technologie auf der Maßnahmenliste:

$$t_{tc,vbk} \geq t \quad (3-64)$$

t	(a)	Aktuelles Simulationsjahr	$t_{tc,vbk}$	(a)	Jahresspezifische Verfügbarkeit v der Technologie tc
-----	-----	---------------------------	--------------	-----	--

Priorisierung der THG-Verminderungsmaßnahmen

Die Maßnahmenmatrix dient zur Berechnung der jahresspezifischen THG-Verminderungskosten je Maßnahme. Gleichung (3-65) beinhaltet die grundlegende Berechnungsmethode der THG-Verminderungskosten [27], [47].

$$VK_m = \frac{k_m - k_{rf}}{em_{rf} - em_m} = \frac{\Delta k}{\Delta em} \quad (3-65)$$

VK_m	(€/tCO ₂)	THG-Verminderungskosten je Maßnahmen	k	(€)	Kosten von Maßnahme und Referenz
em	(tCO ₂)	Emissionen von Maßnahme und Referenz			

Je Maßnahmenkategorie unterscheidet sich die Berechnung der THG-Verminderungskosten. Die jeweiligen Methoden, um die THG-Verminderungskosten je Maßnahmenkategorie zu ermitteln, beschreibt [27]. Der folgende Abschnitt thematisiert lediglich die sich ergebenden Änderungen im Vergleich zu [27]. Statt gemittelten nutzen die Methoden nun zeitabhängige jahresspezifische Energieträgerkosten und Emissionsfaktoren. Die durch die THG-Verminderungstechnologie bedingte Energieänderung wird hierzu auf das Zeitniveau der Energieträgerkosten und Emissionsfaktoren gebracht und dementsprechend zeitlich aufgeteilt¹⁵. Um auf Prozessebene hinterlegte Querschnittstechnologien klimaneutral zu stellen, wird das Modell um die Maßnahmenkategorie (3)¹⁶ erweitert. Die THG-Verminderungskosten der neuen Maßnahmenkategorie entspringen Gleichung (3-66).

¹⁵ Jahresspezifischer Energiewert je Maßnahme/8760h

¹⁶ Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Elektrifizierung auf Prozessebene (3) (vgl. Abbildung 3-5)

$$E_{st} = \frac{Vls_{st} \cdot P_{st}}{8760} \text{ und } E_{bs} = \frac{Vls_{bs} \cdot P_{bs}}{8760} \quad (3-66)$$

$$VK_{EmTQ} = \frac{|P_{st}| \cdot k_{iv} \cdot af + k_o \cdot |P_{st}| - [\vec{k}_s \cdot E_{st} + \sum_{n=1}^b pw_n \cdot \vec{k}_n \cdot E_{bs}]}{\vec{e}f_s \cdot |E_{st}| + \sum_{n=1}^b \vec{e}f_b \cdot pw_n \cdot E_{bs}}$$

VK_{EmTQ}	(€/tCO ₂)	CO ₂ -Verminderungskosten der Maßnahmenkategorie (3)	P_{st}	(MW)	Zusätzlich zu installierende Stromleistung durch Maßnahme pro Stunde
$\{\vec{k}_s, k_b\}$	(€/MWh)	Zeitabhängiger spezifischer Strom- und Brennstoffkostenvektor	af	(dl)	Annuitätenfaktor
$\{ef_s, ef_b\}$	(tCO ₂ /MWh)	Zeitabhängiger Strom- und Brennstoffemissionsfaktor	k_{iv}	(€/MW)	Investitionen
$\{Vls_{st}, Vls_{bs}\}$	(h)	Volllaststunden Strom- und Brennstoffe	P_{bs}	(MW)	Zu reduzierende Brennstoffleistung durch Maßnahme pro Stunde
k_o	(€/MW)	Operative fixe Kosten	E_{st}	(MWh)	Stromerhöhung durch Maßnahme
E_{bs}	(MWh)	Brennstoffreduktion durch Maßnahme	pw_n	(%)	Prozentualer Brennstoffanteil des Brennstoffs n

Neben der zusätzlichen Maßnahmenkategorie berücksichtigen Verfahrensroutenwechsel jetzt massenbilanzielle Änderungen infolge der Maßnahmenumsetzung. Die veränderten THG-Verminderungskosten ergeben sich nach Gleichung (3-67):

$$VK_{VRW,ae} = \frac{\Delta e_{st,mb} \cdot \vec{k}_{st} + \sum_{n=1}^b pw_n \cdot \vec{k}_n \cdot \Delta e_{bs,mb}}{\vec{e}f_s \cdot \Delta e_{st,mb} + \sum_{n=1}^b \vec{e}f_b \cdot pw_n \cdot \Delta e_{bs,mb} + \Delta ef_p} \quad (3-67)$$

$\Delta e_{st,mb}$	(MWh/t _p)	Änderung des spezifischen Stromverbrauchs durch die Massenbilanzänderung	$\Delta e_{bs,mb}$	(MWh/t _p)	Änderung des spezifischen Brennstoffverbrauchs durch die Massenbilanzänderung
Δef_p	(tCO ₂ /t _p)	Änderung des prozessbedingten Emissionsfaktors	$VK_{VRW,ae}$	(€/t)	Änderung der CO ₂ -Verminderungskosten beim Verfahrensroutenwechsel durch Änderung der Massenbilanz

Der Brennstoffwechsel ist im Gegensatz zu [27] nicht mehr exogen vorgegeben, sondern bestimmt sich modellendogen mittels Optimierung auf volkswirtschaftlicher Basis. Demgemäß bestimmt das Modell für die Maßnahmenkategorien (4), (6), (11)¹⁷ einen volkswirtschaftlich optimalen Brennstoffmix mittels linearer Kostenfunktion unter der Einhaltung von Restriktionen. Das Technologiemitmixmodul nutzt die MATLAB Optimization Toolbox für die Optimierung. Der Brennstoffmix ergibt sich kostenminimal mittels linearer ganzzahliger Optimierung nach den Gleichungen in (3-68):

$$\min k = k_{n,g} \cdot E_{n,bt} \cdot pw_j \text{ mit } n = \{1 \dots b\} \text{ und } j = \{1 \dots bt\}, \{n, bt\} \in \mathbb{N} \quad (3-68)$$

$$\text{mit } k_{n,g} = k_n + ef_n \cdot k_{CO_2}$$

k_n	(€/MWh)	Energieträgerkosten für Brennstoff n	$ef_{n,et}$	(tCO ₂ /MWh)	Energieemissionsfaktor von Brennstoff n
$k_{n,g}$	(€/MWh)	Energieträgerkosten für Brennstoff n und volkswirtschaftliche CO ₂ -Kosten für Brennstoffverbrennung	pw_j	(%)	Prozentualer Anteil je Brennertechnologie j auf Prozess- oder Querschnittsebene
k_{CO_2}	(€/tCO ₂)	Volkswirtschaftliche CO ₂ -Kosten			

¹⁷ Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel auf Prozess- (4) und Querschnittsebene (11) sowie dem Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Brennstoffe auf Prozessebene (6) (vgl. Abbildung 3-5)

Das Optimierungsproblem unterscheidet technologieabhängige- und technologieunabhängige Restriktionen. Technologieunabhängige Restriktionen geben den übergeordneten energiewirtschaftlichen Rahmen vor, um die Brennstoffoptima zu ermitteln. Beispielsweise bedingt die erste Gleichung in (3-69) die Unveränderlichkeit des prozess- oder querschnittsscharfen Energieverbrauchs infolge der Brennsthoffoptimierung.

$$E_{g,t,nopt} = E_{g,t,vopt}$$

$$m_{CO_2,t,z} = m_{CO_2,t_b,vopt} - (m_{CO_2,t_b,vopt} \cdot z_t) \quad (3-69)$$

$$m_{CO_2,t,nopt} \leq m_{CO_2,t,z} \text{ mit } m_{CO_2,t,nopt} = E_n \cdot ef_n \text{ mit } n = \{1 \dots b\}, n \in \mathbb{N}$$

$E_{g,t,nopt}$	(MWh)	Gesamtenergiewirtschaftlicher Verbrauch nach Optimierung	$E_{g,t,vopt}$	(MWh)	Gesamtenergiewirtschaftlicher Verbrauch vor Optimierung
$m_{CO_2,t,z}$	(tCO ₂)	Absolute CO ₂ -Verminderung im Jahr t unter Berücksichtigung der Zielsetzung	z_t	(%)	THG-Verminderungsziel im Simulationsjahr t
$m_{CO_2,t_b,vopt}$	(tCO ₂)	Absolute CO ₂ -Emissionen im Bezugsjahr z.B. ggü. 1990	$m_{CO_2,t,nopt}$	(tCO ₂)	Absolute CO ₂ -Emissionen nach der Brennsthoffoptimierung
E_n	(MWh)	Zu optimierender brennstoffscharfer Verbrauch über alle Brennstoffe b	ef_n	(tCO ₂ /MWh)	Emissionsfaktor je Brennstoff n

Weiterhin sind technologieunabhängige Energieträgerrestriktionen zu beachten, die sich hinsichtlich Biomasse und weiterer erneuerbarer synthetischer Energieträger ergeben. Die Biomasserestriktion folgt aus Grenzwerten hinsichtlich des nachhaltigen inländischen Biomassepotenzial, das heute bereits weitestgehend genutzt wird [16], [23], [9], [32], [48]. Aufgeteilte übergeordnete Energieträgerrestriktionen je Prozess und Querschnitt ergeben sich nach Gleichung (3-70):

$$E_{rb,p|q,max} = \sum_{u=1}^b \frac{E_{b,p|q}}{E_{b,i}} \cdot (E_{rb} - E_{rb,i})$$

$$\text{wenn } E_{rb,p|q,max} \geq 0 \text{ gilt } E_{rb,p|q,nopt} \leq E_{rb,p|q,max} + E_{rb,p|q} \quad (3-70)$$

$$\text{wenn } E_{rb,p|q,max} < 0 \text{ gilt } E_{rb,p|q,nopt} \leq E_{rb,p|q}$$

$E_{b,p|q}$	(MWh)	Über alle in der Brennermatrix wechselbaren Brennstoffe aufsummiert je Prozess oder Querschnitt	$E_{b,i}$	(MWh)	Über alle in der Brennermatrix wechselbaren Brennstoffe aufsummiert Gesamtverbrauch Industrie
b	(dl)	Alle wechselbaren Energieträger in Brennermatrix	E_{rb}	(MWh)	hinterlegte Brennstoffrestriktion (z.B. für Biomasse)
$E_{rb,p|q,max}$	(MWh)	Maximaler Verbrauch des begrenzten Brennstoffs	$E_{rb,i}$	(MWh)	Vorhandener Brennstoffverbrauch des restriktiven Brennstoffs auf Industrieebene
$E_{rb,p|q,nopt}$	(MWh)	Maximaler Verbrauch des begrenzten Brennstoffs nach Optimierung			

Negative Brennstoffwerte (Brennstofferzeugung) ist in der Optimierung nicht zugelassen. Für alle Brennstoffvariablen gilt dementsprechend nach Gleichung (3-71):

$$E_{n,nopt} \geq 0 \text{ mit } n = \{1 \dots b\}, n \in \mathbb{N} \quad (3-71)$$

Das Technologiemitmixmodul konstruiert die weiteren Restriktionen in Abhängigkeit der Brennstoffmatrix (technologieabhängig) (vgl. Tabelle 3-3). Auf Querschnittsebene wird davon ausgegangen, dass durchgängig Standardbrenner verwendet werden, bei denen ein Wechsel nur zu jeweils gleichwertigen Brennstoffen möglich ist (vgl. Tabelle 3-3).

Die Konstruktion der Gleichungen und Ungleichungen erfolgt allgemein in Abhängigkeit der Brennermatrix. Nach Tabelle 3-4 ergeben sich vier Ausprägungen hinsichtlich der Konstruktion von Gleichungen und Ungleichungen im Optimierungsproblem.

Tabelle 3-4: Ausprägungen zur Konstruktion der Gleichungen und Ungleichungen in Abhängigkeit der Brennermatrix im Optimierungsproblem

		Zufluss*	
		Nicht möglich	möglich
Abfluss*	Nicht möglich	(1) Formel (3-72)	(2) Formel (3-73)
	Möglich	(3) Formel (3-74)	(4) Formeln (3-75) & (3-76)

*Abfluss (Verringerung) bzw. Zufluss (Erhöhung) von Brennstoff zu anderem Brennstoff möglich bzw. nicht möglich

Ist die Verringerung und Erhöhung des Brennstoffs in der Optimierung hinsichtlich der Brennermatrix nicht möglich (1), da keine Wechseloptionen bestehen, gilt Gleichung (3-72):

$$E_{x,nopt} = E_{x,vopt} \quad (3-72)$$

$E_{x,nopt}$ (MWh)	Brennstoff x nach der Optimierung	$E_{x,vopt}$ (MWh)	Brennstoff x vor der Optimierung
--------------------	-----------------------------------	--------------------	----------------------------------

Sind Zuflüsse von beliebig vielen anderen Brennstoffen zum betrachteten Brennstoff, jedoch keine Abflüsse möglich (2), gelten allgemein die Ungleichungen in (3-73).

$$E_{x,nopt} \geq E_{x,vopt} \quad (3-73)$$

$$E_{x,nopt} \leq E_{x,vopt} + E_{n,vopt} \text{ mit } n = \{1 \dots b_{zu}\}, n \in \mathbb{N}$$

$E_{n,vopt}$ (MWh)	Weitere Brennstoffe n neben Brennstoff x vor der Optimierung mit Zuflussoption b_{zu} zu Brennstoff x
--------------------	---

Sind Abflüsse vom betrachteten Energieträger zu beliebig vielen anderen Energieträger jedoch keine Zuflüsse hinsichtlich der Brennermatrix möglich (3), gelten allgemein die Ungleichungen nach (3-74).

$$E_{x,nopt} \leq E_{x,vopt} \quad (3-74)$$

Sind Abflüsse und Zuflüsse von beliebig vielen anderen Brennstoffen zum betrachteten Brennstoff und umgekehrt möglich, gelten allgemein Gleichung (3-75) und Ungleichung (3-76):

$$E_{na,nz,nopt} = E_{nz,na,vopt} \quad (3-75)$$

$$\text{mit } na = \{1 \dots b_{ab}\} \text{ und } nz = \{1 \dots b_{zu}\}, \{na, nz\} \in \mathbb{N}$$

$$E_{x,nopt} \leq E_{x,vopt} + E_{n,vopt} \text{ mit } n = \{1 \dots b_{zu}\}, n \in \mathbb{N} \quad (3-76)$$

$E_{na,nz,nopt}$ (MWh)	Brennstoffverbrauch der Brennstoffe mit Zuflussoption nz und Abflussoption na nach der Optimierung	$E_{nz,na,vopt}$ (MWh)	Brennstoffverbrauch der Brennstoffe mit Zuflussoption nz Abflussoption na vor der Optimierung
------------------------	--	------------------------	---

Da industrielle Entscheidungen meist längerfristige Lock-In Effekte mit sich bringen und langfristige Energieversorgungsverträge mit dementsprechenden Lieferstrukturen beinhalten, wird angenommen, dass sich der tatsächliche energieträgerscharfe Verbrauch aus dem optimierten Energieträgermix der letzten fünf Jahre zusammensetzt. Da zu Beginn der

Maßnahmenumsetzung keine optimierten Ergebnisse der letzten Jahre vorliegen, wird auf die verfügbaren nicht optimierten Eingangsdaten zurückgegriffen. Der jahresspezifische finale Energieträgermix ergibt sich nach Gleichung (3-77):

$$\vec{E}_b = \frac{1}{n} \cdot \sum_{g=1}^n \vec{E}_{b,opt|ed} \quad (3-77)$$

mit $n = t - t_b$ wenn $t - t_b < 5$ und $n = 5$ wenn $t - t_b \geq 5$

$\vec{E}_{b,opt|ed}$ (MWh)	Brennstoffverteilung der letzten Jahre, mögliche Mischung von Eingangsdaten ed und Optimierung opt	t_b (a)	Basisjahr der Simulation
----------------------------	--	-----------	--------------------------

Die Verminderungskosten für den Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel unter Berücksichtigung der optimierten Energieträgerverteilung resultieren schließlich aus Gleichung (3-78):

$$VK_{EoT} = \sum_{j=1}^b \left[\frac{(\vec{p}\vec{w}_{bs,n} - \vec{p}\vec{w}_{bs,v}) \cdot \vec{k}_{bs}}{(\vec{p}\vec{w}_{bs,n} - \vec{p}\vec{w}_{bs,v}) \cdot \vec{e}f_{bs}} \right]_j \quad (3-78)$$

VK_{EoT} (€/tCO ₂)	THG-Verminderungskosten Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel	$\{\vec{p}\vec{w}_{bs,v}, \vec{p}\vec{w}_{bs,n}\}$ (%)	Vektor mit Brennstoffverteilung vorher und nachher
\vec{k}_{bs} (€/MWh)	Vektor mit Brennstoffkosten	$\vec{e}f_{bs}$ (tCO ₂ /MWh)	Vektor mit Emissionsfaktoren Brennstoffe

Auf Basis der THG-Verminderungskosten je Stützjahr wird die Maßnahmenliste priorisiert. Hierzu wird eine Rangfolge metrischer Daten gebildet, bei der für jedes nach den THG-Verminderungskosten geordnete Element gilt:

$$VK_n \leq VK_{n+1} \text{ mit } n = \{1 \dots m\}, n \in \mathbb{N} \quad (3-79)$$

m (Stk)	Anzahl THG-Verminderungsmaßnahmen auf jahresspezifische Maßnahmenliste	VK_n (dl)	Verminderungskosten von Element n auf der Maßnahmenliste
-----------	--	-------------	--

Das Technologiemitmixmodul setzt die THG-Verminderungsmaßnahmen nach Reihung in der priorisierten jahresspezifischen Maßnahmenliste um. In gleicher Weise wie bei der Berechnung von Verminderungskosten bestimmt die Maßnahmenkategorie den erforderlichen Umsetzungsmechanismus [27]. Die Umsetzungsmechanismen umfassen folgende übergeordnete Schritte:

- Umsetzungsentscheidung basierend auf Restriktionen und Reinvestition
- Maßnahmenumsetzung unter Berücksichtigung der Restriktionen und Reinvestition
- Wirkung auf Umsetzungsmatrix und Altersstruktur des Prozesses oder der Technologie
- Maßnahmenwirkung Energie
- Maßnahmenwirkung Emissionen
- Maßnahmenwirkung Ökonomie

3.3.3.2 Umsetzungsentscheidung: Restriktionen und Reinvestition

Die auf Basis der zugrundeliegenden Umsetzungsparameter¹⁸ berechneten relevanten Restriktionen setzen der Maßnahmenumsetzung technoökonomische Grenzen. Der Restriktionswert weist je Maßnahmenkategorie stets dieselbe Einheit auf.

¹⁸ Beispielsweise Produktionsmenge, Betriebsanzahl und Leistung

Die Maßnahmenumsetzung unterscheidet allgemeine und spezielle Restriktionen. Allgemeine Restriktionen sind unabhängig von der Maßnahmenkategorie. Spezielle Restriktionen hingegen unterscheiden sich in Abhängigkeit der Maßnahmenkategorie hinsichtlich der Berechnungsmethode. Folgende allgemeine Restriktionen sind bisher hinterlegt:

- Restriktion Budget für die Maßnahmenumsetzung nach Gleichung (3-80). Die Berechnungsmethode des jahresspezifischen Budgets beschreibt /FFE 09 20/.
- Restriktion aus exogener Vorgabe für das Ende der Umsetzung einer Maßnahme nach Gleichung (3-81)
- Restriktion in Abhängigkeit der Maßnahmen- und Technologieverfügbarkeit nach Gleichung (3-82)

$$re_{t,b} = \frac{B_t}{af \cdot k_{t,iv,m} + o_{t,m}} \quad (3-80)$$

$$re_{t,me} = 0, \text{ wenn gilt } t \geq t_{me}, \text{ sonst } re_{t,me} \mapsto \infty \quad (3-81)$$

$$re_{t,vbk} = 0, \text{ wenn gilt } t < t_{vbk}, \text{ sonst } re_{t,vbk} \mapsto \infty \quad (3-82)$$

B_t	(€)	Budget im Simulationsjahr t	$re_{t,b}$	(div)	Restriktion Budget
$re_{t,me}$	(div)	Restriktion Ende Maßnahmenumsetzung	$re_{t,vbk}$	(div)	Restriktion Maßnahmen- und Technologieverfügbarkeit
t_{me}	(a)	Jahr Maßnahmenende	t_{vbk}	(a)	Jahr Technologieverfügbarkeit

Tabelle 3-5 beinhaltet darüber hinaus die im Modell hinterlegten speziellen Restriktionen je Maßnahmenkategorie.

Tabelle 3-5: Spezielle Restriktionen und Zuordnung der Maßnahmenkategorien (vgl. Abbildung 3-5)

Maßnahmen- und Technologiediffusion	Restmenge Umsetzung	Emissionen & Budget	Technologie-restriktionen	Energieverbrauch absolut	Energieverbrauch spezifisch
(1), (2), (3), (4), (5), (6), (9), (10), (11)	(1), (3), (5), (6), (9), (10)	(1), (2), (3), (4), (5), (6), (9), (10), (11)	(2)	(6), (10)	(1), (9)

Obwohl einige spezielle Restriktionen die Maßnahmenumsetzung verschiedener Maßnahmenkategorien begrenzen (z.B. Maßnahmen- und Technologiediffusion), können sich dennoch die Berechnungsmethoden unterscheiden.

Die Maßnahmen- und Technologiediffusion der Maßnahmenkategorien (1), (5), (6), (9) und (10) ermittelt Gleichung (3-83). Die Diffusionsrate berechnet sich bei angenommenen natürlichen Reinvestitionszyklen beispielsweise durch den Kehrwert der Lebensdauer [38], [27].

$$re_d = AWG_{b,t} \cdot UP_{t_s} \cdot r_{di} \cdot aef1_{t,m} \quad (3-83)$$

r_{di}	(dl)	Diffusionsrate der Maßnahme oder Technologie	$aef1_{t,m}$	(dl)	Änderungsfaktor des Umsetzungsparameters
$AWG_{b,t}$	(dl)	Anwendungsgrad der Maßnahme zu Beginn eines Simulationsjahres	UP_{t_s}	(dl)	Wert des Umsetzungsparameters im Startjahr
re_d	(div)	Restriktion Technologiediffusion in Abhängigkeit des Umsetzungsparameters			

Für Maßnahmenkategorie (2) ergibt sich die Maßnahmen- und Technologiediffusion nach Gleichung (3-84):

$$re_d = m_{t,vr,ld} + m_{t,vra,ld} \quad (3-84)$$

$$\text{mit } vra = \{1 \dots vr_{hp}\} \setminus vr \text{ und } VK_{vr} < VK_{vra}$$

vr_{hp}	(index)	Restliche Verfahrensrouten des homogenen Produkts
-----------	---------	---

Im Gegensatz zu (3-83) richtet sich die Maßnahmen- und Technologiediffusion der Verfahrensrouten in (3-84) nach der hinterlegten Altersstruktur. Die Altersstruktur der Anlagenproduktionsmenge spielt beim Verfahrensroutenwechsel folglich eine entscheidende Rolle. Zudem wird angenommen, dass die Verfahrensrouten vr die komplette Investitionsmenge von der eigenen und allen weiteren Verfahrensrouten vra auf der Maßnahmenliste übernehmen kann. Voraussetzung dafür ist, dass die weiteren alternativen Verfahrensrouten höhere THG-Vermindernungskosten aufweisen. Der Verfahrensroutenwechsel ergibt sich folglich aus makroökonomischer Sicht.

Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel auf Prozess- und Querschnittsebene verwenden hingegen den vollständigen Brennstoffverbrauch je Umsetzungsjahr als Maßnahmendiffusionswert nach Gleichung (3-85):

$$re_d = E_{t,p,q} \quad (3-85)$$

Die Maßnahmen- und Technologiediffusion ergibt sich für Maßnahmenkategorie (3) nach Gleichung (3-86):

$$VH = \frac{P_s}{P_b} \quad (3-86)$$

$$re_d = AWG_{b,t} \cdot UP_{t_s} \cdot r_d \cdot aef_{2,t,m} \cdot VH$$

P_s	(MW)	Leistung der strombasierten Technologie	P_b	(MW)	Leistung der brennstoffbasierten Technologie
VH	(dl)	Verhältnis der Leistungskomponenten			

Die als Restriktion hinterlegte Restmenge der Umsetzung reflektiert die vollständige Implementierung einer Maßnahme. In Abhängigkeit des zugrundeliegenden Umsetzungsparameters berechnet sich die Restmenge der Umsetzung für die Maßnahmenkategorien (1), (5), (6), (9) und (10) nach Gleichung (3-87). Für Maßnahmenkategorie (3) gilt hingegen Gleichung (3-88).

$$re_r = nt_{b,t} \quad (3-87)$$

$$re_r = nt_{b,t} \cdot VH \quad (3-88)$$

re_r	(dl)	Restriktion verbleibende Maßnahmen- und Technologiediffusion in Abhängigkeit des Umsetzungsparameters
--------	------	---

Die beschriebenen Methoden berechnen im Modell bislang die maximale THG-Vermindernun g infolge der Umsetzung ausgewählter THG-Vermindernungsmaßnahmen je Simulationsjahr. Da das Modell alle jahresspezifisch ausgewählten Maßnahmen unter Berücksichtigung der Restriktionen umsetzt, ist eine weitere Steigerung der THG-Vermindernun g lediglich durch die Änderung der Szenarienparameter und zusätzliche THG-Vermindernungsmaßnahmen möglich. Demgemäß wird die industrielle THG-Vermindernun g zwar vorgegeben, kann aber lediglich in ihrem Maximum begrenzt werden. Reichen die Maßnahmen für das hinterlegte Klimaschutzambitionsniveau nicht aus, existiert folglich keine „Fallback Option“. Demgemäß begrenzt die übergeordnet vorgegebene CO₂-Grenze lediglich die zusätzliche Umsetzung von

Maßnahmen. Wird ein vorgegebener CO₂-Emissionswert infolge der Maßnahmenumsetzung unterschritten, endet die jahresspezifische Maßnahmenumsetzung. Ausreichend vorhandene und ausgewählte THG-Verminderungsmaßnahmen vorausgesetzt, ermöglicht die Methode vorgegebene industrielle Emissionspfade abzuleiten. Die veränderten Emissionen infolge der Maßnahmenumsetzung entsprechen dem Nenner der THG-Verminderungskostenberechnung je Maßnahmenkategorie (vgl. (3-66), (3-78) und [27]). Die Restriktion selbst errechnet sich nach Gleichung (3-89). Unterschreiten die tatsächlichen industriellen Emissionen den vorgegebenen CO₂-Grenzwert infolge der Referenzveränderung und Maßnahmenumsetzung wird zwar der Zubau von Klimaschutztechnologien gestoppt, ein Rückbau ist im Modell jedoch nicht vorgesehen.

$$re_{em} = \frac{m_{CO_2} - m_{CO_2,G}}{ef_{rf} - ef_{mn}} \text{ für } \frac{m_{CO_2} - m_{CO_2,G}}{ef_{rf} - ef_{mn}} > 0$$

$$re_{em} = 0 \text{ für } \frac{m_{CO_2} - m_{CO_2,G}}{ef_{rf} - ef_{mn}} \leq 0$$
(3-89)

re_{em} (div)	Emissionsrestriktion hinsichtlich des Umsetzungsparameters	$m_{CO_2,G}$ (tCO ₂)	exogen vorgegebene industrielle Gesamtemissionen
ef_{rf} (tCO ₂ /div)	spezifischer Emissionswert bezogen auf den Umsetzungsparameter der Referenztechnologie	ef_{mn} (tCO ₂ /div)	spezifischer Emissionswert bezogen auf den Umsetzungsparameter der Maßnahme
m_{CO_2} (tCO ₂)	aktuelle industrielle Gesamtemissionen		

Ebenso begrenzend wirkt die jahresspezifische Vorgabe eines industriellen Investitionsbudgets. Die Berechnungsmethode enthält [27].

Technologie- und Pfadrestraktionen schränken die Maßnahmenumsetzung im Technologiemixmodul weiter ein. Beim Wechsel der Verfahrensrouten metallurgischer Prozesse hin zur Sekundärerzeugung wirken Schrottverfügbarkeiten begrenzend. Gleichung (3-90) beinhaltet die Berechnung der Restriktion:

$$re_{tc} = (pw_{t,r} \cdot m_{t,hp}) - m_{t,ss}$$
(3-90)

re_{tc} (t)	Technologie- und Pfadrestraktionen	$pw_{t,r}$ (%)	Restriktion Schrottverfügbarkeit im Simulationsjahr t (Maximaler Anteil am homogenen Produkt)
$m_{t,hp}$ (t)	Masse des homogenen Produkts Stahl	$m_{t,ss}$ (t)	Masse von Sekundärstahl

THG-Verminderungsmaßnahmen und –technologien, die Effizienzgewinne bedingen, tangieren die spezifischen Energiegrenzwerte des Prozess- und Querschnittsverbrauchs. Dies gilt für die Maßnahmenkategorien (1), (6), (9) und (10).

Effizienzgewinne im Technologiemixmodul der Maßnahmenkategorien (1) und (9) sind jeweils durch die spezifischen minimalen Energiegrenzwerte je Prozess und Querschnitt beschränkt. Die Restriktion weist die noch umsetzbare absolute Menge des zugrundeliegenden Parameters in Abhängigkeit des spezifischen Verbrauchsminimums aus und resultiert aus den Formeln in (3-91).

1) wenn $e_{t,p} - e_{ae,m} \geq e_{t,p,min}$ gilt:

$$e_{st|bs,ae} = \begin{cases} e_{ae,st|bs,m} & \text{für } e_{t,st|bs} - e_{ae,st|bs,m} \geq 0 \\ e_{t,st|bs,p} & \text{für } e_{t,st|bs} - e_{ae,st|bs,m} < 0 \end{cases}$$

2) wenn $e_{t,p} - e_{ae,m} < e_{t,p,min}$

$$ze_{st|bs} = (e_{t,p} - e_{ae,m}) \cdot pw_{ae,st|bs} \quad (3-91)$$

$$e_{st|bs,ae} = \begin{cases} ze_{st|bs} & \text{für } e_{t,st|bs} - ze_{st|bs} \geq 0 \\ e_{t,st|bs} & \text{für } e_{t,st|bs} - ze_{st|bs} < 0 \end{cases}$$

$$re_{sp,st|bs} = \frac{e_{st|bs,ae} \cdot m_p}{e_{st|bs,ae,m}}$$

$e_{t,p}$	(MWh/t)	Spezifischer Energieverbrauch des Prozesses in t	$e_{t,p,min}$	(MWh/t)	Minimum spezifischen Energieverbrauchs des Prozesses
$e_{st|bs,ae}$	(MWh/t)	Berechnete mögliche Änderung des spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauchs	$e_{t,st|bs}$	(MWh/t)	Spezifischer Energieverbrauch unterteilt in den spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauch
$pw_{ae,st|bs}$	(%)	Prozentuale Verteilung der initialen Strom- und Brennstoffänderung durch die Maßnahme	$ze_{st|bs}$	(MWh/t)	Zwischenergebnis spezifische Strom- und Brennstoffänderung
$re_{sp,st|bs}$	(t)	Restriktion spezifischer Energiegrenzwert	m_p	(t)	Produktionsmenge des Prozesses
$e_{st|bs,ae,m}$	(MWh/t)	Initiale Änderung des spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauchs durch die Maßnahme	$e_{ae,m}$	(MWh/t)	Initiale Änderung des spezifischen Energieverbrauchs durch die Maßnahme

Auf Querschnittsebene wirkt die Energieeffizienz (9) auf den Industrieverbrauch. Um das Energieintensitätsminimum einzuhalten, ist zunächst nach Gleichung (3-92) der abziehbare Energieverbrauch je Querschnitt zu berechnen.

$$E_{ae,q} = E_q - BWS_q \cdot ei_{q,min}$$

$$E_{st|bs,aw,q,ab} = \begin{cases} E_{st|bs,aw,q} & \text{falls } E_{ae,q} \geq E_{aw,q} \\ \frac{E_{st|bs,aw,q}}{E_{aw,q}} \cdot E_{ae,q} & \text{falls } E_{ae,q} < E_{aw,q} \end{cases} \quad (3-92)$$

$$re_{sp,st|bs} = \frac{\sum_{u=1}^q E_{st|bs,aw,q,ab}}{e_{st|bs,ae,m}}$$

$E_{ae,q}$	(MWh)	Mögliche Änderung des Querschnittsverbrauchs je Wirtschaftszweig	E_q	(MWh)	Energieverbrauch Querschnitt je Wirtschaftszweig
$E_{aw,q}$	(MWh)	Energieverbrauch je Querschnitt, Anwendungsbezug der Maßnahme	$E_{st|bs,aw,q}$	(MWh)	Strom- und Brennstoffverbrauch Querschnittsebene, Anwendungsbezug der Maßnahme
$e_{st|bs,ae,m}$	(MWh/Stk)	spezifische Strom- und Brennstoffverbrauchsänderung durch Umsetzung der Maßnahme auf Industriebene	$re_{st|bs}$	(Stk)	Resultierende Restriktion Energieintensität hinsichtlich der Betriebsanzahl auf Industriebene
$E_{st|bs,aw,q,ab}$	(MWh)	Abziehbarer Strom- und Brennstoffverbrauch je Querschnitt			

Da die Maßnahmenkategorien (6) und (10) das jeweils hinterlegte spezifische Energieminimum auf Prozess- und Querschnittsebene selbst verändern, wird der absolute Energieverbrauch als Grenzwert für die Umsetzung herangezogen. Auf Prozessebene gilt

Gleichung (3-93). Auf Querschnittsebene ist zudem noch ein Anwendungsbezug je Maßnahme hinterlegt.

$$re_{st|bs} = \frac{E_{st|bs,p}}{E_{st|bs,ae,m}} \quad (3-93)$$

$E_{st|bs,ae,m}$	(div)	Änderung des Strom- und Brennstoffverbrauchs durch Maßnahme	$re_{st|bs}$	(div)	Restriktion Strom- und Brennstoffverbrauch
$E_{st|bs,p}$	(div)	Strom- und Brennstoffverbrauch je Prozess			

Das Minimum über alle Restriktionen bestimmt letztlich die tatsächliche Umsetzung basierend auf dem zugrundeliegenden Parameter. Der minimale Restriktionswert legt folglich die Umsetzung fest (vgl. Gleichung (3-94)).

$$UP_{re} = \min \bar{r}\bar{e} \quad (3-94)$$

UP_{re}	(div)	Restriktionsbasierte Umsetzungsmenge hinsichtlich des Umsetzungsparameters	$\bar{r}\bar{e}$	(div)	Vektor mit Restriktionen bezogen auf den Umsetzungsparameter
-----------	-------	--	------------------	-------	--

In die Umsetzungsentscheidung miteinzubeziehen ist bei Maßnahmen und Technologien auch die notwendige Reinvestition bezogen auf den zugrundeliegenden Umsetzungsparameter. Die Reinvestition erfolgt für die Maßnahmenkategorien (1), (2), (3), (5), (6), (9), und (10). Die jahresspezifisch notwendige Reinvestition ergibt sich nach Gleichung (3-95):

$$ri_v = \begin{cases} UP_{t,ld,TM} - UP_{t,ld,Ref} & \text{für } UP_{t,ld,TM} - UP_{t,ld,Ref} \geq 0 \\ 0 & \text{für } UP_{t,ld,TM} - UP_{t,ld,Ref} < 0 \end{cases} \quad (3-95)$$

$UP_{t,ld,Ref}$	(div)	Umsetzungsparameter zum Zeitpunkt p aus Vektor mit Altersstruktur an Position der Lebensdauer im Referenzmodul	$UP_{t,ld,TM}$	(div)	Umsetzungsparameter zum Zeitpunkt p aus Vektor mit Altersstruktur an Position der Lebensdauer im Technologiemixmodul
ri_v	(div)	Reinvestition bezogen auf den Umsetzungsparameter, vorläufig			

Die Reinvestition wird stets ökonomisch wirksam. Energetisch wirksam wird die Reinvestition im Modell nur, wenn aufgrund ökonomischer und emissionsseitiger Restriktionen ein Rückbau von bereits umgesetzten THG-Verminderungstechnologien erfolgt. Entscheidend sind in diesem Zusammenhang die Budget- und die Emissionsrestriktion, die einen Rückbau von THG-Verminderungstechnologien durch fehlende Reinvestition anreizen. Es gilt nach Gleichung (3-96):

$$ri = \min(re_b, re_{em}, ri_v) \quad (3-96)$$

ri	(div)	Reinvestition bezogen auf den Umsetzungsparameter
------	-------	---

Die umgesetzte Menge hinsichtlich des zugrundeliegenden Umsetzungsparameters ergibt sich schließlich nach Gleichung (3-97):

$$UP = UP_{re} + ri - ri_v \quad (3-97)$$

Durch die restriktionsbasierte Umsetzungsstruktur ist es möglich, beliebig viele weitere Restriktionen für die Umsetzungsentscheidung je Maßnahmenkategorie zu implementieren. Denkbar wäre eine Umsetzung in Abhängigkeit maximaler THG-Verminderungskosten je Maßnahme.

3.3.3.3 Umsetzung

Die restriktionsbasierte Methode ermöglicht im Vergleich zu [27] einerseits den Zubau, andererseits den Rückbau von Klimaschutzmaßnahmen und -technologien unter Berücksichtigung der Altersstruktur im Simulationszeitraum. Das Aufgliedern der Wirtschaftszweige in Prozesse und Querschnitt schafft zusätzlich die Option, die Maßnahmenwirkung stets zielgerichtet auf den jeweiligen energiewirtschaftlichen Parameter auf Prozess- und Querschnittsebene auszurichten. Genauere energieträger- und anwendungsscharfe Transformationspfade der Industrie sind die Folge.

Die tatsächliche Umsetzung erfordert es, die zuvor berechnete umgesetzte Menge und den jahresspezifischen Altersstrukturvektor je Maßnahme und Technologie zu berücksichtigen.

Bestückung, Nicht-Bestückung, Umsetzungs- und verbleibender Anwendungsgrad der Umsetzungsmatrix am Ende des Jahres ergeben sich für die Maßnahmenkategorien (1), (5), (6), (9), (10) nach den Gleichungen in (3-98):

$$\begin{aligned}
 bt_{e,t} &= bt_{b,t} + UP_{t,m} \\
 nt_{e,t} &= nt_{b,t} - UP_{t,m} \\
 UMG_{e,t} &= \frac{bt_{e,t}}{bt_{e,t} + nt_{e,t}} \quad (3-98)
 \end{aligned}$$

$$AWG_{e,t} = \frac{nt_{e,t}}{bt_{e,t} + nt_{e,t}} \text{ wobei gilt } AWG + UMG = 1$$

$bt_{e,t}$	(div)	Bestückung am Jahresende	$nt_{e,t}$	(div)	Nicht-Bestückung am Jahresende
$UMG_{e,t}$	(dl)	Umsetzungsgrad am Jahresende	$AWG_{e,t}$	(dl)	Anwendungsgrad am Jahresende
$UP_{t,m}$	(div)	Umsetzungsmenge der Maßnahme			

Die relevante Änderung des Technologiebestandes resultiert aus Gleichung (3-99). Der heuristische Algorithmus nach dem FIFO-Prinzip der Gleichungen (3-26), (3-27) und (3-28) berücksichtigt die Änderung im Technologiebestand.

$$\Delta bt_e = UP_{t,m} \quad (3-99)$$

Verfahrensroutenwechsel (2) können multiple Technologieänderungen bewirken. Dementsprechend ist festzustellen, von welchen Verfahrensrouten innerhalb des homogenen Produkts die umgesetzte Menge bezogen wird. Eine konstruierte und nach THG-Verminderungskosten priorisierte Liste dient als Ausgangsbasis. Die Liste enthält die Referenzroute und alle weiteren Verfahrensrouten mit höheren THG-Verminderungskosten in absteigender Reihenfolge. Die Formeln in (3-100) beschreiben die Listenbildung, Formel (3-101) die Priorisierung.

$$\vec{m}_{vra} = m_{vra} \text{ mit } vra = \{1 \dots vrhp\} \setminus \{vr\} \text{ und } VK_{vr} < VK_{vra} \quad (3-100)$$

$$\text{Für jedes geordnete Element der Liste gilt: } VK_{vra} \geq VK_{vra+1}, \{vr, vra, vrhp\} \in \mathbb{N} \quad (3-101)$$

\vec{m}_{vra}	(t)	Vektor mit Produktionsmengen der weiteren Verfahrensrouten vra des homogenen Produkts	$vrhp$	(dl)	Alle Verfahrensrouten des homogenen Produkts
vr	(dl)	Substitutionsroute auf die sich Maßnahme bezieht	VK	(€/tCO ₂)	Verminderungskosten

Der konstruierte Produktionsmengenvektor der weiteren Verfahrensrouten wird solange über die Elemente aufsummiert, bis die umgesetzte Menge der Verfahrensrouten erreicht ist. Es gelten die Formeln in (3-102):

$$c = c + 1, \text{ bis gilt: } \sum_{r=1}^c m_{vra,r} > m_{vr,UP} \text{ mit } c \in \mathbb{N}$$

$$\vec{m}_{vra,ae,i} = \begin{cases} m_{vra,c} & 1 \leq i < c \text{ mit } \{c, i\} \in \mathbb{N} \\ \sum_{r=1}^c m_{vra,r} - m_{vr,UP} & i = c \text{ mit } \{c, i\} \in \mathbb{N} \\ 0 & c < i \leq n_{vra} \text{ mit } \{c, i, n_{vra}\} \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (3-102)$$

$m_{vr,UP}$	(t) Umgesetzte Produktionsmenge für die Substitutionsroute auf die sich Maßnahme bezieht	$\vec{m}_{vra,ae,i}$	(t) Änderungsvektor mit Produktionsmengen der weiteren Verfahrensrouten
n_{vra}	(Stk) Anzahl der weiteren Verfahrensrouten	c	(dl) Zählparameter

Auch für den Verfahrensroutenwechsel gelten die Gleichungen in (3-98) zur Berechnung veränderter Parameter in der Umsetzungsmatrix. Die Altersstruktur des zugrundeliegenden Umsetzungsparameters ergibt sich nach Gleichung (3-103). Der zuvor berechnete Änderungswert je Verfahrensrouten des homogenen Produkts dient als Grundlage.

$$m_{1,vr} = m_{1,vr} + m_{vr,UP} \quad (3-103)$$

$$m_{1,vra} = m_{1,vra} - m_{ae,vra}$$

$m_{1,vr}$	(t) Position 1 im jahresspezifischen Produktionsmengenvektor der Verfahrensrouten vr	$m_{1,vra}$	(dl) Position 1 im jahresspezifischen Produktionsmengenvektor der weiteren Verfahrensrouten vra
------------	--	-------------	---

Maßnahmenkategorie (3)¹⁹ nutzt die installierte Leistung als zugrundeliegenden Umsetzungsparameter, um brennstoffbasierte Querschnittstechnologien mittels Wärmepumpen zu elektrifizieren. Die Gleichungen in (3-104) beschreiben die Berechnung der technischen Parameter in der Umsetzungsmatrix.

$$bt_{e,t} = bt_{b,t} + UP_{t,m}$$

$$nt_{e,t} = nt_{b,t} - \frac{UP_{t,m}}{VH}$$

$$UP_{e,t} = bt_{e,t} + nt_{e,t}$$

$$UMG_{e,t} = \frac{bt_{e,t}}{bt_{e,t} + nt_{e,t}}$$

$$AWP_{e,t} = \frac{nt_{e,t}}{bt_{e,t} + nt_{e,t}} \text{ mit } AWP + UMG = 1$$

VH	(t) In der Maßnahme hinterlegtes Verhältnis zwischen der zu installierender elektrischer und der zu substituierender Brennstoffleistung
------	---

Die veränderte Altersstruktur nach Gleichung (3-99) ergibt sich durch die Addition der Umsetzungsmenge mittels FIFO-Prinzip nach den Gleichungen in (3-26), (3-27) und (3-28).

Die technologieunabhängigen Maßnahmenkategorien (4) und (11) weisen keine Bestückung aus, nutzen jedoch den brennstoffscharfen Prozess- und Querschnittsverbrauch in der

¹⁹ Elektrifizierung von Querschnittstechnologien auf Prozessebene

Umsetzungsmatrix zur Berechnung des Umsetzungs- und Anwendungsgrads nach Gleichung (3-105). Technologieausstattung und Altersstruktur entfallen bei dieser Maßnahmenkategorie.

$$UMG_{e,t} = \frac{UP_{t,m}}{E_{t,q,p}} \quad (3-105)$$

$$AWG_{e,t} = 1 - UMG_{e,t}$$

Bei den Maßnahmenkategorien (6) und (2) ergeben sich weitere technologiespezifische Berechnungen. Maßnahmenkategorie (6) implementiert neue Brenntechnologien. Dementsprechend ist die Brennermatrix um neue Technologien zu erweitern und der Anteil je Brenner neu zu berechnen.

Beim brennstoffbezogenen Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel auf Prozessebene ist die Brennermatrix anzupassen. Der Anteil je Brenner und Prozess entspricht dem Umsetzungsgrad der Brenntechnologie nach Gleichung (3-106):

$$pw_{t,br,tc} = UMG_{e,t,tc} \cdot 100 \text{ mit } \sum_{j=1}^{tc} pw_{t,br,j} = 100\% \quad (3-106)$$

$pw_{t,b,tc}$ (%) Anteil je Brenntechnologie und Prozess	$UMG_{e,t,tc}$ (dl) Umsetzungsgrad der neuen Brenntechnologie
--	---

Verfahrensroutenwechsel ändern Produktionsmengen und Massenbilanzen und führen als Folge der Verflechtung industrieller Wertschöpfungsketten zur Anpassung multipler Prozesse. So beeinflusst beispielsweise der Verfahrensroutenwechsel von der hochofenbasierten Primär- zur recyclingbasierten Sekundärstahlherstellung die Verfügbarkeit von Hüttensand in der Zementindustrie. Zunächst sind allgemein die Massenbilanzen der Prozesse nach den Gleichungen in (3-36) neu zu berechnen. Anschließend wird die Massenbilanz bottom-up hinsichtlich des homogenen Produkts zusammengefasst. Massenbilanzen und modellierte Wertschöpfungsketten ermöglichen einzelne industrielle Verkettungseffekte modellseitig zu berücksichtigen. Tritt die beschriebene Veränderung einer Massenbilanz infolge der Maßnahmenumsetzung ein, sind die Produktionsmengen und Massenbilanzen der verbundenen Prozesse neu zu berechnen. Zum Beispiel wird die Auswirkung der geringeren Hüttensandverfügbarkeit infolge des Verfahrensroutenwechsels von Hochofenstahl- hin zur Sekundärstahl- und H₂-Stahlerzeugung nach den Gleichungen in (3-37) berechnet. Massenbilanz, Produktionsmenge des Anlagenparks und Energieverbrauch sind anschließend neu zu ermitteln. Weiterhin bewirkt der Wechsel von Zement zu innovativen Bindemitteln eine indirekte Reduktion der Klinkerproduktion in Deutschland. Auch diese wird bei Massenbilanzen und Produktionsmengen berücksichtigt.

3.3.3.4 Energieverbrauch

Die Wirkung der Maßnahmenumsetzung auf den energieträger- und anwendungsscharfen Verbrauch unterscheidet sich ebenfalls hinsichtlich der Maßnahmenkategorie. Prozessmaßnahmen verändern den Energieverbrauch auf Prozessebene, Querschnittsmaßnahmen auf Querschnittsebene je Wirtschaftszweig.

Die prozentuale anwendungs- und energieträgerscharfe Verteilung dient zur Berechnung veränderter Energieverbräuche infolge der Maßnahmenumsetzung auf Prozessebene nach Gleichung (3-107) für die Maßnahmenkategorien (1), (2) und (5). Bei Verfahrensroutenwechseln (2) ist der zugrundeliegende Umsetzungsparameter bei der Erhöhung einer Verfahrensrouten positiv und reziprok negativ.

$$\underline{E}_{st|bs,p} = \underline{E}_{st|bs,p} - (UP_m \cdot e_{st|bs,ae} \cdot p_{w_{st|bs}}) \quad (3-107)$$

$p_{w_{st|bs}}$ (%)	Prozentuale Verteilung der energieträger- und anwendungsscharfen Strom- und Brennstoffmatrizen	UP_m (div)	Umsetzungsmenge der Maßnahme
$e_{st|bs,ae}$ (MWh/div)	spezifische Energieänderung in Folge der Maßnahmenumsetzung	$\underline{E}_{st|bs,p}$ (MWh)	Energieträger- und anwendungsscharfen Strom- und Brennstoffmatrizen

Maßnahmenkategorie (6) verwendet den optimierten Energieträgermix als Grundlage zur Berechnung der Energiewirkung. Der Wechsel vom bestehenden auf den optimierten Energieträgermix bevorzugt mittels eines heuristischen Algorithmus den Austausch fossiler Energieträger nach den Formeln in (3-108):

$$c = c + 1 \text{ bis gilt } \sum_{j=1}^{v(c)} \vec{E}_j \geq e_p \cdot UP_m \text{ mit } v(1) = \{M, K, SB\}, v(2) = \{M, K, SB, FG\},$$

$$v(3) = \{M, K, SB, FG, B\}, v(4) = \{M, K, SB, FG, B, W, SG, SFL, SFE\} \text{ und } c \leq 4 \quad (3-108)$$

$$\vec{E}_i = \begin{cases} E_i & i \in v(c) \\ 0 & i \notin v(c) \end{cases}$$

E_j (MWh)	Energieverbrauch über die Brennstoffe j im Brennstoffvektor	e_p (MWh/t)	Spezifischer Energieverbrauch des Prozesses
UP_m (t)	Umgesetzte Menge	\vec{E}_i (MWh)	Vektor mit Energieverbrauch
M : Fossiles Öl	K : Fossile Kohlen	SB : Sonstige Brennstoffe	FG : Fossile Gase
W : Wasserstoff	SG : Synth. Gase	SFL : Synth. Öl	SFE : Synth. Kohlen

Die prozentuale Verteilung der in (3-108) ermittelten brennstoffscharfen Verbrauchssenkung schafft gemeinsam mit dem optimierten Zielenergiemix die Basis, um die tatsächlich Brennstoffänderung in Folge der Maßnahmenumsetzung nach Gleichung (3-109) zu bestimmen. Die Anwendungsschlüsselung der Brennstoffänderung und die anschließende Addition zum originären Brennstoffverbrauch beschreiben die Formeln in (3-110):

$$\vec{E}_{ae} = (e_p - e_{mn}) \cdot UP \cdot \overline{pw}_{z,opt} - e_p \cdot UP \cdot \overline{pw}_s \quad (3-109)$$

$$\underline{E}_{ae,neg} = \vec{E}_{ae,i} \cdot \underline{pw}_{aw,i} \text{ mit } i = \{1 \dots et\} \text{ und } \vec{E}_{ae,i} < 0$$

$$\underline{E}_{ae,pos} = \vec{E}_{ae,i} \cdot \underline{pw}_{\vec{E}_{ae,neg}} \text{ mit } i = \{1 \dots et\} \text{ und } \vec{E}_{ae,i} \geq 0 \quad (3-110)$$

$$\underline{E}_{bs} = \underline{E}_{bs} + \underline{E}_{ae}$$

$$\underline{pw} = pw_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{\sum_{i=1}^{et} a_{i,j}} \text{ mit } a_{i,j} \in \underline{A}: \{1, \dots, et\} \times \{1, \dots, aw\} \rightarrow D(i, j) \mapsto a_{i,j} \quad (3-111)$$

\vec{E}_{ae}	(MWh)	Vektor mit der brennstoffscharfen Verbrauchsänderung	e_p	(MWh/t)	Spezifischer Energieverbrauch des Prozesses
$\overline{pw}_{z,opt}$	(%)	Vektor mit brennstoffscharfer Zielverteilung, optimiert	\overline{pw}_s	(%)	Vektor mit brennstoffscharfer Startverteilung
\underline{pw}_{aw}	(%)	Matrix mit Anwendungsverteilung (vgl. Gleichung (3-11))	$\vec{E}_{ae,i}$	(MWh)	Vektor mit ausgewählten brennstoffscharfen Verbräuchen
$\underline{pw}_{\vec{E}_{ae,neg}}$	(%)	Matrix mit Verteilung der negativen Brennstoffänderung nach Gleichung (3-111)	$\underline{E}_{ae,neg}$	(MWh)	Matrix mit negativen Werten aus Energieänderung \vec{E}_{ae}
$\vec{E}_{ae,pos}$	(MWh)	Vektor mit positiven Werten	et	(dl)	Alle Energieträger des Modells
\underline{E}_{bs}	(MWh)	Anwendungs- und brennstoffscharfe Verbrauchsmatrix	\underline{E}_{ae}	(MWh)	Matrix mit gesamter brennstoffscharfer Änderung

Maßnahmenkategorie (3)²⁰ substituiert ebenfalls bevorzugt fossile Energieträger nach den Formeln in (3-108). Die Änderung des Energieverbrauchs resultiert aus den Gleichungen in (3-112).

$$E_{p,st,aw} = E_{p,st,aw} + UP_m \cdot Vls$$

$$\vec{E}_{p,bs,aw} = E_{p,bs,aw} - \frac{UP_m}{VH} \cdot Vls \cdot p_{bs,f} \text{ mit } VH = \frac{P_{ae,st}}{P_{ae,bs}} \quad (3-112)$$

$E_{p,st,aw}$	(MWh)	Stromverbrauch Prozesse p der Anwendung aw	$\vec{E}_{p,bs,aw}$	(MWh)	Brennstoffvektor Prozesse p der Anwendung aw
UP	(div)	Umsetzungsparameter	Vls	(h)	Volllaststunden des Prozesses
VH	(dl)	Verhältnis zwischen Stromleistung und Brennstoffleistung	$\{P_{ae,st}, P_{ae,bs}\}$	(MW)	Strom- und Brennstoffleistung

Die mit Effizienzgewinnen²¹ und -verlusten²² einhergehende Energieveränderung erfordert die Neuberechnung der spezifischen Verbräuche nach Gleichung (3-46). Durch die Technologiewechsel erhöht (CO₂-Abscheidung) und verringert sich (Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel) zudem der Grenzwert des vorgegebenen spezifischen Energieminimums. Gleichung (3-113) zeigt die Berechnungsmethode.

²⁰ Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel auf Prozessebene, Elektrifizierung von Querschnittstechnologien

²¹ z.B. Energieeffizienz (1), Elektrifizierung (3), Brennerwechsel (6)

²² z.B. CO₂-Abscheidung (5)

$$e_{t,min} = e_{t,min} - \frac{E_{ae}}{m_p} \quad (3-113)$$

$e_{t,min}$	(MWh/t)	Minimaler spezifischer Energieverbrauch je Prozess im Technologiemixmodul	E_{ae}	(MWh)	Energieänderung durch Maßnahmenumsetzung
m_p	(t)	Produktionsmenge des Prozesses			

Die anwendungsscharfen THG-Verminderungsmaßnahmen der Maßnahmenkategorien (9) und (10) beziehen sich auf den gesamten Industrieverbrauch. Die Maßnahmenwirkung auf Industriebene wird top-down auf die Querschnittsebene je Wirtschaftszweig geschlüsselt. Gleichung (3-114) verteilt die zunehmende Querschnittseffizienz prozentual auf die Energieträger der jeweiligen Anwendung.

$$\vec{E}_{ind,st|bs,aw} = \vec{E}_{ind,st|bs,aw} - (UP_m \cdot e_{st|bs,ae} \cdot \vec{pW}_{st|bs,ind}) \quad (3-114)$$

$\vec{E}_{ind,st|bs,aw}$	(MWh/t)	Vektor mit Strom- und Brennstoffverbrauch der Anwendung	$\vec{pW}_{st|bs,ind}$	(%)	Vektor mit Verteilung der Strom- und Brennstoffverbräuche
$e_{st|bs,ae}$	(MWh/Stk)	spezifischer Änderung des Strom- und Brennstoffverbrauchs infolge der Maßnahmenumsetzung			

Die sich durch die Umsetzung der Querschnittseffizienzmaßnahme ergebende energieträgerscharfe Verbrauchsdifferenz wird auf den Querschnittsverbrauch der Wirtschaftszweige nach (3-115) aufgeteilt. Die Schlüsselung des elektrifizierten Brennstoffverbrauchs auf Querschnittsebene verwendet den Anteil des Brennstoffverbrauchs je Anwendung. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Anwendung durch die Elektrifizierung beibehalten wird. Zudem wird bei der Elektrifizierung auf Querschnittsebene (10) zunächst mittels des in den Gleichungen in (3-108) hinterlegten Algorithmus die zu elektrifizierende prozentuale Brennstoffmatrix erzeugt. Die Berücksichtigung der veränderten Energieverbräuche erfolgt anschließend mit veränderter Energieträgeraufteilung.

$$\vec{E}_{q,st|bs,aw} = \vec{E}_{q,st|bs,aw} - (UP_m \cdot e_{st|bs,ae} \cdot pW_{q,st|bs,ae} \cdot \vec{pW}_{st|bs,q}) \quad (3-115)$$

$e_{st|bs,ae}$	(MWh/Stk)	spezifischer Änderung des Strom- und Brennstoffverbrauchs infolge der Maßnahmenumsetzung	$\vec{pW}_{st|bs,q}$	(%)	Vektor mit Strom und Brennstoffverteilung der Anwendung
$\vec{E}_{q,st|bs,aw}$	(MWh)	Strom- und Brennstoffvektor für Anwendung aw auf Querschnittsebene	$pW_{q,st|bs,ae}$	(%)	In Abhängigkeit der Energieintensitätsgrenze auf Querschnittsebene abgeleiteter prozentualer Anteil je Querschnitt
$\vec{pW}_{st|bs,q}$	(%)	Vektor mit Strom und Brennstoffverteilung der Anwendung			

Die Maßnahmenkategorien (9) und (10) verlangen die Neuberechnung der Energieintensitätswerte je Querschnitt, die sich nach Gleichung (3-116) ergeben.

$$ei_t = e_t - \frac{E_{ae} \cdot pW_{q,ae}}{BWS_q} \quad (3-116)$$

$ei_{t,TM}$	(MWh/€)	Energieintensität	E_{ae}	(MWh)	Energieverbrauchsänderung
BWS_q	(€)	Bruttowertschöpfung Querschnitt	$pW_{q,ae}$	(%)	Anteil je Querschnitt an Energieverbrauchsänderung

Infolge der Elektrifizierung (10) erzielte Effizienzgewinne bedingen die Aktualisierung der Energieintensitätsgrenze auf Querschnittsebene nach Gleichung (3-117).

$$ei_{min,t} = ei_{min,t} - \frac{UP_m \cdot e_{ae} \cdot pW_{q,ae}}{BWS_q} \quad (3-117)$$

$ei_{min,t}$	(MWh/€)	Minimale Energieintensität	e_{ae}	(MWh/Stk)	spezifische Energieverbrauchsänderung
UP_m	(Stk)	Umsetzungsmenge			

Bei Energieträgerwechseln ohne Technologiewechsel²³ ist keine Änderung des Energieverbrauchs zu erwarten. Dementsprechend ergibt sich die Änderung des Energieträgermix anhand der optimierten Energieträgerverteilung und des jahresspezifischen Umsetzungsgrades nach Gleichung (3-118). Die Aufteilung der Energieträger auf die Anwendungen erfolgt nach den Gleichungen (3-109), (3-110) und (3-111).

$$\vec{E}_{ae} = \vec{E}_{p|q} - E_{p|q} \cdot UMG_e \cdot \vec{pW}_{bs,opt} + E_{p|q} \cdot AWG_e \cdot \vec{pW}_{bs,s} \quad (3-118)$$

\vec{E}_{ae}	(MWh)	Brennstoffscharfer Vektor mit Energieänderung	$\vec{E}_{p|q}$	(MWh/Stk)	Vektor mit brennstoffscharfem Verbrauch Prozess
UMG_e	(dl)	Umsetzungsgrad am Ende des Jahres	AWG_e	(dl)	Anwendungsgrad am Ende des Jahres
$\vec{pW}_{bs,opt}$	(%)	Prozentuale Verteilung des optimierten Brennstoffmix	$E_{p|q}$	(MWh)	Kumulierter Brennstoffverbrauch Prozess bzw. Querschnitt
$\vec{pW}_{bs,s}$	(%)	Prozentuale Verteilung des Brennstoffmix aus Referenzveränderung			

Sich infolge der Maßnahmenumsetzung ändernde energetische Einflussgrößen bedingen die erneute bottom-up Berechnung der aktivitätsbasierten Parameter. Die Lastgänge gehen analog zur Referenzveränderung des Technologiemiixmoduls auf Prozess- und Wirtschaftszweigebene hervor (vgl. Abschnitt 3.3.2) [27]. Ebenfalls sind energetischen Parameter von Prozess- und Querschnittsebene auf Wirtschaftszweig- und Industrieebene zu heben und auf verschiedenen Ebenen zu aggregieren. Die generischen Aggregationsvorgänge beschreibt Tabelle 3-6 in Kapitel 3.4.

3.3.3.5 Emissionen

Die Maßnahmenumsetzung im Technologiemiixmodul erfordert die Neuberechnung der Emissionen und damit einhergehender Parameter.

Die energiebedingten Emissionen ergeben sich analog zur Referenzveränderung im Technologiemiixmodul aus der Multiplikation von zeitabhängigen energieträgerscharfen Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren abzüglich der abgeschiedenen CO₂-Emissionen auf Prozess- und Wirtschaftszweigebene [27].

Weiterhin sind die prozessbedingten Emissionen auf Prozessebene durch die Multiplikation von spezifischen prozessbedingten Emissionsfaktoren mit der Produktionsmenge abzüglich der CO₂-Abscheidung zu ermitteln [27]. Um die im Technologiemiixmodul hinterlegte CO₂-Abscheidung auf Prozessebene bottom-up einbeziehen zu können, ist ihr jeweiliger Wert bei der individuellen Maßnahmenumsetzung zu aktualisieren. Anschließend wird die CO₂-Abscheidung auf Prozess- und Wirtschaftszweigebene berücksichtigt

²³ Maßnahmenkategorien (4) und (11), vgl. Abbildung 3-5

(vgl. Gleichung (3-63)). Auch die Emissionsparameter werden bei der auf höhere Ebenen gehoben und aggregiert. Die Aggregation erfolgt ebenfalls nach Tabelle 3-6 in Kapitel 3.4.

3.3.3.6 Wechselwirkung der Maßnahmenumsetzung

Das Technologiemitmixmodul berücksichtigt wechselseitige Effekte individueller THG-Verminderungsmaßnahmen, die sich infolge der Maßnahmenumsetzung ergeben. Neben den Wechselwirkungen, die sich wegen Mehrfacheffekten verschiedener Maßnahmen auf die gleichen energiewirtschaftlichen Parameter ergeben, kann die Umsetzung individueller Maßnahmen den zugrundeliegenden Umsetzungsparameter weiterer Maßnahmen selbst beeinflussen. Der Wechsel zwischen alternativen Verfahrensrouten (2) verschiebt die Produktionsmenge einzelner Prozesse. Infolgedessen ändern sich die zugrundeliegenden Umsetzungsparameter weiterer konnotierter Prozessmaßnahmen. Beispielsweise ist es möglich, dass eine mit einer zusätzlichen Effizienztechnologie ausgestatteten Produktionsanlage durch den Verfahrensroutenwechsel entfällt. In der Referenzveränderung berücksichtigen die Gleichungen (3-53), (3-54), (3-55), (3-56), (3-57), (3-58) und (3-59) den steten Wandel der zugrundeliegenden Umsetzungsparameter im Referenzmodul sowie die damit verbundenen Rückwirkungen auf die Umsetzungsmatrix und die Altersstruktur. Die Verschiebung der Produktionsmenge bedingt die Neuberechnung relevanter Umsetzungsparameter der Maßnahmenkategorien (1), (5) und (6) nach Gleichung (3-119) im Technologiemitmixmodul:

$$\begin{aligned}
 UP_n &= UP_a + UP_{ae} \\
 \Delta UP_n &= \Delta UP_a + UP_{ae} \\
 bt_{b,t} &= bt_{b,t} + UMG_{b,t} \cdot UP_{ae} \text{ und } nt_{b,t} = nt_{b,t} + AWG_{b,t} \cdot UP_{ae} \\
 bt_{e,t} &= bt_{e,t} + UMG_{e,t} \cdot UP_{ae} \text{ und } nt_{e,t} = nt_{e,t} + AWG_{e,t} \cdot UP_{ae}
 \end{aligned}
 \tag{3-119}$$

$$aef1_{t,m} = \begin{cases} \frac{UP_a + UP_{ae}}{UP_{g,t_s}} & \text{für } t > t_{s,mn} \\ 1 & \text{für } t \leq t_{s,mn} \end{cases}$$

$\{UP_n, UP_a, UP_{ae}\}$ (div)	Neuer, alter und veränderter Wert des Umsetzungsparameters	UP_{t_s} (div)	Umsetzungsparameter im Startjahr der Maßnahmenumsetzung
$\{\Delta UP_n, \Delta UP_a\}$ (div)	Neuer und alter Delta-Wert zum Vorjahr	$t_{s,mn}$ (div)	Startjahr der Umsetzung der individuellen Maßnahme

Neben der Umsetzungsmatrix beeinflusst der Verfahrensroutenwechsel (2) die Altersstruktur zugrundeliegender Umsetzungsparameter der Maßnahmenkategorien (1), (5) und (6) nach dem FIFO-Prinzip der Gleichungen (3-26), (3-27) und (3-28). Der notwendige Übergabeparameter, der die Änderung der Altersstruktur je Technologie beinhaltet, resultiert aus Gleichung (3-120).

$$\Delta UP_A = UP_{ae} \cdot UMG_{e,t}
 \tag{3-120}$$

ΔUP_A (div)	Veränderung Altersstruktur als Grundlage für den heuristischen FIFO-Algorithmus
---------------------	---

Nahezu jede Prozessmaßnahme verändert den zugrundeliegenden Umsetzungsparameter der dritten Maßnahmenkategorie, die die installierte Leistung nutzt. Die Neuberechneten Parameter der Umsetzungsmatrix von Maßnahmen der Kategorie (3) ergeben sich nach den Formeln in (3-121), (3-122) und (3-123). Drei Fälle sind zu unterscheiden:

- Fall 1: Gleichung (3-121) beschreibt den Fall, indem eine Maßnahme der Maßnahmenkategorie noch nicht umgesetzt ist und auch im Simulationsjahr nicht umgesetzt wird.
- Fall 2: Gleichung (3-122) beschreibt den Fall, indem eine Maßnahme der Maßnahmenkategorie im Simulationsjahr bereits umgesetzt ist.
- Fall 3: Gleichung (3-123) beschreibt den Fall, indem eine Maßnahme der Maßnahmenkategorie im Simulationsjahr auf der Maßnahmenliste enthalten ist, jedoch erst nachgelagert umgesetzt wird.

Die je Fall nicht ausgewiesenen und Neuberechneten Parameter werden aus der originären Umsetzungsmatrix entnommen.

Fall 1: $t < t_{s,m}$

$$bt_{b,t,n} = bt_{e,t,n} = \begin{cases} \frac{E_{t,st}}{Vls_t} & \text{für } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} < bt_{e,t} \\ bt_{e,t} & \text{für } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} \geq bt_{e,t} \end{cases} \quad (3-121)$$

$$nt_{b,t,n} = nt_{e,t,n} = \frac{E_{t,bs}}{Vls_t}$$

$$UP_{b,n} = UP_{e,n} = bt_{e,t,n} + nt_{e,t,n}$$

$$\Delta UP_n = UP_{b,t,n} - UP_{b,t-1}$$

$bt_{b,t,n}$	(div)	Neue Bestückung des Umsetzungsparameters zu Beginn des Jahres	$bt_{b,t,n}$	(div)	Neue Bestückung des Umsetzungsparameters am Ende des Jahres
$t_{s,mn}$	(a)	Startjahr der individuellen Maßnahme	$nt_{b,t,n}$	(div)	Neue Nicht-Bestückung zu Beginn des Jahres
$nt_{e,t,n}$	(div)	Neue Nicht-Bestückung am Ende des Jahres	ΔUP_n	(div)	Neuer Delta-Wert zum Vorjahr
$UP_{e,n}$	(div)	Neuer Wert des Umsetzungsparameters am Ende des Jahres	$UP_{b,n}$	(div)	Neuer Wert des Umsetzungsparameters zu Beginn des Jahres

Fall 2: $t \geq t_{s,m}$ und $i \geq i_{mn}$ mit $i \in \mathbb{N}$

$$bt_{e,t,n} = \begin{cases} \frac{E_{t,st}}{Vls_t} & \text{für } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} < bt_{e,t} \\ bt_{e,t} & \text{für } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} \geq bt_{e,t} \end{cases}$$

$$nt_{e,t,n} = \frac{E_{t,bs}}{Vls_t}$$

$$UP_{e,n} = bt_{e,t,n} + nt_{e,t,n}$$

$$aef2_{t,m,n} = \frac{nt_{e,t,n} - nt_{e,t,a}}{nt_{e,t,a}}$$

$$aef1_{t,m,n} = aef2_{t,m,n} \cdot aef1_{t,m,a} + aef1_{t,m,a}$$

$$UMG_e = \frac{bt_{e,t,n}}{UP_{e,n}} \text{ und } AWG_e = \frac{nt_{e,t,n}}{UP_{e,n}} \text{ mit } UMG_e + AWG_e = 1$$

$aef2_{t,m,n}$ (div)	Änderungsfaktor 2 neu	$aef1_{t,m,n}$ (div)	Änderungsfaktor 1 neu
$nt_{e,t,a}$ (div)	Alte Nicht-Bestückung des selben Jahres	$aef1_{t,m,a}$ (div)	Änderungsfaktor 1 alt
i_{mn} (div)	Position der Maßnahme mn in der Maßnahmenmatrix	i (dl)	Laufindex, der die aktuelle Position in der Maßnahmenmatrix anzeigt

Fall 3: $t \geq t_{s,m}$ und $i < i_{mn}$ mit $i \in \mathbb{N}$

$$bt_{b,t,n} = bt_{e,t,n} = \begin{cases} \frac{E_{t,st}}{Vls_t} & \text{für } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} < bt_{e,t-1} \\ bt_{e,t-1} & \text{für } \frac{E_{t,st}}{Vls_t} \geq bt_{e,t-1} \end{cases}$$

$$nt_{e,t,n} = \frac{E_{t,bs}}{Vls_t}$$

$$UP_{b,n} = UP_{e,n} = bt_{e,t,n} + nt_{e,t,n}$$

$$\Delta UP_n = UP_{b,t,n} - UP_{b,t-1}$$

$$aef2_{t,m,n} = \begin{cases} \frac{nt_{b,t,n} - nt_{e,t-1}}{nt_{e,t-1}} & \text{für } t > t_{s,mn} \\ aef_{t-1,bt,m} & \text{für } t = t_{s,mn} \end{cases}$$

$$aef1_{t,m,n} = \begin{cases} aef2_{t,m,n} \cdot aef1_{t-1,m,a} + aef1_{t-1,m,a} & \text{für } t > t_{s,mn} \\ aef1_{t,m,a} & \text{für } t = t_{s,mn} \end{cases}$$

$$UMG_{b,t} = UMG_{e,t} = \frac{bt_{b,t,n}}{bt_{b,t,n} + nt_{b,t,n}}$$

$$AWG_{b,t} = AWG_{e,t} = \frac{nt_{e,t,n}}{bt_{e,t,n} + nt_{e,t,n}} \text{ mit } UMG_{b,t} + AWG_{b,t} = 1$$

Fallunabhängig ergibt sich die veränderte Altersstruktur von Technologien der Maßnahmenkategorie (3) nach dem FIFO-Prinzip der Gleichungen (3-26), (3-27) und (3-28). Der notwendige Übergabeparameter, der die Änderung der Altersstruktur je Technologie beinhaltet, resultiert aus Gleichung (3-124).

$$\Delta bt_e = bt_{e,t,n} - bt_{e,t,a} \quad (3-124)$$

3.3.3.7 Ökonomie

Die annuitätischen Kosten der Investition und etwaigen Reinvestition ergeben sich durch die Multiplikation des Annuitätenfaktors mit den spezifischen Kosten der Maßnahme und der umgesetzten Menge je Investition und Reinvestition. Die Investitionsmatrix nimmt die jahresspezifischen Vektoren mit den Annuitäten in vertikale Jahresspalten auf. Die jahresspezifischen Kosten der Investition ergeben sich durch Summenbildung über die horizontalen Jahreszeilen [27].

$$An_{t,tc} = k_{iv,t,tc} \cdot af_{tc} \cdot (UP_m + UP_{ri})$$

$$\underline{A}_t = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,1} & \dots & a_{i,t} \end{pmatrix} \text{ mit } \tilde{a}_{i,t} = \begin{cases} An_{t,tc} & \text{mit } i = \{t \dots t + ld - 1\} \ i \in \mathbb{N} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-125)$$

$$K_{iv,t,tc} = \sum_{j=1}^t a_{t,j}$$

$An_{t,tc}$ (€)	Annuität der Technologie tc	$k_{iv,t,tc}$ (div)	spezifische Investitionskosten in t der Technologie tc
$K_{iv,t,tc}$ (€)	Investitionen für Technologie tc im Jahr t	$\tilde{a}_{i,t}$ (a)	Zeilenvektor mit jahresverteilter Annuität, der die Matrix um neue Spalte je Umsetzungsjahr erweitert
\underline{A}_t (€)	Matrix mit Annuität zum Zeitpunkt t	ld (a)	Lebensdauer
t (a)	Zeitschritte	UP_m (div)	Umgesetzte Menge durch Maßnahme
UP_{ri} (div)	Reinvestition hinsichtlich des Umsetzungsparameters		

Die operativen fixen Betriebskosten beschreiben im Modell nicht-annuitätische Maßnahmenkosten. Je Maßnahme resultieren die fixen Betriebskosten aus der Multiplikation spezifischer fixer Betriebskosten mit der im Vergleich zum Referenzmodul veränderten Umsetzungsmenge im Technologiemixmodul nach Gleichung (3-126). Die im Technologiemixmodul berechneten Investitions- und fixen Betriebskosten reflektieren demgemäß die Zusatzkosten der individuellen Maßnahmenumsetzung ggü. dem Referenzmodul.

$$K_{o,t,tc} = k_{t,o,tc} \cdot \left(\sum_{j=1}^{ld} \overline{UP}_{A,TM,j} - \sum_{j=1}^{ld} \overline{UP}_{A,RM,j} \right) \quad (3-126)$$

$K_{o,t,tc}$ (€)	Fixe Operative Kosten für Technologie tc im Jahr t	$k_{t,o,tc}$ (€/div)	spezifische operative fixe Betriebskosten
------------------	--	----------------------	---

Zudem unterliegen die Investitionen einer Kostendegression in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge, die Lerneffekte mittels Lernkurven simulieren. In Abhängigkeit der Ausbringungsmenge je Technologie ist eine Kostenersparnis von bis zu 50 % möglich [27]. Sättigungskurven mit S-förmigen Verlauf, die der Lösung einer nichtlinearen, gewöhnlichen Differentialgleichung erster Ordnung nach Bernoulli entspringen, dienen zur Konstruktion technologiespezifischer Lernkurven [27].

Die jahresspezifisch restriktiv wirkende Budgetvorgabe aktualisiert sich durch den Abzug der maßnahmenspezifischen Kosten vom Restbudget vor der Maßnahmenumsetzung [27].

3.3.3.8 Umsetzungsabhängige jahresspezifische Auswertung und Validierung

Neben dem inhärenten Vorgehen der individuellen Maßnahmenumsetzung umfasst das Technologiemixmodul weitere umsetzungsabhängige Auswertungs- und

Validierungsmethoden. So sind energiewirtschaftliche Parameter auf höhere Ebenen zu aggregieren sowie auszuwerten und zu validieren. Homogene Funktionen ermöglichen eine modulübergreifende Nutzung von Aggregations-, Auswertung- und Validierungsmethoden. Dementsprechend erfolgt die Beschreibung homogener Funktionen des Referenz- und Technologiemitmixmoduls in Kapitel 3.4. Technologiemitmixspezifische Methoden bilden den Stamm nachfolgender Beschreibung.

Das Technologiemitmixmodul erfasst in einer Auswertungsmatrix den jahresspezifisch restriktiv wirkenden Effekt je Maßnahme. Die Restriktionen beinhaltende Auswertungsmatrix ermöglicht es, pfadbegrenzenden Effekte im Technologiemitmixmodul zu rekonstruieren. Die Auswertungsfunktionen ermitteln darüber hinaus Effekte individueller Maßnahmen auf die technoökonomischen Parameter, die nachträglich nicht bottom-up über Aktivitätsgrößen berechenbar sind. Darunter fallen maßnahmenindividuelle energieträger- und anwendungsscharfe Verbrauchs- und Emissionsänderungen auf Prozess- und Querschnittsebene. Dazu ermitteln die Referenzveränderung und das Umsetzungsmodul die Differenz zwischen Start- und Endwert je Parameter und speichern sie auf Listen. Die Listen dienen anschließend als Grundlage für die umsetzungsunabhängigen Auswertungen des Technologiemitmixmoduls.

Neben den Auswertungsfunktionen sind zahlreiche Validierungsfunktionen im Modell hinterlegt, die die Ergebnisse der Algorithmen überwachen und plausibilisieren. Die Validierungsfunktionen operieren auf Einzelmaßnahmen- und Gesamtebene und melden nicht plausible Ergebnisse wie negative Energiewerte oder das Unterschreiten vorgegebener Grenzwerte.

3.3.3.9 Umsetzungsunabhängige Auswertungen im Technologiemitmixmodul

Von der Maßnahmenumsetzung unabhängige Auswertungen im Technologiemitmixmodul erfüllen zwei Voraussetzungen: Einerseits ist die Berechnung vollständig durch Aktivitätsgrößen möglich, die sich in Folge der Maßnahmenumsetzung im Technologiemitmixmodul nicht ändern. Andererseits beeinflussen die berechneten Parameter die Maßnahmenumsetzung nicht.

Die definierten Voraussetzungen erfüllt die auf den im Technologiemitmixmodul erstellen Änderungslisten basierende Maßnahmenauswertung. Die Maßnahmenauswertung, die nachträglich aktivitätsgrößenbasiert berechnet wird, erfordert die Erstellung von Auswertungstabellen. Tabellen zum Maßnahmenhochlauf, der energiebedingten Emissionsänderung und der Energieträgerkosten je Maßnahmenänderung dienen als Grundlage der Auswertung.

Der Maßnahmenhochlauf der Maßnahmenkategorien (1), (2), (3), (5), (6), (9) und (10) ergibt sich nach Gleichung (3-127):

$$hl_{t,m} = UMG_{e,t,m} - (1 - AWG_{t_s,m}) \quad (3-127)$$

$UMG_{e,t,m}$ (dl)	Umsetzungsgrad am Ende des Jahres je Maßnahme	$AWG_{t_s,m}$ (dl)	Anwendungsgrad bei Maßnahmenstart je Maßnahme
$hl_{t,m}$ (dl)	Hochlauf je Maßnahme		

Maßnahmenkategorien ohne Technologiewechsel (4) und (11) weisen keinen initialen Umsetzungsgrad auf. Der Maßnahmenhochlauf resultiert nach Gleichung (3-128) anhand des

Anteils erneuerbarer Energien im errechneten optimalen Energieträgermix unter Berücksichtigung der letzten fünf Jahre:

$$hl_{t,m} = \sum_{j=1}^{ee} \vec{p}w_{t,et,m,j} \quad (3-128)$$

$\vec{p}w_{t,et,m}$ (%)	Prozentuale Verteilung des durchschn. optimalen Energieträgermix der letzten fünf Jahre je Maßnahme	ee (Stk)	Anzahl erneuerbarer Energieträger im Energieträgermix
-------------------------	---	------------	---

Die energiebedingte Emissionsänderung auf Maßnahmenebene errechnet sich durch die Multiplikation der jeweiligen Lastgänge mit den veränderten Energieverbräuchen und den energiebedingten Emissionsfaktoren nach Gleichung (3-129).

$$m_{t,EM,m} = (\vec{p}w_{l,t} \cdot \vec{E}_{ae,t,m}) \cdot \underline{ef}_{et} \quad (3-129)$$

$\vec{p}w_{l,t}$ (%)	Zwischen 0 und 1 normierter Lastgang	$\vec{E}_{ae,t,m}$ (Stk)	Änderung des energieträger- und anwendungsscharfen Verbrauchs
----------------------	--------------------------------------	--------------------------	---

Die Energieträgerkosten auf Maßnahmenebene ergeben sich durch die Multiplikation der jeweiligen Lastgänge mit den veränderten Energieverbräuchen und den spezifischen Energieträgerkosten nach Gleichung (3-130).

$$k_{t,et,m} = (\vec{p}_{l,t} \cdot \vec{E}_{ae,t,m}) \cdot \underline{k}_{et} \quad (3-130)$$

Die vorhanden und erstellten Listen dienen als Grundlage zur maßnahmenindividuellen Auswertung. Es ergeben sich fünf Dimensionen je individueller Maßnahme:

- Maßnahmenhochlauf
- Energieänderung
- Energiebedingte und prozessbedingte Emissionsänderung
- Maßnahmenkosten
- Energieträgerkosten

Generische Funktionen ermöglichen die dimensionsübergreifender Nutzung zur Auswertung. Beispielsweise werden energieträger- und anwendungsscharfe Verbräuche ebenso wie die energiebedingten Emissionen auf gleicher und höherer Ebene aggregiert. Die Berechnung kumulierter maßnahmenindividueller Änderungen energiewirtschaftlicher Parameter ergänzt die Auswertung. Das jahresspezifisch verbrauchte Budget ergibt sich zudem beispielsweise durch die Summe der Investitionen und fixen Betriebskosten über alle umgesetzten Einzelmaßnahmen. Die Auswertungen umfassen sowohl Einzelmaßnahmen als auch Maßnahmenkategorien.

Prozess- und querschnittsscharfe Energieträgerkosten resultieren analog zum Referenzmodul aus der Multiplikation energieträgerscharfer Verbräuche mit exogenen Energieträgerkosten [27].

3.4 Generische Methoden im Referenz- und Technologiemicxmodul

Generische Funktionen im Modell ermöglichen eine modulübergreifende Nutzung von Berechnungsmethoden. Die Aggregation von technoökonomischen Parametern auf selbige oder höhere Ebenen in Smlnd erfolgt im Referenz- und Technologiemicxmodul mittels generischen Funktionen. Tabelle 3-6 zeigt ausgewählte Aggregationen des Modells.

Tabelle 3-6: Aggregation und Zusammenfassung auf verschiedenen Ebenen im Modell

		zu Ebene			
		Prozess	Querschnitt	Wirtschaftszweig	Industrie
von Ebene	Prozess	energiebedingte Emissionen (Z)		Energieträger- und anwendungsscharfer Verbrauch (A)	Energieträger- und anwendungsscharfer Energieverbrauch (A)
		Energieverbrauch (Z)	-	Homogene Produkte (A)	Prozessemissionen (A)
		Lastgang (Z)		Prozessemissionen (A)	
	Querschnitt	-	Energieverbrauch (Z)	Energieverbrauch (Z)	Energieträger- und anwendungsscharfer Energieverbrauch (A)
			energiebedingte Emissionen (Z)	energiebedingte Emissionen (Z)	Prozessemissionen (A)
	Wirtschaftszweig			Energieträger- und anwendungsscharfen Prozess- und Querschnittsverbrauch (A)	Lastgänge (A)
		-	-	Prozessemissionen von Prozess- und Querschnitt (A)	Energieträger- und anwendungsscharfer Energieverbrauch (A)
				Homogene Produkte (A)	Prozessemissionen (A)
	Industrie	-	-	-	Energieemissionen (A)
		-	-	-	Energieverbrauch (Z)
				Emissionen (Z)	

A: Aggregation auf höhere Ebenen

Z: Zusammenfassung auf einer Ebene

Das Modell fasst technoökonomische Parameter auf einer Ebene zusammen. Beispielsweise werden die auf Prozessebene vorliegenden energieträger- und anwendungsscharfen Verbräuche zum Prozessenergieverbrauch zusammengefasst.

Zudem wird die Energieträger- Anwendungsmatrix jeweils auf Energieträger und Anwendungen reduziert. Dabei wird auch eine Anwendungsverteilung für Strom und Brennstoffe gemeinsam erstellt. Die brennstoffbasierte mechanische Energie wird dabei der sonstigen strombasierten mechanischen Energie zugeordnet. Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme aus der ISI Anwendungsbilanz können ohne Zuordnung addiert werden.

Um die Zeitreihen des Energieverbrauchs, der Energiebedingten Emissionen und der Energieträgerkosten auszuwerten, werden diese jeweils aggregiert.

Das Modell aggregiert außerdem Berechnungsergebnisse auf höhere Ebenen, die die Industrie oder Teilbereiche der Industrie vollständig abdecken. Beispielsweise werden die energieträger- und anwendungsscharfen Verbräuche der Hochofen-, Sekundär- und H₂-Stahlherstellung zum Prozessverbrauch auf Wirtschaftszweigebene aggregiert. Um den gesamten Wirtschaftszweigverbrauch zu erhalten, werden Prozess- und Querschnittsverbrauch zusammengefasst. Zudem werden die sich daraus ergebenden 14 energieträger- und anwendungsscharfen Wirtschaftszweigverbräuche wiederum auf Industrielevel aggregiert. Dies gilt ebenso für die Bruttowertschöpfung, Lastgänge und den energiebedingten Emissionsgang. Bei den prozessbedingten Emissionen wird zunächst der Prozess- und Querschnittsausstoß auf Wirtschaftszweigebene aggregiert, um diesen anschließend auf Industrielevel zu heben. Aus Energieträgerkosten und Maßnahmenkosten

werden weiterhin Gesamtkosten berechnet. Im Referenz- und Technologiemitmixmodul wird die CO₂-Abscheidung auf Prozess-, Wirtschaftszweig- und Industrielevel aggregiert. Methoden hinsichtlich der Zusammenfassung und der Aggregation dienen der inhärenten Berechnung und der Auswertung. Zusammenfassung und Aggregation sind abhängig von Funktion und Anwendung jahresspezifisch²⁴ oder jahresübergreifend²⁵.

Viele Methoden im Modell benötigen jahresspezifische Deltawerte energiewirtschaftlicher Parameter als Eingangsgrößen für ihre Berechnungen. Beispielsweise beruht die Referenzveränderung im Technologiemitmixmodul zu einem großen Teil auf der Fortschreibung von Differenzwerten des Referenzmoduls. Allgemein ergeben sich die jahresspezifischen Deltawerte im Referenz- und Technologiemitmixmodul mittels generischer Funktion nach Gleichung (3-131):

$$\Delta PE_t = PE_t - PE_{t-1} \quad (3-131)$$

ΔPE_t (div) Differenz zum Vorjahr für Parameter PE berechnen, gilt für Einzelwerte, Vektoren und Matrizen

Die Differenz zum Vorjahr wird beispielsweise für den energieträger- und anwendungsscharfen Prozess- und Querschnittsverbrauch, die altersabhängige Produktionsmenge, den spezifischen Prozessverbrauch und die Prozessemissionen auf Querschnittsebene berechnet. Andere technoökonomische Parameter berechnet das Modell endogen bottom-up über exogen hinterlegte Aktivitätsgrößen. Beispielsweise können die energiebedingten Emissionen stets aus den Emissionen je Energieverbrauch und dem absoluten Energieverbrauch im Technologiemitmixmodul bottom-up berechnet werden

3.5 Weitere Auswertungen im Referenz- und Technologiemitmixmodul

Weiterführende Auswertungen im Referenz- und Technologiemitmixmodul ermöglichen es, auf Basis der Ergebnisse energiewirtschaftliche Analysen durchzuführen. Außerdem dienen die Modellergebnisse als Eingangsdaten für Modellrechnungen im Bereitstellungssektor.

Das Referenz- und das Technologiemitmixmodul ermitteln den Klinker-Zementfaktor. Der Klinker-Zementfaktor gibt das Verhältnis zwischen eingesetztem Klinker und produzierten Zement an [49], [50], [51] und resultiert nach Gleichung (3-132).

$$kzf_t = \frac{m_{t,kl} - (m_{t,kl} \cdot p_{t,kl,exp})}{m_{t,zm}} \quad (3-132)$$

kzf (dl) Klinker-Zementfaktor zum Zeitpunkt t	$m_{t,k}$ (t) Klinkerproduktion zum Zeitpunkt t
$p_{t,k,exp}$ (%) Exportanteil an der Klinkerproduktion in Deutschland, Schritt t	$m_{t,z}$ (t) Zementproduktion zum Zeitpunkt t

In einem Auswertungsmodul werden die jeweiligen Szenarienergebnisse des Referenz- und Technologiemitmixmoduls aufbereitet, gegenübergestellt sowie nachgelagerte Berechnungen auf der Basis exogener Parameter durchgeführt. Beispielsweise ermittelt das Auswertungsmodul die direkten und indirekten Emissionen unter Berücksichtigung tatsächlicher Emissionen für die Herstellung synthetischer Brennstoffe. Überwiegend bereitet das Modul die Ergebnisse jedoch für die Visualisierungsmethoden auf. Um die Ergebnisse zu visualisieren, werden die

²⁴ hauptsächlich im Technologiemitmixmodul aufgrund der jahresspezifischen Maßnahmenumsetzung

²⁵ hauptsächlich im Referenzmodul, jahresübergreifende Berechnung technoökonomischer Kennwerte möglich

individuellen Maßnahmen- und Szenarienergebnisse in Tabellen überführt. Neben MATLAB-eigenen Visualisierungsoptionen nutzt das Modell Excel- und Think-Cell Darstellungsformen.

Über industrielle Einzelstandorte und generische Parameter wie die regional aufgelösten Beschäftigtenzahlen des verarbeitenden Gewerbes können die Ergebnisse des Referenz- und Technologiemicromoduls in Deutschland nachgelagert regionalisiert werden (vgl. [52]).

Die Ergebnisse des Referenz- und Technologiemicromodul sind anschließend weiter aufzubereiten und für die Datenübergabe vorzubereiten. Die Datenbankschnittstelle PGMEX verbindet Smlnd mit der Datenbank und damit mit weiteren Modellen des Bereitstellungssektors. Auf dieser Basis können iterativ Transformationspfade für das gesamte Energiesystem abgeleitet und analysiert werden [27].

4 Beschreibung der Eingangsdaten und Szenarien

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

Tabelle 4-1: Szenarienüberblick, detaillierte Quellenangaben im Anhang

	Referenzmodul	Technologiemitxmodul
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
Szenariientwicklung	Strom- und Brennstoffintensitäten und Bruttowertschöpfung sowie Produktionsmengen und spezifische Energieverbräuche	Basiert auf Referenzmodul Individuelle Umsetzung von zusätzlichen THG-Verminderungsmaßnahmen zwischen 2021 und 2050
	Keine Einzelmaßnahmenumsetzung	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 9-4	
Energieemissionsfaktoren	Stromemissionsfaktor moderat (160 g/kWh) Biomasse und synthetische Gase mit Nullemissionen, vgl. Tabelle 9-5	
Prozessemissionsfaktoren	Zeit- und szenariunabhängig, vgl. Tabelle 9-7	
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 [31], [21]	Endogene Berechnung auf Basis des Referenzmoduls im Technologiemitxmodul

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 Technologiemiixszenarien und beschreibt das Narrativ einer Zukunft ohne besondere Klimaschutzambition und damit verbundene Anstrengungen. Das Narrativ der allgemeinen industriellen Entwicklung in der Referenz ist von ökonomischen 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 Technologiemiixszenario

Die Technologiemiixszenarien des Technologiemiixmoduls 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 Technologiemiixszenarios (TM-Szenario). Das TM-Szenario strebt nach einem Klimaschutzambitionsniveau, indem ein CO₂-Verminderungsziel vorgegeben wird. Das Narrativ des TM-Szenarios beschreibt eine industrielle Entwicklung, in der ökonomische Interessen und Nachhaltigkeitsziele als gleichberechtigte 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)²⁶ subsumierten Technologien wird davon ausgegangen, dass sie aus heutiger Sicht bereits im industriellen Maßstab zur Verfügung stehen. Die erste zusätzliche Maßnahmenumsetzung ist im Technologiemiixszenario demgemäß ab dem Jahr 2021 möglich (vgl. Tabelle 4-2).

²⁶ 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 Technologiemitmixmodul verwendete Einzelmaßnahmen und der dazugehörige Diffusionsstart je Maßnahmenkategorie*

Kategorie	Prozessmaßnahmen					Querschnittsmaßnahmen			
	EE-P	VRW	EWT-S-P	EWoT-P	CC	EWT-B-P	EE-Q	EWT-S-Q	EWoT-Q
Maßnahmenkategorie*									
Anzahl Einzelmaßnahmen	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: CO₂-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	Maßnahmenkategorie*	Verfügbarkeit	Literatur
Vollelektrische Schmelzwanne zur Flach- und Hohlglasproduktion	VRW	2025	[53]
Primärstahlproduktion mittels direktreduziertem Eisen mit Wasserstoff als Reduktionsmittel und anschließendem elektrischen Schmelzen im Elektrolichtbogenofen	VRW	2025	[17]
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	[54], [55], [56]
CO ₂ -Abscheidung in der Zementindustrie	CC	2030	[57]
CO ₂ -Abscheidung in der Hochofenstahlerzeugung	CC	2025	[17]
CO ₂ -Abscheidung in der Kalkindustrie	CC	2030	[21]
CO ₂ -Abscheidung in der Methanolproduktion	CC	2030	[21]
CO ₂ -Abscheidung in der Primärkupferherstellung	CC	2030	Expertenschätzung und [21]
CO ₂ -Abscheidung in der Sekundärkupferproduktion	CC	2030	Expertenschätzung und [21]

*VRW: Verfahrensroutenwechsel; CC: CO₂-Abscheidung

Energieeffizienz im Technologiemitmixszenario (EE-P, EE-Q)

Die innerbetriebliche Abwärmenutzung, die Abwärmeverstromung und die Steigerung der allgemeinen Prozesseffizienz bilden das Rückgrat prozessspezifischer Energieeffizienz. Das

Szenario beinhaltet 69 Effizienzmaßnahmen auf Prozessebene [27]. 38 effiziente Querschnittstechnologien ergänzen die prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen. Die effiziente Bereitstellung von Klimakälte, Druckluft und Pumpen senkt den Energieverbrauch. Die zusätzliche Diffusion von effizienten Prozess- und Querschnittstechnologien beginnt im Technologiemiixszenario ab 2021.

Verfahrensroutenwechsel (VRW)

Die Maßnahmenkategorie des Verfahrensroutenwechsels beschreibt den Übergang von klassischen hin zu alternativen Produktionsroute(n) [27].

Im TM-Szenario setzt die Glasindustrie ab 2025 zunehmend auf vollelektrische Schmelzwannen zur Erzeugung von Hohl- und Flachglas [53], [27].

Das Technologiemiixszenario substituiert nebst dem die hochofenbasierte Stahlerzeugung zunehmend durch klimafreundlichere Alternativrouten. Mit der Produktion von H₂-Stahl mittels Direktreduktion von Eisenoxid und anschließendem Schmelzen im Elektrolichtbogenofen steht eine klimaschonende Alternative nach [17] ab 2025 zur Verfügung. Auch Sekundärstahl, in der Produktion im Vergleich zu Primärstahl deutlich energieärmer und klimaschonender, verdrängt die hochofenbasierte Stahlerzeugung im Zeitverlauf.

Beim Recycling metallurgischer Erzeugnisse handelt es sich um erprobte Verfahren, die bereits heute verfügbar sind. Metallurgische Recyclingverfahren versprechen infolge des geringeren Energieverbrauchs einerseits, die energiebedingten Emissionen zu verringern. Andererseits führt der Verfahrensroutenwechsel meist zu einer Senkung prozessbedingter Emissionen (z.B. in der Stahlerzeugung). Begrenzt wird das verstärkte Recycling vor allem durch die Schrottverfügbarkeit, die je nach Systembindungsdauer und historischer Produktionsmenge je Metall schwankt. Das Modell beachtet Restriktionen hinsichtlich der Schrottverfügbarkeit in Abhängigkeit des homogenen metallurgischen Produkts. So ist beispielsweise der Anteil von Sekundärstahl im Modell im Jahr 2050 auf maximal 57 % der inländischen Stahlproduktion begrenzt. Die Recyclingrestriktionen wirken jahresspezifisch im Technologiemiixmodul. Die Restriktionen entstammen den im 80-prozentigen Langfristszenario hinterlegten Anteilen je Recyclingprozess am homogenen Produktionsgut der Studie [21].

Tabelle 4-4: Im Modell angenommener maximaler Anteil der Sekundärrouten an der gesamten Produktionsmenge des homogenen Produktionsgutes ausgewählter energie- und emissionsintensiver metallurgischen Prozesse in Deutschland nach [21]

Homogenes Produktionsgut	Prozess	2030	2040	2050
Stahl	Sekundärstahl in %	47	51	57
Aluminium	Sekundäraluminium in %	68	73	77
Kupfer	Sekundärkupfer in %	46	47	49

Die Sekundärstahlproduktion ist technologisch ausgereift, wird aber durch die jahresspezifische Schrottverfügbarkeit begrenzt. Restriktionen hinsichtlich der Schrottverfügbarkeit gelten ebenfalls für die Erzeugung von Sekundäraluminium und -kupfer (vgl. Tabelle 4-4). Obwohl die Sekundärkupferproduktion technologisch ausgereift ist, setzt das Modell die Verfahrensrouten erst ab 2040 ein. Aus nationaler Sicht führt der Wechsel von Primär- auf die Sekundärkupferroute zunächst zu Mehremissionen, da maßgebliche energie- und emissionsintensive Prozessschritte der Primärproduktion im Ausland stattfinden

(vgl. Tabelle 9-8). Die Kupferherstellung verbraucht etwa 90 % der Energie im Ausland [58]. Da internationale Kooperationen bei der grenzübergreifenden Emissionsbilanzierung kurz- und mittelfristig nicht zu erwarten sind, setzt das Modell erst ab 2040 auf ein über das Referenzszenario hinausgehendes Kupferrecycling.

Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel

Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel beschreiben das Umrüsten bestehender Anlagen, um vermehrt klimaneutrale Energieträgern einsetzen zu können. Im Gegensatz zum Verfahrensroutenwechsel ändert sich der grundlegende Produktionsablauf nicht. Zusätzliche Multi-Fuel Brenner in der Zement- und Kalkindustrie ermöglichen den Einsatz potenziell klimaneutraler Brennstoffe im TM-Szenario. Der Brennstoffwechsel erfolgt optimiert in Abhängigkeit der Brennstoffmatrix je Prozess.

Die Elektrifizierung von Wärmeerzeugungsanlagen mittels Wärmepumpe und Elektrodenheizkessel auf Prozess- und Querschnittsebene vervollständigt die Methode des Energieträgerwechsels mit Technologiewechsels. Emissionsarmen Strom vorausgesetzt, führt bspw. die Elektrifizierung der industriellen Niedertemperaturwärme zu einer Emissionsverminderung. In einem Temperaturband bis 250 °C in der Industrie stehen mit der industriellen Großwärmepumpe und dem Elektrodenheizkessel bewährte Technologien zur Verfügung [27]. Die Elektrifizierung der Niedertemperaturwärme im Temperaturband unter 100 °C durch die industrielle Großwärmepumpe ermöglicht es hohe Brennstoff- durch gleichzeitig vergleichsweise geringe Strommengen zu ersetzen. Da es sich um bereits erprobte Technologien handelt, stehen diese ab 2021 im Modell zur Verfügung.

Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel

Ein Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel setzt voraus, dass industrielle Prozesse auch bei einem Wechsel des Energieträgers unverändert betrieben werden können [27]. Weisen der Referenz- und Substitutionsbrennstoffs ähnliche Eigenschaften auf, ist ein Brennstoffwechsel denkbar. Der technologieunabhängige Brennstoffwechsel erfolgt optimiert in Abhängigkeit der Brennstoffmatrix je Prozess und Querschnitt und einer Verminderungsvorgabe hinsichtlich der CO₂-Emissionen. Der Energieverbrauch ändert sich bei Maßnahmenkategorien dieses Typs nicht. Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel offerieren jedoch die bilanzielle Senkung von Energieemissionen durch den Einsatz klimaschonender Brennstoffe [27]. Beispielsweise bietet die intersektorale Verschiebung der Biomasse in den Industriesektor die Option zur Verminderung energiebedingter Emissionen, ohne die Verbrennungstechnologie ändern zu müssen. Dafür muss die Biomasse durch zusätzliche Umwandlungsschritte im Vorfeld auf ein ähnliches Energielevel wie Kohle oder weitere Brennstoffe gehoben werden. Biokohle mit ähnlichen Eigenschaften ist bereits am Markt verfügbar, bisher jedoch mengenbegrenzt und hochpreisig [27], [59], [60].

CO₂-Abscheidung

Die industrielle CO₂-Abscheidung stellt eine wichtige Option zur Verminderung prozessbedingter Emissionen dar, wie sie beispielsweise bei der Entsäuerung von Kalkstein in der Zementindustrie entstehen [27], [61]. Neben der Zementindustrie ist die Stahlindustrie ein nicht zu vernachlässigender Emittent prozessbedingter Emissionen, die überwiegend durch die Reduktion von Eisenoxid zu Eisen durch Koks-kohle in der Hochofenroute verursacht werden [27], [62]. Das TM-Szenario beinhaltet die CO₂-Abscheidung bei der Zement-, Kalk-,

Stahl-, Methanol-, Primärkupfer- und Sekundärkupfererzeugung. In der Zementindustrie ist die CO₂-Abscheidung ab 2030 [57] in der Stahlindustrie ab 2025 [17] im Modell möglich. Um eine konsistente Emissionsbilanz im Modell zu generieren, wird die CO₂-Abscheidung verbrennungsbedingter Emissionen von synthetischen Kohlenwasserstoffen in einem ersten Schritt nicht erfasst. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass das vollständig abgeschiedene CO₂ für die Produktion der synthetischen Kohlenwasserstoffe selbst genutzt und dementsprechend in den Kohlenstoffkreislauf zurückgeführt wird. Die potenziell klimaneutralen Energieträger wie synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe bilanziert das Modell ebenfalls mit Nullemissionen (vgl. Tabelle 9-5). Um jedoch die tatsächliche CO₂-Abscheidung ausweisen zu können, erfasst das Modell in einem zweiten Schritt die tatsächlich brennstoffbedingte CO₂-Abscheidung und bewertet die Emissionen der erneuerbaren Kohlenwasserstoffe nach Tabelle 9-6.

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.

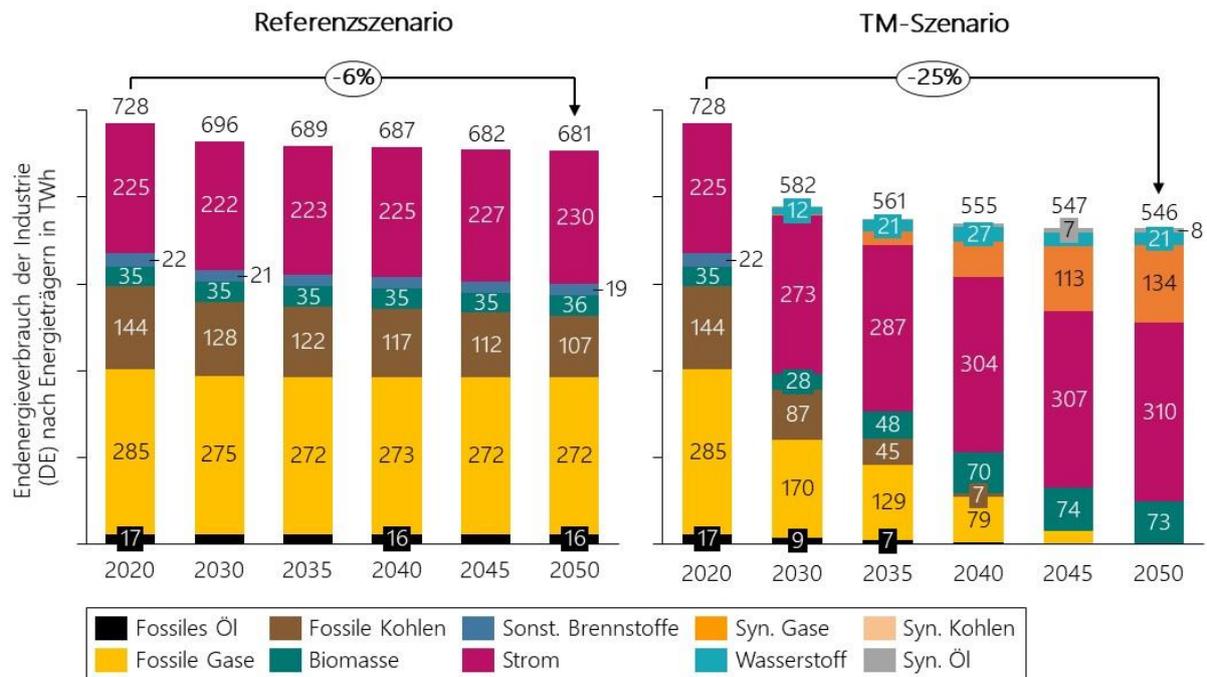


Abbildung 5-1: Energieträgerscharfe Verbrauchsentwicklung der deutschen Industrie im Referenz- und TM-Szenario

Generische Effizienzgewinne der exogenen Energieintensitäten senken den Gesamtenergieverbrauch im Referenzszenario. Die Bruttowertschöpfung in Abbildung 5-2 bestätigt, dass der Energieverbrauch trotz steigender Wirtschaftsleistung in der Referenz sinkt.

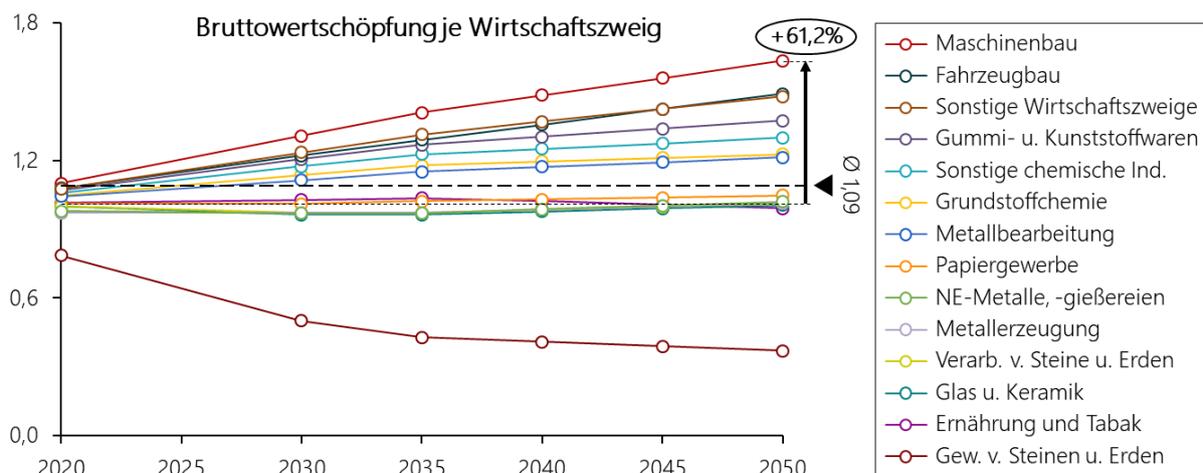


Abbildung 5-2 Exogene industrielle Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes, auf 2015 normiert

Die exogen vorgegebene Wirtschaftsleistung je Wirtschaftszweig steigt zwar um bis zu 61 % bis 2050 ggü. 2020, trotzdem verringert sich der Energieverbrauch in der Referenz um 6 % im Simulationszeitraum. Lediglich die Wirtschaftskraft der im Vergleich wenig energieintensive Gewinnung von Steinen und Erden sinkt deutlich [31], [21].

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 CO₂-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 [63], [64], 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 5-3 für 2030 und 2050 belegen die verstärkte Biomassenutzung in der Zement- und Kalkindustrie. 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 Technologiemitzenario 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: Optimierter Energieträgermix auf Prozessebene im Technologiemitzenario der Stützjahre 2030 und 2050 im Vergleich

Abbildung 5-4 vergleicht den energieträgerscharfen Verbrauch auf Wirtschaftszweigebe mit dem über die Wirtschaftszweige kumulierten Prozessverbrauch. Darauf basierend leitet sich die Prozessabdeckung je Wirtschaftszweig ab. Abbildung 5-4 belegt darüber hinaus die Konsistenz der energetischen Schichtmodellierung, da die kumulierten energieträgerscharfen Prozessverbräuche je Wirtschaftszweig stets niedriger sind als der energieträgerscharfe Wirtschaftszweigverbrauch selbst. Die Wirtschaftszweige „Papiergewerbe“ und „Metallerzeugung“ erreichen eine besonders hohe Prozessabdeckung von 97 und 93 Prozent in 2020. Da der Energieverbrauch der im Wirtschaftszweig dominierenden Stahlproduktion über die verschiedenen Verfahrensrouten stark, der Restverbrauch des Wirtschaftszweigs jedoch weniger stark abnimmt, sinkt die energetische Prozessabdeckung in 2050 ggü. 2020 in der Metallerzeugung deutlich (von 93 auf 77 %). Im Gegensatz dazu bleibt die Prozessabdeckung im Papiergewerbe zwischen 2020 und 2050 nahezu gleich.

Abbildung 5-4 veranschaulicht weiterhin, dass der Energieverbrauch des Wirtschaftszweigs oftmals von wenigen Prozessen bestimmt wird. So entspricht der Kohlenverbrauch in der Metallerzeugung nahezu dem der hochofenbasierten Primärstahlerzeugung. Ebenfalls spiegelt sich die Energieträgeraufteilung auf Wirtschaftszweigebe trotz unvollständiger

Prozessabdeckung wie in der Verarbeitung von Steinen und Erden teils deutlich wieder. Weniger energie- und emissionsintensive Wirtschaftszweige wie der Maschinen- und Fahrzeugbau beinhalten bisher keine Prozesse. Die Prozessabdeckung expliziert weiterhin, dass die exogene wirtschaftliche Entwicklung je Prozess oftmals negativer als auf Wirtschaftszweigebene eingeschätzt wird. Der Prozessverbrauch sinkt in Abhängigkeit der Produktionsmenge deutlich stärker als der verbleibende Querschnitt je Wirtschaftszweig in Abhängigkeit der Bruttowertschöpfung.

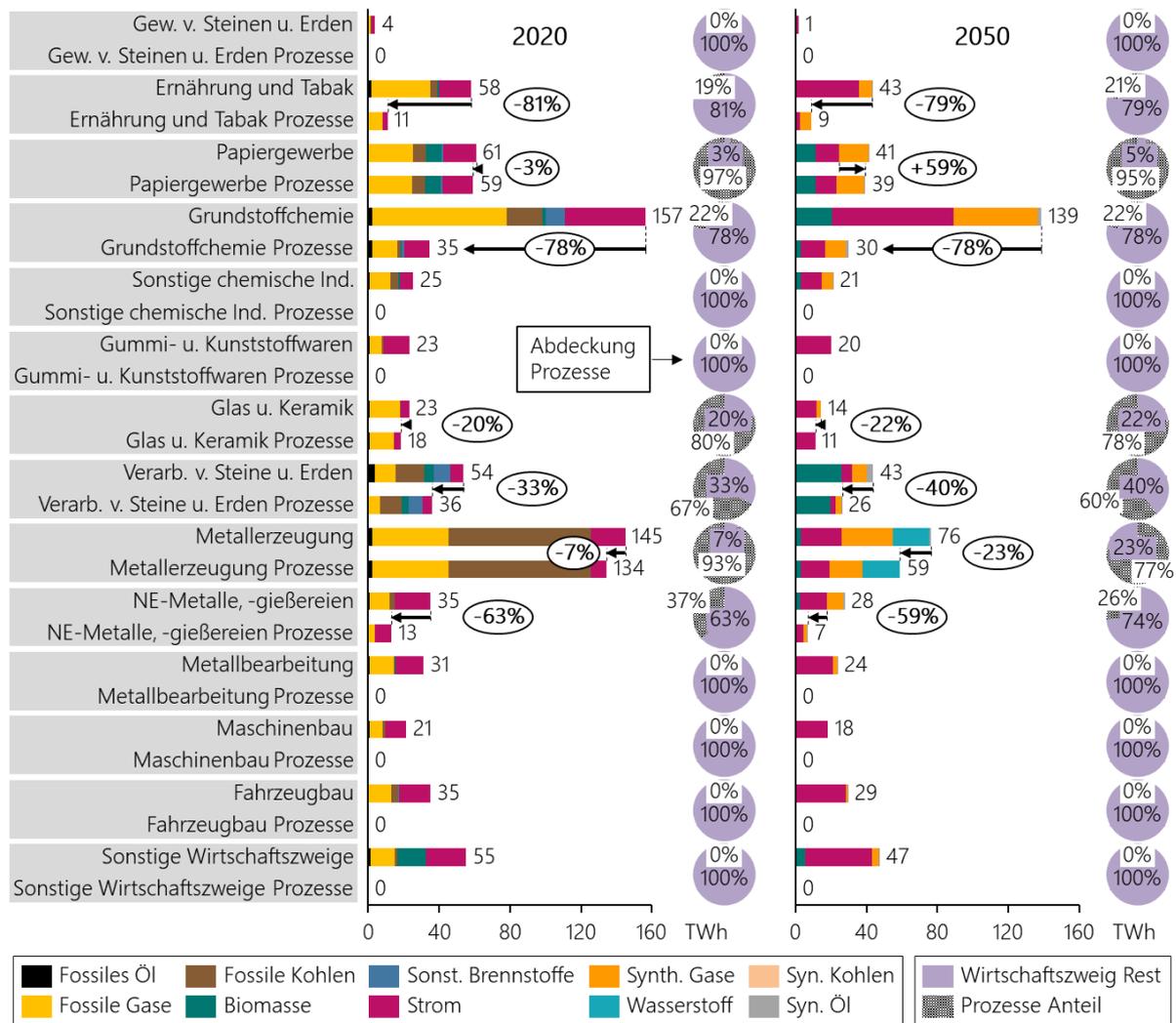


Abbildung 5-4: Energieverbrauch Wirtschaftszweige und über Wirtschaftszweige kumulierter Prozessverbrauch sowie die Prozessabdeckung je Wirtschaftszweig

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

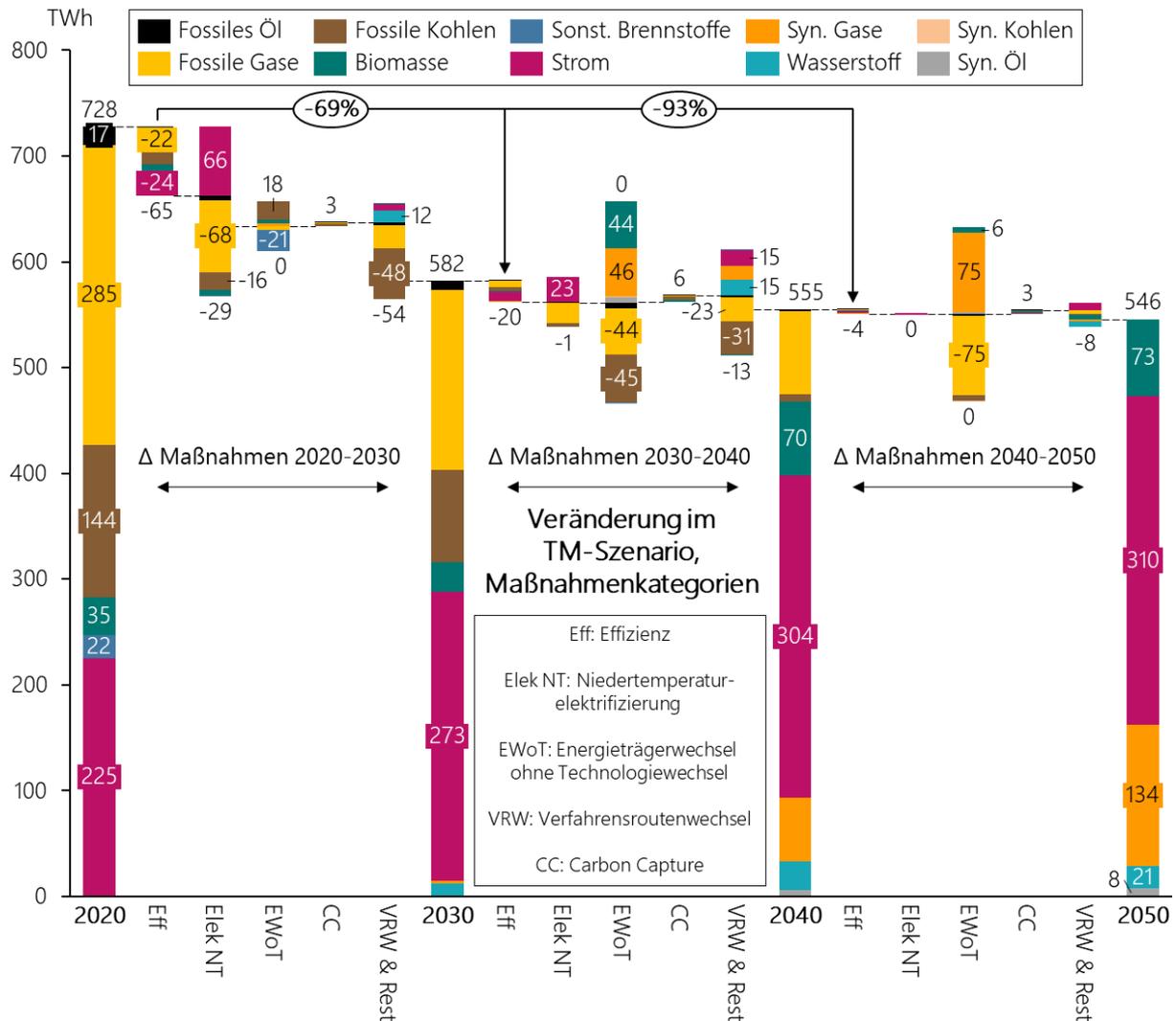


Abbildung 5-5: Energetische Maßnahmeneffekte im Zeitverlauf in Abhängigkeit von Maßnahmenclustern

Da das Szenario bis 2030 keiner CO₂-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 5-5 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. Andererseits ersetzt die Brennstoffoptimierung in Abhängigkeit der CO₂-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 CO₂-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 H₂- und Sekundärstahl. Die Verfahrensrouten Elektroflach- und -hohlglas, H₂-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 5-6 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.

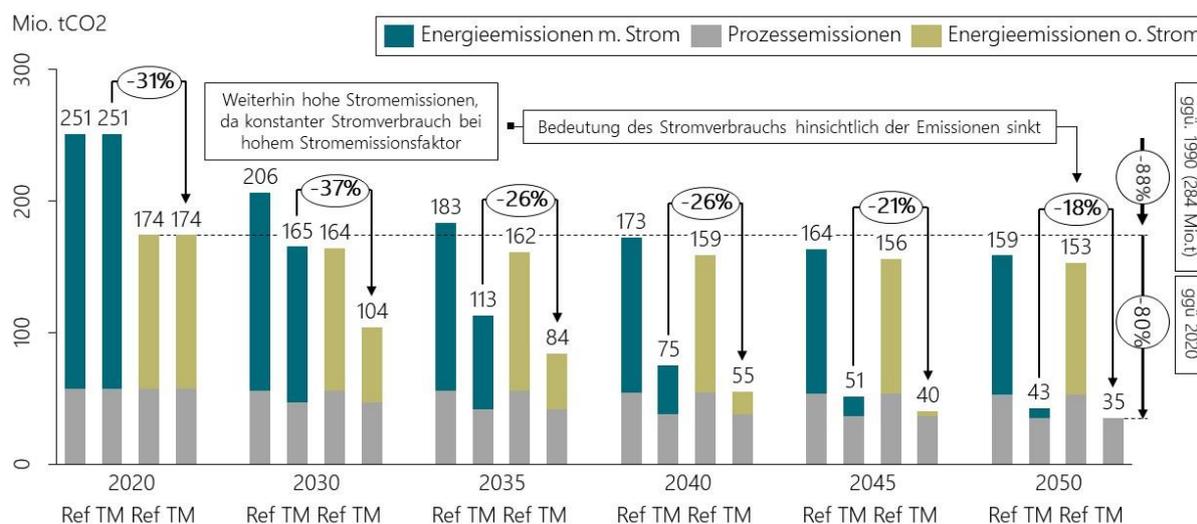


Abbildung 5-6: Energie- und prozessbedingte Emissionen in der Industrie im zeitlichen Verlauf

In 2050 emittiert der Industriesektor im TM-Szenario keine direkten energiebedingten Emissionen mehr. Nur schwer zu vermindern direkte prozessbedingte Emissionen in Höhe von 35 Mio. tCO₂ verbleiben jedoch in 2050. Die CO₂-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 CO₂-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. tCO₂.

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 gCO₂/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 5-7. 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 GtCO₂. Das in [1] ermittelte, verbleibende deutsche CO₂-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.

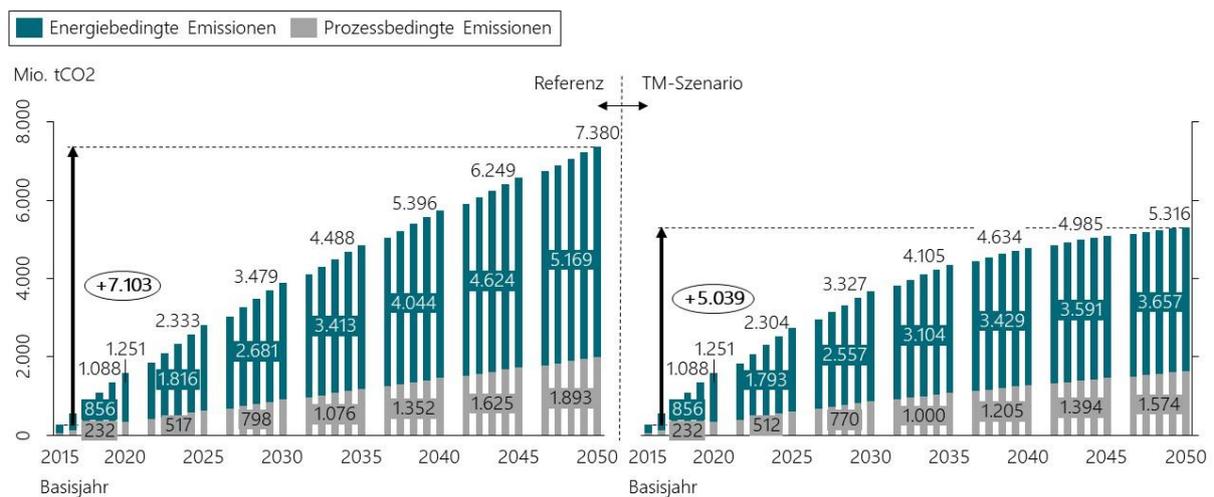


Abbildung 5-7: Kumulierte Emissionen des industriellen Referenz- und Technologiemixszenarios mit Stromemissionen im Zeitverlauf, Basisjahr 2015

Abbildung 5-8 visualisiert den im TM-Szenario zwischen den Stützjahren wirkenden Referenz- und Maßnahmeneffekt hinsichtlich der direkten und indirekten energie- und prozessbedingten sowie den direkten prozessbedingten Emissionen. In der ersten Dekade senken Effizienzmaßnahmen den CO₂-Ausstoß um 15 Mio. tCO₂. Mit der Abnahme von Effizienzpotenzialen und den Strom- und Brennstoffemissionsfaktoren²⁷ verringert sich das Verminderungspotenzial zusehends. Zwischen 2040 und 2050 senken Effizienzmaßnahmen den Strom- und Brennstoffverbrauch zwar noch um etwa 4 TWh, erreichen jedoch keine Emissionsverminderung mehr (vgl. Abbildung 5-5 & Abbildung 5-8). Die Elektrifizierung der Niedertemperaturwärme (Elek NT) senkt die energiebedingten Emissionen zwischen 2020 und 2030 trotz vorhandener Effizienzgewinne kaum (~2 Mio. tCO₂). In diesem Zeitraum ist der Stromemissionsfaktor im Schnitt höher als der Emissionsfaktor des zu ersetzenden

²⁷ Es werden zunehmend Wasserstoff, Biomasse und synthetische Kohlenwasserstoffe eingesetzt

Brennstoffs. Durch den zunehmend sinkenden Stromemissionsfaktor vermindern sich die Emissionen durch die Bestandsveränderung im Technologiemitmixmodul in den folgenden Dekaden. Die Emissionsverminderung weist das Modell nicht mehr der Niedertemperaturelektrifizierung zu, sondern verbucht den Effekt in der Referenzveränderung.

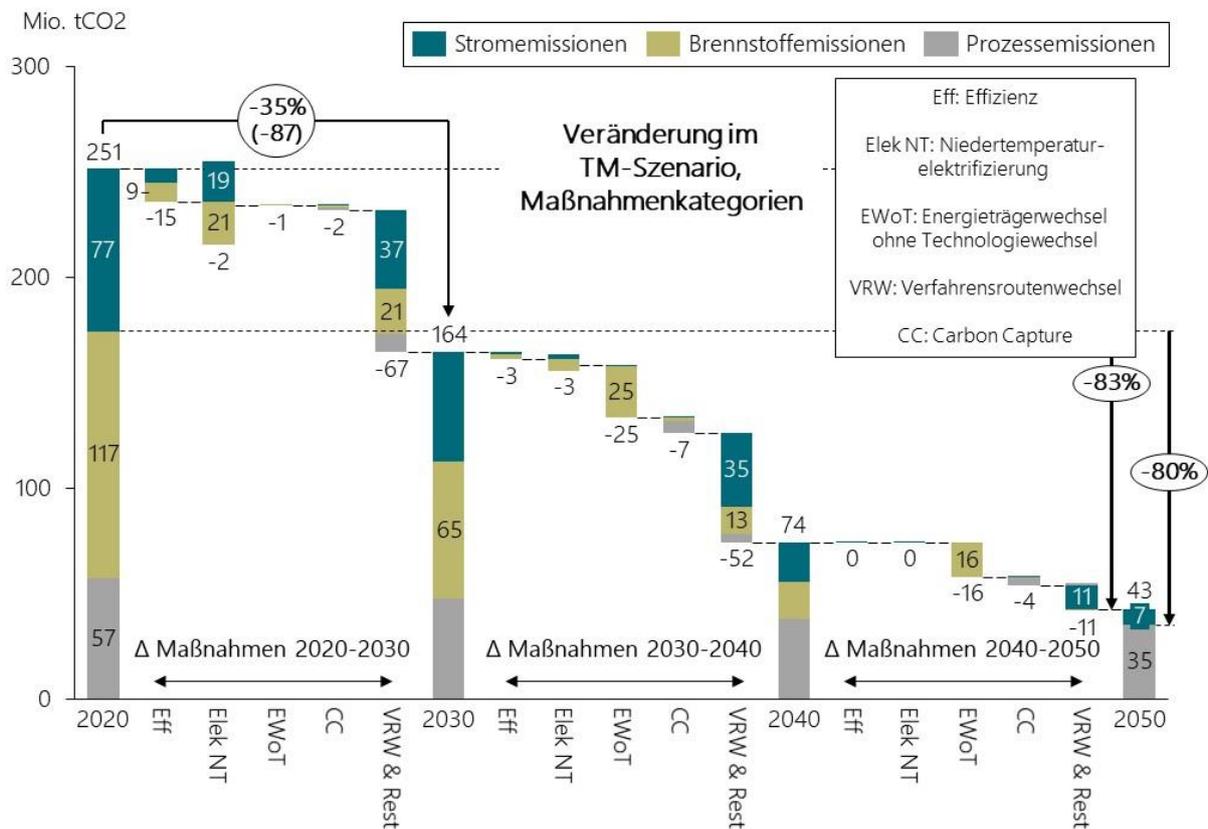


Abbildung 5-8: Emissionsseitige Maßnahmeneffekte im Zeitverlauf in Abhängigkeit von Maßnahmenclustern

Die Brennstoffoptimierung (EWoT) und die CO₂-Abscheidung senken die Emissionen im Technologiemitmixmodul kaum. Zwischen 2020 und 2030 setzt die Brennstoffoptimierung aufgrund der fehlenden CO₂-Zielsetzung und der niedrigeren Kosten auf Kohlen. Die CO₂-Abscheidung greift erst nach 2030 verstärkt, erreicht jedoch keinen erheblichen CO₂-Verminderungseffekt. Maximal 7 Mio. tCO₂ vermindert die CO₂-Abscheidung zwischen 2030 und 2040. Aufgrund der durch die Brennstoffoptimierung eingesetzten synthetischen Brennstoffe verbleiben kaum energiebedingte Emissionen für die CO₂-Abscheidung. Die CO₂-Abscheidung ist jedoch eine wichtige Option zur Verminderung prozessbedingter Emissionen. Die Verfahrensroutenwechsel, die weiteren Maßnahmen und der Referenzeffekt (VRW & Rest) senken die Emissionen um bis zu 67 Mio. tCO₂ in einer Dekade. Neben der CO₂-Abscheidung üben Verfahrensroutenwechsel einen nennenswerten Verminderungseffekt auf die prozessbedingten Emissionen aus.

Ökonomische Kennwerte

Die annuitätischen und kumulierten Mehrkosten des TM-Szenario ggü. der Referenz und die spezifischen Energieträgerkosten zwischen 2020 und 2050 zeigt Abbildung 5-9. Die wichtigsten ökonomischen Kennwerte fokussieren sich mit Ausnahme der spezifischen Energieträgerkosten auf das Technologiemitmixszenario. Für die Referenz können keine Technologiebestandskosten ausgewiesen werden. Aus Abbildung 5-9 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.

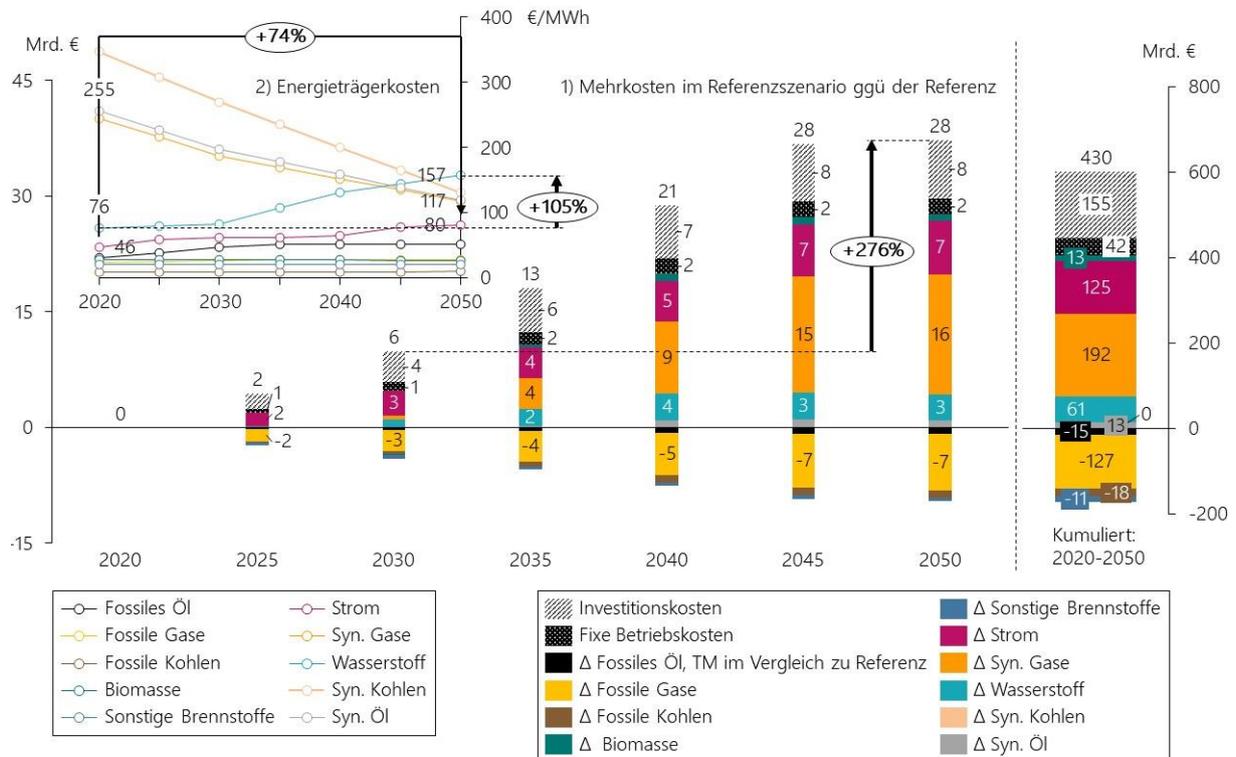


Abbildung 5-9: Annuitätische und kumulierte Mehrkosten im TM-Szenario ggü. der Referenz in Mrd. €₂₀₁₇, 1) Energieträger- und Technologiekosten sowie 2) spezifische Energieträgerkosten (€/MWh)

Verglichen mit den Energieträgerkosten fallen die kumulierten zusätzlichen Technologiekosten in Höhe von 197 Mrd. € geringer aus. Reinvestitionen, die zusätzliche individuelle Maßnahmen im Technologiemitmixmodul im Betrachtungszeitraum erfordern, inkludiert das Szenario. [19] geht zwischen 2015 und 2050 von zusätzlichen industriellen Investitionen zwischen 123 und 236 Mrd. €₂₀₁₇²⁸ 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 [19] negativ. Die Zielszenarien in [19] weisen folglich niedrigere Energiekosten als die Referenz aus. Statt auf kostspielige synthetische Brennstoffe setzen die Zielszenarien in [19] vermehrt auf die Abscheidung von CO₂, um das vorgegebene Klimaschutzambitionsniveau zu erreichen. Neben den absoluten visualisiert Abbildung 5-9 die spezifischen Energieträgerkosten, die im Referenz- und Technologiemitmixmodul 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

²⁸ 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.

Dampfreformierung und erst mit ambitionierteren CO₂-Verminderungszielen durch die Elektrolyse bereitgestellt wird [65], steigen die makroökonomischen Wasserstoffkosten im Szenario im Zeitverlauf [65].

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 9-12 im Anhang aus. Abbildung 5-10 veranschaulicht die modellhafte Verknüpfung der Stahl- mit der Zementindustrie über den Stoff „Hüttensand“ (vgl. auch Abbildung 3-4).

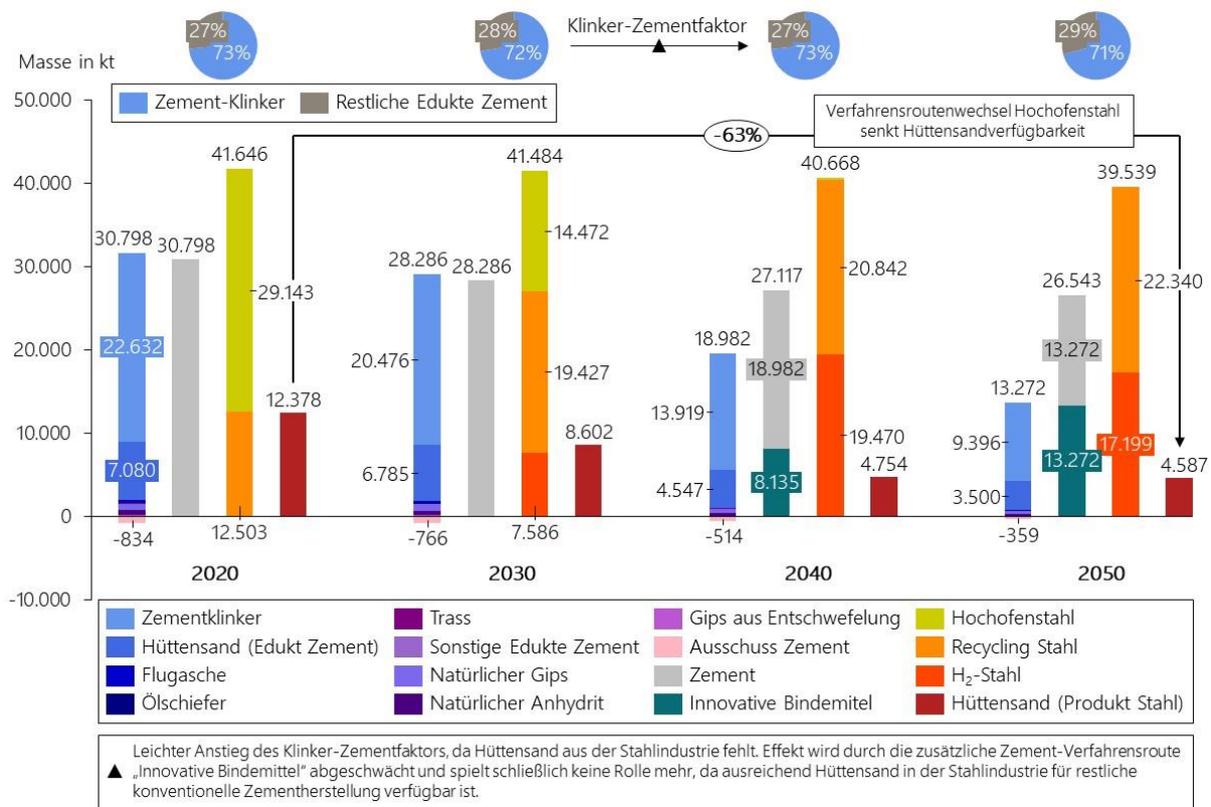


Abbildung 5-10: Verknüpfte Wertschöpfungsketten im Sektormodell Industrie am Beispiel der Stahl- und Zementindustrie, gekoppelt über Hüttensand

Abbildung 5-10 zeigt Zusammenhänge infolge stofflichen Güterausstauschs zwischen der Zementproduktion (grau) sowie deren Edukte (blau und lila) und der Stahlherstellung. So sinken aufgrund der Verfahrenswechsel von Hochofen- auf Sekundär- und H₂-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 ($0,12 \text{ t}_{\text{Hüttensand}}/\text{t}_{\text{Stahl}}$) [40]. 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. Abbildung 5-11 visualisiert die begrenzende Wirkung individueller Restriktionen im Zeitverlauf. Maßnahmen- und Technologiediffusion begrenzen die Umsetzung im Technologiemixmodul zu Beginn der Simulation aufgrund der endogen berechneten natürlichen Reinvestitionszyklen in der Industrie. Ist das individuelle Potenzial durch die zunehmende Maßnahmenumsetzung im Technologiemixmodul erschöpft, greift die Restriktion „Restmenge Umsetzung“. Ab 2041 begrenzt das Maßnahmenpotenzial die Umsetzung stärker als die Technologiediffusion. Sinkt der Energieverbrauch aufgrund der Maßnahmen- und Technologieumsetzung zunehmend, greifen auch verstärkt spezifische Energiegrenzwerte je Prozess und Querschnitt. Technologierestriktionen wie die Schrottverfügbarkeit in der Metallurgie, begrenzen die Maßnahmenumsetzung ab 2035. Infolgedessen ist die weitere Verschiebung von Primär- auf Sekundärrouten in der Stahl-, Aluminium- und Kupferindustrie nur noch eingeschränkt möglich. Ein exogenes industrielles Investitionsbudget gibt das TM-Szenario nicht vor, weswegen auch keine Budgetrestriktion greift. Ebenfalls ist der maximale Umsetzungszeitraum individueller Maßnahmen unbeschränkt. Die vorgegebene CO₂-Verminderung (95 % CO₂-Verminderung ggü. 1990) wird durch die maximale Maßnahmenumsetzung nicht erreicht.

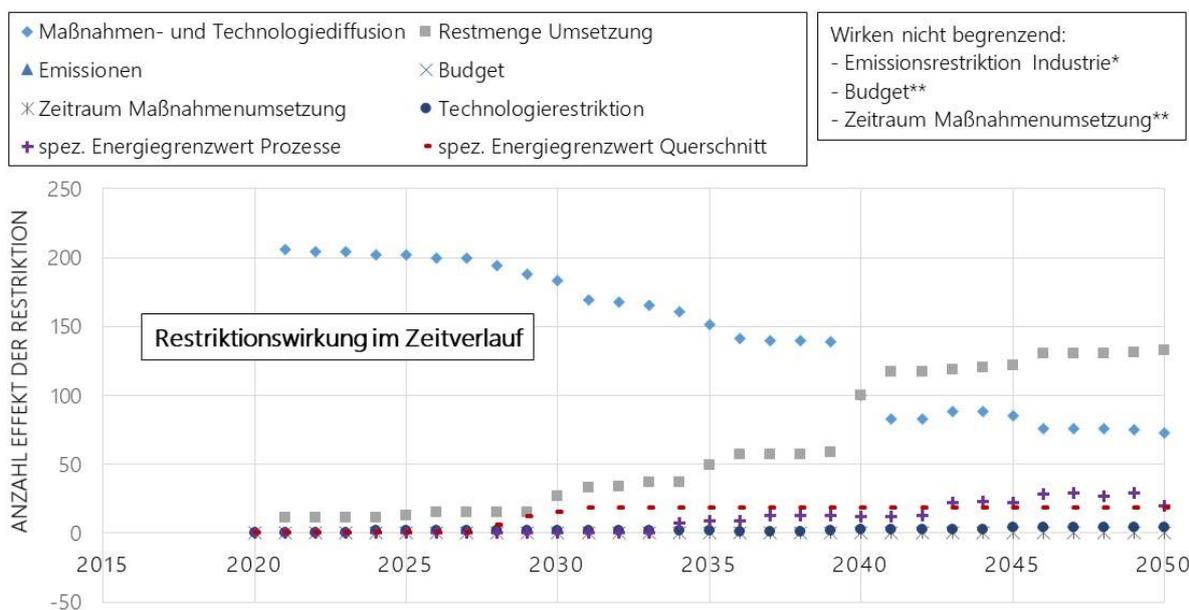


Abbildung 5-11: Zeitlicher Effekt der Restriktionen im Modell, *Maximale Maßnahmenumsetzung, **Keine Begrenzung für Budget und Zeitraum im Szenario hinterlegt.

Die tatsächliche Diffusion individueller Maßnahmen und Technologien im TM-Szenario visualisiert Abbildung 5-12. 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) das das Modell nur sehr langsam aus(Cluster 3).

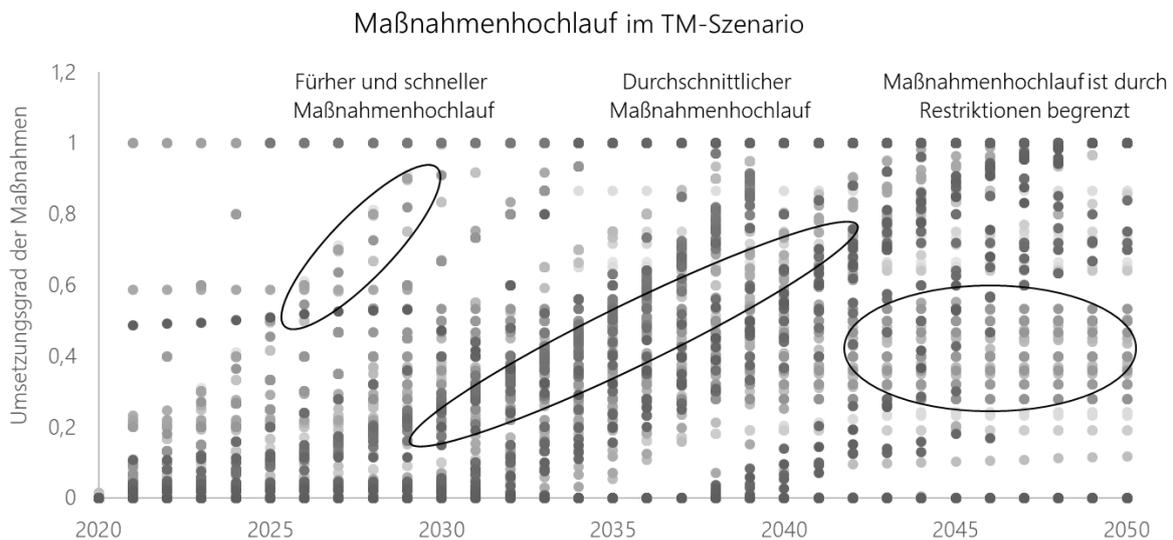


Abbildung 5-12: Maßnahmenhochlauf im TM-Szenario, 218 Maßnahmen und Technologien

Abbildung 5-13 visualisiert die Wechselwirkung zwischen hochofenbasierter Primärstahlerzeugung und der CO₂-Abscheidung im Hochofen und beschreibt damit beispielhaft wechselseitige Beziehungen individueller Maßnahmen im TM-Szenario.

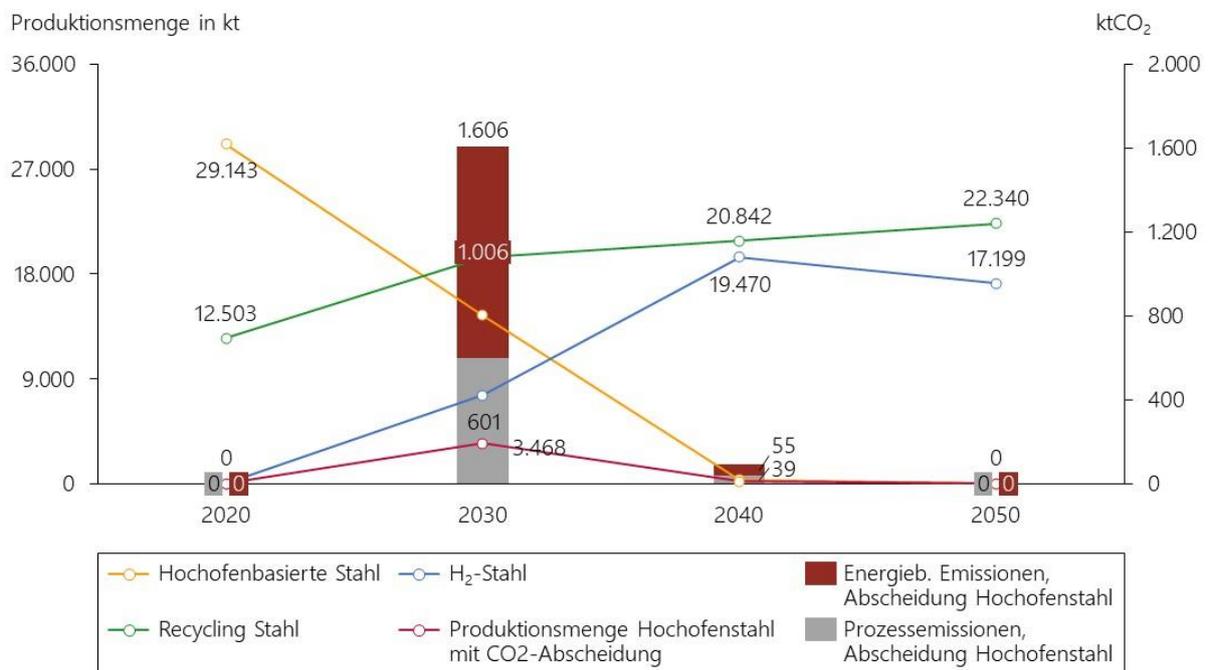


Abbildung 5-13: Wechselwirkungen zwischen individuellen THG-Verminderungsmaßnahmen im industriellen TM-Szenario, Beispiel Verfahrensroutenwechsel Stahl und CO₂-Abscheidung

Ab 2025 implementiert das Modell CO₂-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 CO₂-Abscheidungsanlagen. Bis 2040 enthält das

TM-Szenario keine hochofenbasierte Stahlerzeugung und damit auch keine CO₂-Abscheidungsanlagen in der Stahlindustrie mehr. Die maximale mit CO₂-Abscheidung produzierte Menge Hochofenstahl in Höhe von etwa 3,5 Mio t erreicht das TM-Szenario in 2030. Etwa 1,6 Mio. tCO₂ scheiden CO₂-Filteranlagen am Hochofen in 2030 ab. Die CO₂-Abscheidung in der Stahlindustrie dient im Szenario als Brückentechnologie, um die temporären und damit die kumulierten CO₂-Emissionen im Pfad zu reduzieren.

Referenz- und Technologiemitmix im Vergleich mit weiteren Industrieszenarien

Im Vergleich erreichen Referenz- und TM-Szenario hinsichtlich der CO₂-Verminderung nicht die noch höheren Reduktionswerte anderer industrieller energie- und klimapolitischer Szenarien. Insbesondere das Klimaschutzszenario 2050 [23] erzielt durch eine Kombination aus hoher CO₂-Abscheidung und Energieeffizienz einen negativen CO₂-Ausstoß. Abbildung 5-14 vergleicht die industriellen Referenz- und Zielszenarien der Studien [23] (KSZ-T, KSZ-Z95), [19] (KP-T, KP-Z95), [66] (IEW-T, IEW-Z95-EL, IEW-Z95-TM) und [20] (THG-Z95) mit dem Referenz- und TM-Szenario.

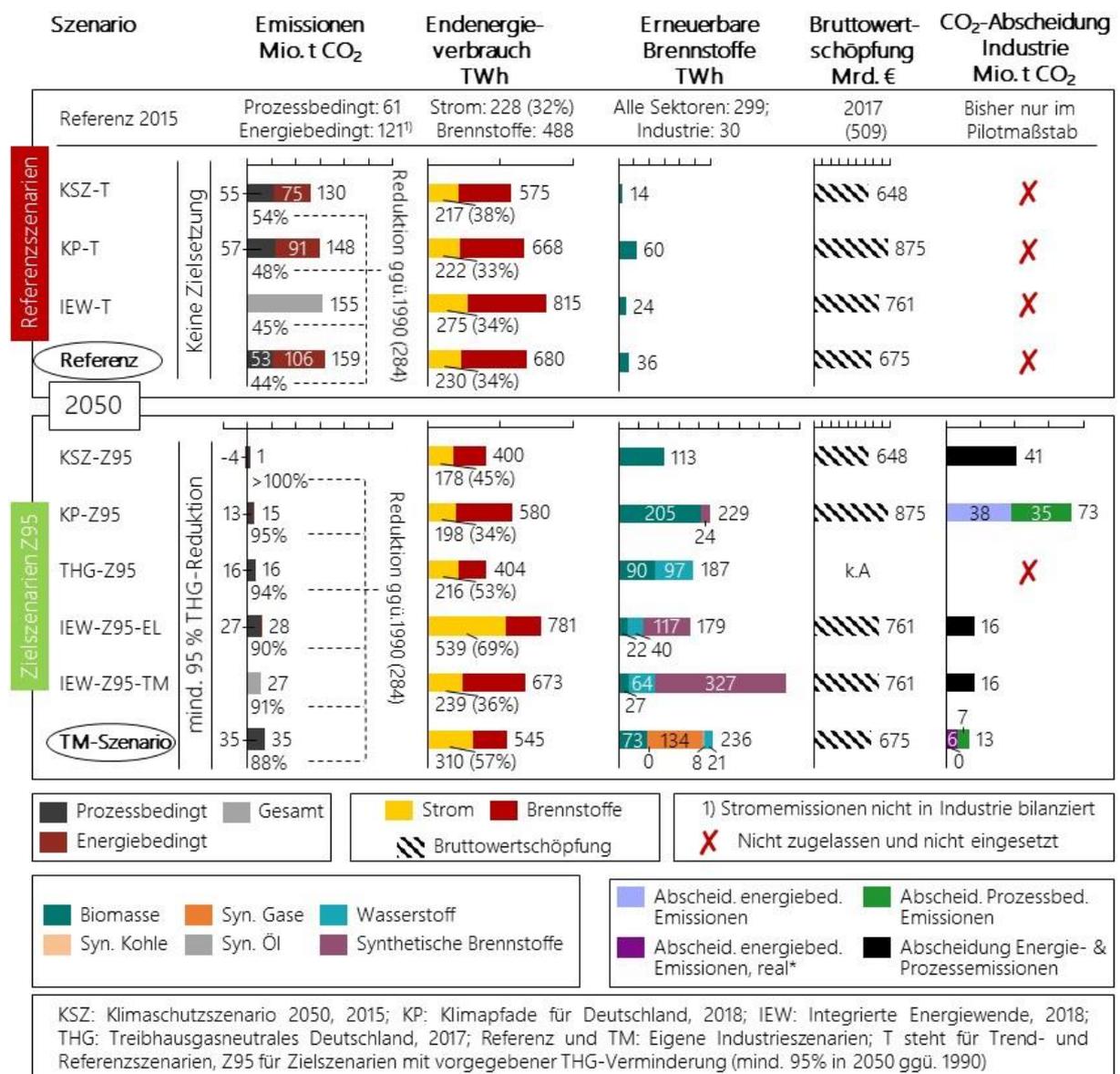


Abbildung 5-14: Szenarienvergleich auf der Basis ausgewählter technoökonomischer Kennwerte

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“ [66] erreicht einen noch höheren Elektrifizierungsgrad (69 %). Die Produktion strombasierter Brennstoffe bilanziert [66] 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 CO₂-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 CO₂-Verminderung. Die hohe Biomassenutzung und die mit Abstand höchste CO₂-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 Technologiemicromodul 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 Technologiemicromszenarien 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 [27] 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 [27] berücksichtigt das Technologiemicromodul 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 [27] 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 Brennstoffwechsoptionen 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 Technologiemicromszenario 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 CO₂-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 Technologiemitmixmodul vollständig. In Abhängigkeit des Emissionsfaktors verbleiben Stromemissionen in Höhe von 7,5 Mio. tCO₂ und nur schwer zu vermindern prozessbedingte Emissionen in Höhe von 35 Mio. tCO₂. Verfahrensrouutenwechsel und die Bestandsveränderung durch einen sinkenden Stromemissionsfaktor bedingen die größte CO₂-Verminderung. Im Technologiemitmixszenario ergibt sich zwischen 2020 und 2050 eine kumulierte CO₂-Verminderung von 130 Mio. tCO₂, wovon 83 Mio. tCO₂ Stromemissionen sind. Ebenfalls erreicht der optimierte Brennstoffwechsel eine erhebliche CO₂-Verminderung in Abhängigkeit der CO₂-Zielsetzung im Zeitverlauf (kumuliert zwischen 2020 und 2050: 42 Mio. tCO₂). Die industriellen kumulierten Emissionen sind selbst im ambitionierten Technologiemitmixszenario so hoch, dass sie das in [1] ermittelte, verbleibende deutsche CO₂-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 [19] aus. Im Vergleich verpassen die errechneten Industriepfade knapp die noch höhere CO₂-Verminderung weiterer industrieller energie- und klimapolitischer Szenarien [66], [19], [20], [23]. Alle Vergleichsszenarien erfordern, wie das Technologiemitmixszenario, einen hohen Einsatz erneuerbarer Brennstoffe und wählen meist zwischen Biomasse ([19], [23]) und synthetischen Brennstoffen (TM-Szenario, [66]).

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 Transformationspfades 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 CO₂-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 CO₂-Verminderungsoptionen ein Kraftakt erforderlich ist, um industrielle CO₂-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 03SFK300-2 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Publikation liegt vollständig bei den Autoren.



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] de Coninck, Heleen et al.: Strengthening and Implementing the Global Response - In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Genf: IPCC, 2018.
- [8] Hübner, Tobias et al.: Application-side merit-order-curves for synthetic fuels in the German energy system. In: 13th International Conference on Energy Economics and Technology Mai/2019. Dresden: TU Dresden, 2019.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Kube, Mathias et al.: Marktverfügbare Innovationen mit hoher Relevanz für die Energieeffizienz in der Industrie. Berlin: Ecofys, 2017.
- [12] Primes model version 2018 - Detailed model description. Athens: E3M-Lab, National Technical University of Athens, 2019.

- [13] 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.
- [14] Lorenczik, Stefan et al.: Kosteneffiziente Umsetzung der Sektorenkopplung. Köln: ewi Energy Research & Scenarios GmbH, 2018.
- [15] 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.
- [16] Hübner, Tobias et al.: Industrie 2050: Energiewende in der Industrie. In: et-Energiewirtschaftliche Tagesfragen (Ausgabe 8, 2019). Essen: etv Energieverlag GmbH, 2019.
- [17] Joas, Fabian et al.: Klimaneutrale Industrie - Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, Wuppertal: Agora Energiewende, 2019.
- [18] Purr, Katja et al.: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: RESCUE-Studie. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019.
- [19] Gebert, Philipp et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
- [20] Günther, Jens et al.: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Berlin: Umweltbundesamt, 2017.
- [21] Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
- [22] Capros, P. et al.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. Brüssel: Europäische Kommission, 2016.
- [23] Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015
- [24] 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.
- [25] 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
- [26] 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.
- [27] Hübner, Tobias: Small-Scale Modelling of Individual Greenhouse Gas Abatement Measures in Industry. Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2020.
- [28] 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.
- [29] BMWi: Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin: BMWi, 2018.

- [30] 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
- [31] Projektionsbericht 2019 für Deutschland. Berlin: Bundesregierung, 2019.
- [32] Hübner, Tobias et al.: Modellgestützte Analyse synthetischer Brennstoffe in der Industrie bei ambitioniertem Klimaschutz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.
- [33] Kahaner, David et al.: Numerical Methods and Software. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology (NIST), 1989.
- [34] Fritsch, F.N. et al.: Monotone Piecewise cubic interpolation. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1980.
- [35] Fraunhofer ISI: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017 - Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2018.
- [36] Fahrmeir, Ludwig; Heumann, Christian; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard: Statistik - Der Weg zur Datenanalyse. Heidelberg: Springer Spektrum, 2016
- [37] 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.
- [38] Guminski, Andrej et al.: Model based evaluation of industrial greenhouse gas abatement measures. Wien, Österreich: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2019.
- [39] Hedtstück, Ulrich: Simulation diskreter Prozesse - Methoden und Anwendungen. Konstanz: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung Konstanz, Fachbereich Informatik, 2013.
- [40] Report - Wissenschaftsprojekte des FEhS-Instituts 1/2019. Duisburg: Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS), 2019.
- [41] Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019.
- [42] Wirtschaftsvereinigung Stahl (WVS): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2017. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl (WVS), 2017.
- [43] Kraftwerksnebenprodukte - Steinkohleflugaschen und REA-Gips. In: <https://www.umweltbundesamt.de/kraftwerksnebenprodukte-steinkohleflugaschen-rea#hinweise-zum-recycling>. (Abruf am 2020-05-02); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019.
- [44] Die Bundesregierung: Kabinett beschließt Kohleausstiegsgesetz. In: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200129-kabinett-beschliesst-kohleausstiegsgesetz.html>. (Abruf am 2020-05-05); Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.
- [45] Abschlussbericht. Berlin: Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“, 2019.
- [46] Kohleausstieg - Kommission "Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung". In: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung/>. (Abruf am 2019-08-15); Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019.

- [47] Beer, Michael et al.: CO₂-Verminderung in Deutschland - Teil I - Methodik und Zusammenfassung. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2009.
- [48] 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.
- [49] Hübner, Tobias et al.: Energiewende in der Industrie - Branchensteckbrief der Zement- und Kalkindustrie. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.
- [50] Ruppert, Johannes et al.: Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie - Entwurf Endbericht. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2018.
- [51] Hoenig V. et al.: Energy efficiency in cement production in: Cement International, 3/2013, Vol. 11. Erkrath: Verlag Bau+Technik GmbH, 2013
- [52] Ganz, Kirstin et al.: Studie zur Regionalisierung von PtG-Leistungen für den Szenariorahmen NEP Gas 2020-2030. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.
- [53] Chan, Yeen et al.: Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 1: Technology Analysis. Karlsruhe, London: Fraunhofer ISI, 2019.
- [54] Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris, Geneva: International Energy Agency (IEA), 2018.
- [55] Building carbon neutrality in Europe - Engaging for concrete solutions. Brussels: Cembureau, 2018.
- [56] The role of CEMENT in the 2050 LOW CARBON ECONOMY. Brüssel, Belgien: European Cement Association, 2013
- [57] Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead, Revision 2017. Düsseldorf: European Cement Research Academy GmbH (ECRA), 2017
- [58] Fleiter, Tobias; Schломann, 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
- [59] Industrie. In: <https://www.carbon-terra.eu/de/pflanzenkohle/anwendungen/industrie>. (Abruf am 2019-08-08); (Archived by archive.org at <https://web.archive.org/web/20180513222327/https://www.carbon-terra.eu/de/pflanzenkohle/anwendungen/industrie>); Augsburg: Carbon Terra GmbH, 2019.
- [60] Professionell zur industriellen Pflanzenkohle. In: <https://www.novocarbo.com/produkte-leistungen/novospecialties/>. (Abruf am 2019-08-08); (Archived by archive.org at <https://web.archive.org/web/20190809102017/https://www.novocarbo.com/produkte-leistungen/novospecialties/>); Dörth: Novocarbo GMBH, 2019.
- [61] Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2015
- [62] Hensmann, Michael; Haardt, Sebastian; Ebert, Dominik: Emissionsfaktoren zur Eisen- und Stahlindustrie für die Emissionsberichterstattung - Umweltforschungsplan des Umweltministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Düsseldorf: VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, 2012

- [63] 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.
- [64] Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. München, Frankfurt: Dechema, 2019.
- [65] Fattler, Steffen et al.: Dynamis Hauptbericht - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2019.
- [66] Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.
- [67] 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).
- [68] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2018.
- [69] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017
- [70] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016
- [71] Klimaschutzszenario 2050 - 1. Modellierungsrunde. Freiburg, Berlin: Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2014
- [72] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018.
- [73] 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.
- [74] Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungsplanung 2019-2030. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2018.
- [75] Preiszusammensetzungen - Superbenzin, Dieseldieselkraftstoff, leichtes Heizöl in: <https://www.mwv.de/statistiken/preiszusammensetzung/>. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWW), 2017
- [76] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
- [77] Kreidelmeyer, Sven et al.: Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger - Endbericht zum Projekt "Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe". Basel: Prognos AG, 2020.
- [78] Deutsch, Matthias et al.: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, 2018.
- [79] Bründerlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin: dena, 2018.

- [80] Machhammer, Otto et al.: Financial and Ecological Evaluation of Hydrogen Processes on Large Scale. In: Chemical Engineering & Technology 39 (6). Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- [81] Heizwerte - bauforumstahl e. V.: <https://www.bauforumstahl.de/brandbelastungen-und-heizwerte>; bauforumstahl e. V.: bauforumstahl e. V., 2002.
- [82] 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.
- [83] VDP: Papier Kompass 2015/2016. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2017.
- [84] Chemiewirtschaft in Zahlen 2016. Frankfurt am Main: Verband der Chemischen Industrie e. V., 2016
- [85] Weigel, Max: Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren - Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel. Wuppertal: Bergischen Universität Wuppertal, 2014.
- [86] Laufendes, Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018 - 2021). München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- [87] Auszug Ofenumfrage Kalbverband; Köln: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V. (BVK), 2018.
- [88] Metallstatistik 2016. Berlin: Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM), 2017
- [89] Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2016. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2016
- [90] Environmental Profile Report - Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Brussels: European Aluminium (eea), 2018.
- [91] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zementindustrie in Deutschland 2016 - Zahlen und Daten. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016
- [92] 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.
- [93] Leisin, Matthias: Branchensteckbrief der Glasindustrie. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2019.
- [94] 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
- [95] 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
- [96] Kalk - Statistisches Jahreshaft 2018. Köln: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V. (BVK), 2018.
- [97] Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015 - Environmental Data of the German Cement Industry. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016
- [98] Umweltschutz im Aurubis-Konzern und aktualisierte Umwelterklärung 2019 der Aurubis AG der Standorte Hamburg und Lünen. Hamburg: Aurubis AG, 2019.

- [99] Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2011 und 2012. Essen: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), 2013
- [100] Papier 2019 - Ein Leistungsbericht. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), 2019.
- [101] Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2017: <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html>; Berlin: AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2019 (überarbeitet: 2019).
- [102] 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.
- [103] 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
- [104] 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
- [105] Zahlen und Daten 2018 - Zementindustrie in Deutschland; Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), 2018.

8 Formelzeichen und Einheiten

Tabelle 8-1: Formelzeichen mit Beschreibung (1)

Formelzeichen*	Beschreibung
Δ	Delta
A	Allgemeine Matrix bestehend aus Matrixelementen a
a	Allgemeines Matrixelement
$aef1$	Änderungsfaktor 1 bei der Maßnahmenumsetzung. Veränderliche Größen berücksichtigen
$aef2$	Änderungsfaktor 2 bei der Maßnahmenumsetzung. Veränderliche Größen berücksichtigen
af	Anuitätenfaktor
An	Annuität
AWG	Anwendungsgrad
b_{ab}	Abfließende Brennstoffe
bt	Bestückung einer Maßnahme oder Technologie bezogen auf den zugrundeliegenden Umsetzungsparameter
BWS	Bruttowertschöpfung
b_{zu}	Zufließende Brennstoffe
c	Allgemeiner Zähl/Laufparameter
D	Projektions/Konstruktions/Dimensionsierungsparameter einer Matrix
E	Energie
e	Spezifischer Energieverbrauch
ef	Emissionsfaktor
ei	Energieintensität
em	Emissionen
hl	Hochlauf von Technologien und Maßnahmen
K	Absolute Kosten
k	Spezifische Kosten
$korr$	Korrekturfaktor/wert
kzf	Klinkerzementfaktor
ld	Lebensdauer einer Technologie/Prozess/Massnahme
m	Masse/Produktionsmenge
ME	Allgemeiner Maßnahmeneffekt
n	Anzahl Elemente
nt	Nicht-Bestückung einer Maßnahme oder Technologie bezogen auf den zugrundeliegenden Umsetzungsparameter
P	Leistung
PE	Allgemeiner Parameter
pem	Prozessemissionen
pw	Prozentuale Verteilung
r	Rate
re	Restriktion

* enthält auch Indizes, falls diese sowohl als Formelzeichen als auch als Index dienen, Groß- und Kleinschreibung relevant

Tabelle 8-2: Formelzeichen mit Beschreibung (2)

Formelzeichen*	Beschreibung
t	Aktuelles Simulationsjahr
t_0	Verfügbares/Ausgewähltes historisches Basisjahr
t_b	Vergleich ggü. Basisjahre (nicht historisches Basisjahr des Modells!)
t_h	Historische Basisjahre
t_{me}	Jahr des Maßnahmenendes
um	Umgekehrter Massenvektor
UMG	Umsetzungsgrad
UP	Allgemeiner Umsetzungsparameter
VE	Vorübergehendes/Zwischenergebnis Energie ohne weitere Bedeutung
ve	Vorübergehendes/Zwischenergebnis Energie spezifisch ohne weitere Bedeutung
VH	Verhältnis
VK	Verminderungskosten
Vls	Volllaststunden
vm	Vorübergehendes/Zwischenergebnis Masse ohne weitere Bedeutung
w	Allgemeiner Wert
x	Aktueller Parameter/Verschiedene Parameter
ze	Zusätzliche Effizienz
z_t	THG-Verminderungszielsetzung

* enthält auch Indizes, falls diese sowohl als Formelzeichen als auch als Index dienen, Groß- und Kleinschreibung relevant

Tabelle 8-3: Indizes der Formelzeichen mit Beschreibung (1)

Indizes der Formelzeichen*	Beschreibung
<i>A</i>	Anlagenalter
<i>ab</i>	Abgeschiedene CO ₂ -Emissionen
<i>ae</i>	Änderung
<i>aw</i>	Anwendungen/Anzahl Anwendungen
<i>b</i>	Beginn, verwendet für den Jahresbeginn
<i>br</i>	Brennertechnologie
<i>bs</i>	Brennstoffe
<i>CO₂</i>	Kennzeichnung des Parameters als CO ₂
<i>d</i>	Allgemeiner Laufindex
<i>di</i>	Diffusion
<i>e</i>	Laufindex
<i>e</i>	Ende, verwendet für das Jahresende
<i>ed</i>	Edukte
<i>ee</i>	Anzahl Erneuerbare Energien
<i>EmTQ</i>	Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Querschnitt
<i>en</i>	energiebedingt
<i>ener</i>	Energiebedingt mit realen bei der Verbrennung entstehenden energiebedingten Emissionen (die Verbrennung von Biomasse wird hier nicht mit Null bewertet)
<i>EoT</i>	Energieträgerwechsel ohne Technologiewechsel
<i>et</i>	Energieträger/Anzahl Energieträger
<i>exp</i>	Export
<i>g</i>	gesamt
<i>h</i>	Hypothetisch
<i>hp</i>	Homogenes Produkt
<i>ht</i>	Hüttensand
<i>hz</i>	horizontal
<i>i</i>	Laufindex
<i>iv</i>	Investitionen
<i>j</i>	Laufindex Anwendungen
<i>kl</i>	Klinker
<i>lh</i>	Letztes historisches Basisjahr
<i>m</i>	Maßnahme

*Groß- und Kleinschreibung relevant

Tabelle 8-4: Indizes der Formelzeichen mit Beschreibung (2)

Indizes der Formelzeichen*	Beschreibung
<i>ma</i>	Materialausschuss
<i>max</i>	Maximum des im zugehörigen Formelzeichen verwendeten Parameters, Skalar/Vektors/Matrix
<i>mb</i>	Massenbilanz
<i>min</i>	Minimum des im zugehörigen Formelzeichen verwendeten Parameters, Skalar/Vektors/Matrix
<i>n</i>	Allgemeiner Laufindex
<i>na</i>	Anzahl abfließende Brennstoffe
<i>neg</i>	negativ
<i>nopt</i>	Nach Optimierung
<i>nz</i>	Anzahl zufließende Brennstoffe
<i>o</i>	Operative Kosten
<i>oA</i>	Ohne Abscheidung
<i>opt</i>	optimiert
<i>P</i>	Bezogen auf den allgemeinen Parameter PE
<i>p</i>	Prozesse/Prozessebene
<i>p</i>	Allgemeiner Laufindex
<i>p|q</i>	Prozesse oder Querschnitt
<i>pd</i>	Produkte
<i>pos</i>	positiv
<i>p_w</i>	Prozesse auf Wirtschaftszweigebene
<i>q</i>	Querschnitt/Querschnittsebene
<i>q_w</i>	Querschnitt/ Querschnitt auf Wirtschaftszweigebene, verdeutlicht Ebene von q
<i>r</i>	Rest
<i>rb</i>	Restriktiver Brennstoff, Brennstoff der begrenzend wirkt
<i>re</i>	Restriktion
<i>rf</i>	Referenz
<i>ri</i>	Reinvestition
<i>RM</i>	Referenzmodul
<i>s</i>	Start, verwendet für das Startjahr der ersten Maßnahmenumsetzung
<i>sp</i>	Spezifisch
<i>ss</i>	Sekundärstahl
<i>st</i>	Strom
<i>st|bs</i>	Gleichung gilt für Strom oder Brennstoffe

*Groß- und Kleinschreibung relevant

Tabelle 8-5: Indizes der Formelzeichen mit Beschreibung (3)

Indizes der Formelzeichen*	Beschreibung
<i>t</i>	Aktuelles Simulationsjahr
<i>tc</i>	Technologie
<i>TM</i>	Technologiemixmodul
<i>UP</i>	Umsetzung Parameter
<i>v</i>	Vektor
<i>vbk</i>	Verfügbarkeit
<i>vg</i>	Verfügbarkeit
<i>vopt</i>	Vor Optimierung
<i>vr</i>	Verfahrensroute
<i>vra</i>	Andere Verfahrensrouten
<i>w</i>	Wirtschaftszweige/Wirtschaftszweigebene/Anzahl Wirtschaftszweige
<i>z</i>	Zielsetzung
<i>zm</i>	Zement

*Groß- und Kleinschreibung relevant

Tabelle 8-6: Einheitenzeichen mit Beschreibung

Einheitenzeichen	Beschreibung
t	Tonnen
MWh	Megawattstunde
tCO ₂	Tonnen CO ₂
€	Euro
Stk	Stück
div	divers
dl	dimensionslos
%	Prozent
a	Jahr
t _p	Tonne Produkt
MW	Megawatt
h	Stunden
Gt	Gigatonnen (meist CO ₂)

9 Anhang

Tabelle 9-1: Rahmendaten der Szenarien und zugehörige Literatur

Eingangsdaten	Literatur	Eingangsdaten	Literatur
ISI Anwendungsbilanz 2015 - 2019	[28], [35]	CO ₂ -Kosten	Realer Wert für Basisjahr: [67] Bis: 2035: [31] Ab 2035: [21]
Temperaturverteilung Prozesswärme nach Wirtschaftszweigen	[30]	Normierte Lastgänge Wirtschaftszweige	Auf der Basis eigener Industriedaten und synthetisiert nach [38] [65] mit Urquelle /UCL-01 11/, Zinssatz reflektiert Wert, zu dem sich Staaten Geld für Investitionen leihen können
Bruttowertschöpfung	Bis 2035: [31] Änderung ab 2035: [21]	Makroökonomischer Zins	
Änderung der Strom- und Brennstoffintensität	Eigene Berechnung auf Basis von Referenzszenario in [21], wirtschaftliche Diffusion von THG-Verminderungsmaßnahmen [10]	Maximalgrenze für Recycling in den metallurgischen Prozessen Sekundärstahl, Sekundäraluminium, Sekundärkupfer	[21]
Produktionsmengen	Bis 2035: [31] Änderung ab 2035: [21]	Betriebe je Wirtschaftszweig	/Destatis-14 18/
Prozessemissionen je Wirtschaftszweig	Methodik beschrieben in [32], Urquellen: [68], [69], [70], [19], [71], [72]	THG-Verminderungsmaßnahmen, Technologie- und Anlagendaten	Hauptsächlich [65], Weitere in [27], [73], [21], [32], [37], und auf der Basis von Experteneinschätzungen

Tabelle 9-2: Verteilungsschlüssel des Sekundärenergieträgers Fernwärme auf die Primärenergieträger im Basisjahr, berechnet nach [24]

Gase	Kohlen	Erneuerbare Brennstoffe	Sonstige Brennstoffe
0,3	0,6	0,08	0,02

Tabelle 9-3: Grundlegende Einheiten je Parameter in Smlnd

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 9-4: Verwendete volkswirtschaftliche Energieträgerkosten in den Szenarien

Energieträger	⊗ Energieträgerkosten [€/MWh]		Literatur und Herkunft
	2020	2050	
Kohlen	8	9,6	[74] Szenario B, [24], Durchschnitt aus Steinkohle und Braunkohle
Fossile Gase	22,7	28,1	[74] Szenario B, [24]
Mineralöl	29,8	51,8	FfE-Schätzung auf Basis von [74], [75], [76]
Biomasse	27,6	26,3	FfE-Berechnung nach [65]
Sonstige Brennstoffe	20	20	Schätzung auf der Basis von Industriedaten, verwendet in [65]
Strom	43,3	80,4	Simulationsergebnis FfE-ISAaR, FfE Fuel Scenario aus [65]
Wasserstoff	76,4	157	Wasserstoffproduktion in Deutschland über die drei inländischen Szenarien mit EE-erzeugtem Wasserstoff in [77] und Berücksichtigung der Dampfreformierung (inkl. Transport). Anteil Dampfreformierung aus Fuel Szenario [65], sinkt bis 2050 auf 0, dementsprechend steigt der Wasserstoffpreis da Wasserstoff in 2050 in [65] vollständig aus Wasserelektrolyse erzeugt wird
Synthetische gasförmige Kohlenwasserstoffe (synth. Gase)	245	117	Mittelwert über Importkosten und heimische Produktion [78] mit Mittelwert aus Importanteilen von [24], [23], [79], [19] je Stützjahr zusammengefasst in [9]
Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (synth. Öl)	255	119	Mittelwert über Importkosten und heimische Produktion [78] mit Mittelwert aus Importanteilen von [24], [23], [79], [19] je Stützjahr zusammengefasst in [9]
Synthetische feste Kohlenwasserstoffe (synth. Kohlen)	350	130	Berechnung aus synthetischen Methankosten und Abscheidung des Kohlenstoffestoffs über Methanpyrolyse [64] und /AGORA 01 18/, [80], [63], [81] und angenommener konstanter Wasserstoffgutschrift von 150 € pro MWh Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen

Tabelle 9-5: *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 [70], Gewichteter Mittelwert über Steinkohle und Braunkohle
Fossile Gase	0,198	0,198	[70]
Fossiles Öl	0,277	0,277	FfE-Berechnung nach [70]
Biomasse	0*	0*	Erneuerbarer Kohlenstoffkreislauf
Sonstige Brennstoffe	0,293	0,293	FfE-Berechnung nach [70],
Strom	0,232	0,023	Simulationsergebnis FfE-ISAaR, Szenario Fuel aus [65], Methoden nach [82]
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 9-6: *Verwendete energiebedingte Emissionsfaktoren erneuerbarer Brennstoffe zur Erfassung der realen brennstoffbedingten CO₂-Abscheidung*

Energieträger	☐ Emissionsfaktoren Energie [tCO ₂ /MWh]		Literatur und Herkunft
	2020	2050	
Biomasse	0,320	0,371	FfE-Berechnung nach [70]
Synthetische gasförmige Kohlenwasserstoffe (synth. Gase)	0,198	0,198	vgl. „Fossile Gase“ in Tabelle 9-5
Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (synth. Öl)	0,277	0,277	vgl. „Mineralöl“ in Tabelle 9-5
Synthetische feste Kohlenwasserstoffe (synth. Kohlen)	0,347	0,340	vgl. „Kohlen“ in Tabelle 9-5

Tabelle 9-7: *Zeitunabhängige prozessbedingte Emissionsfaktoren in den Szenarien*

Produktionsprozess	☒ Prozessemissionsfaktoren [tCO ₂ /tProdukt]	Literatur und Herkunft
Altpapier	0	[69] und [83]
Ammoniak	0,603	[58]
Chlor	0,001	[69] und [84]
Elektroflachglas	0,178	Siehe Flachglas
Elektrohohlglas	0,043	Siehe Hohlglas
Ethylen	0,001	[69] und [84]
Flachglas	0,178	[58]
H ₂ -Stahl	0,13	[85]
Hohlglas	0,043	[58]
Innovative Bindemittel	0,434	Projekt Energiewende in der Industrie [86]
Kalk	0,73	[87]
Klinker	0,394	[58]
Methanol	0,789	[69]
Milch	0	[69]
Papierherstellung	0,002	[69] und [83]
Polyethylen	0	[69] und [84]
Primäraluminium	1,57	[69] und [88]
Primärkupfer	0,109	Expertenaussage
Primärstahl	0,5587	[69] und [89]
Sekundäraluminium	0,0033	[90]
Sekundärkupfer	0,353	Expertenaussage
Sekundärstahl	0,0074	[69]
Zellstoff	0,002	[69] und [83]
Zement	0	[91]
Ziegel	0,117	[58]

Tabelle 9-8: 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	[58]
Ammoniak	0,206	3,028	[92]
Chlor	2,846	0,338	Gewichtet gemittelter Wert des spezifischen Strom- und Brennstoffverbrauchs über Chlorherstellungsverfahren in [92] mit Produktionsmenge aus [64] Brennstoffverbrauch entsteht bei Dampfbereitstellung zur Produktion von Natronlauge, [73]
Elektroflachglas	2,643	0	[93], [58], [94] Berechnet aus Durchschnitt Elektrogas im Spezialglas und Haushaltsglas für Elektroflachglas. Verhältnis Flachglas zu Hohlglas auf Durchschnittswert angerechnet
Elektrohohlglas	1,057	0	[58], [94], Berechnet aus Durchschnitt Elektrogas im Spezialglas und Haushaltsglas für Elektroflachglas. Verhältnis Flachglas zu Hohlglas auf Durchschnittswert angerechnet
Ethylen	0	1,447	[64], Anteil Ethylen an High Value Chemicals (HVC) von 32 % im Steamcracker bei Brennstoffverbrauch von 4.583 MWh/tHVC
Flachglas	0,917	2,583	[93], [58]
H ₂ -Stahl	0,703	3,783	[95]
Hohlglas	0,389	1,611	[58]
Innovative Bindemittel	0,112	0,447	[73]
Kalk	0,106	1,141	[96]
Klinker	0,057	0,797	[97], Stromanteil der Klinkerherstellung an Zementproduktion (51%) nach [57]
Methanol	0,167	3,861	[92] ohne Dampfabgabe an andere Prozesse in Höhe von 2GJ/t
Milch	0,139	0,444	[58]
Papierherstellung	0,528	1,528	[58]
Polyethylen	0,567	0,178	[58]
Primäraluminium	15,115	3,606	[90], Bayer-Prozess, Aluminiumelektrolyse und initiales Vergießen
Primärkupfer	1,23	1,214	[98]
Primärstahl	0,079	4,502	[58], Energieaufwand für die Koksherstellung, Dampferzeugung, und Sauerstofferzeugung nicht berücksichtigt, Energieaufwand für Sintererzeugung inkludiert.
Sekundäraluminium	0,15	0,892	[90]
Sekundärkupfer	0,856	1,877	[98]
Sekundärstahl	0,533	0,131	[58]
Zellstoff	0,667	3,722	[58]
Zement	0,054	0	[97], Stromanteil der Klinkerherstellung an Zementproduktion (49%) nach [57]
Ziegel	0,153	0,439	[99]

Tabelle 9-9: Brennstoffanteile je Prozess in Prozent (%) mit zugehöriger Quellenangabe für das Basisjahr 2015

Produktionsprozess	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	[100], Gleichverteilung über Papierprozesse
Ammoniak	33	67	0	0	0	0	0	0	0	33	[58], 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, [101], Dampf für Natronlauge
Elektroflachglas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Kein Brennstoffeinsatz
Elektrohohlglas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Kein Brennstoffeinsatz
Ethylen	100	0	0	0	0	0	0	0	0	100	[64], 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, [102]
H ₂ -Stahl	0	41,26	0	0	7,48	0	0	51,26	0	0	[95], 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	[96]
Klinker	1,1	0,7	0	33,6	21,89	42,7	0	0	0	1,1	[97], Annahme: kein Brennstoffverbrauch in der Zementmahlung, Biomasseanteil an alternativen Brennstoffen nach Expertenaussage
Methanol	60	40	0	0	0	0	0	0	0	60	[64]
Milch	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	[103]
Papierherstellung	0,48	49,51	13,99	8,33	23,13	4,55	0	0	0	0,48	[100], 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 [101]
Primär-aluminium	5,72	94	0,25	0	0	0,03	0	0	0	5,72	[90]
Primärkupfer	2,61	93,83	0	3,56	0	0	0	0	0	2,61	[98]
Primärstahl	0	7,57	0	92,43	0	0	0	0	0	0	[95] für Hochofen, [104] für Sauerstoffaufblaskonverter (BOF)
Sekundär-aluminium	3,7	96,3	0	0	0	0	0	0	0	3,7	[90]
Sekundär-kupfer	63,78	29,42	0	6,81	0	0	0	0	0	63,78	[98]
Sekundärstahl	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	[95]
Zellstoff	0,48	49,51	13,99	8,33	23,13	4,55	0	0	0	0,48	[100], Gleichverteilung über Papierprozesse
Zement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	[97], Annahme: kein Brennstoffverbrauch in der Zementmahlung
Ziegel	2,81	96,63	0	0,56	0	0	0	0	0	2,81	[99]

*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 [32].

Tabelle 9-10: Produktionsprozesse und homogene Produktionsgüter in Smlnd

Produktionsprozess	Homogenes Produktionsgut im Modell
Altpapier	Papier
Ammoniak	Ammoniak
Chlor	Chlor
Elektroflachglas	Flachglas
Elektrohohlgas	Hohlgas
Ethylen	Ethylen
Flachglas	Flachglas
H ₂ -Stahl	Stahl
Hohlgas	Hohlgas
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 9-11: Massenbilanz mit Eingangs- und Ausgangsmaterialien der Prozesse

Prozess	Literatur
H ₂ -Stahl	[40], [31], [21]
Primärstahl	[40], [31], [21]
Sekundärstahl	[40], [31], [21]
Zement	[105]

Tabelle 9-12: Produktionsmengen von Industrieprozessen im Modell nach [31] und [21] in kt

Industrielle Prozesse	Referenzszenario				Technologiemixszenario			
	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
Elektrohohglas	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

Tabelle 9-13: Parameter der Maßnahmenmatrix, erweitert auf der Basis von [27]

Index	Parameter
(1)	Identifikationsnummer Maßnahme/Technologie
(2)	Änderung des Stromverbrauchs durch die Maßnahme/Technologie
(3)	Änderung des Brennstoffverbrauchs durch die Maßnahme/Technologie
(4)	Anwendungsgrad, die im Basisjahr bereits umgesetzt ist
(5)	Lebensdauer der Technologie
(6)	Investitionen
(7)	Fixe Betriebskosten
(8)	Maßnahmekategorie
(9)	Identifikationsnummer Substitutionsprozess Verfahrensroutenwechsel
(10)	Abscheiderate CO ₂ -Abscheidung
(11)	Identifikationsnummer Prozess oder Querschnittstechnologie
(12)	Startjahr Maßnahmendiffusion
(13)	Endjahr Maßnahmendiffusion
(14)	Wirtschaftszweig
(15)	Prozess/Anwendung
(16)	Substitutionsprozess Verfahrensroutenwechsel
(17)	Identifikationsnummer Wirtschaftszweig
(18)	Berechnete Austauschrate über natürliche Lebensdauer
(19)	Veränderte Diffusionsrate der Maßnahme/Technologie
(20)	Jährlich berechnete statische Verminderungskosten
(21)	Annuitätische Investitionen der Maßnahmen/Technologie
(22)	Nicht-Annuitätische fixe Betriebskosten der Maßnahmen/Technologie
(23)	Annuitätische Gesamtkosten
(24)	Jährliche Maßnahmen/Technologiediffusion
(25)	Kumulierte Maßnahmen/Technologiediffusion
(26)	Optimierte Energieträgerverteilung
(27)	Optimierte Energieträgerverteilung mit Berücksichtigung des Maßnahmen/Technologiehochlaufs
(28)	Maßnahmenpotenzial
(29)	Produktionsgut des Produktionsprozesses
(30)	Identifikationsnummer Anwendungsbezug der Maßnahme/Technologie auf Prozessebene
(31)	Identifikationsnummer Energieträgerbezug der Maßnahme/Technologie

Tabelle 9-14: Parameter der Technologiematrix

Index	Parameter
(1)	Identifikationsnummer Technologie
(2)	Anwendungsgrad, die im Basisjahr bereits umgesetzt ist
(3)	Lebensdauer der Technologie
(4)	Maßnahmenkategorie
(5)	Identifikationsnummer Prozess/Querschnittstechnologie
(6)	Startjahr Technologiediffusion
(7)	Wirtschaftszweig
(8)	Prozess

Tabelle 9-15: Restriktionsmatrix Technologien

Index	Parameter	Beispiel
(1)	Identifikationsnummer Maßnahme/Technologie	4116 (Verfahrensroutenwechsel Hochofenstahl auf Sekundärstahl)
(2)	Wert des Parameters	0.29 (29 % Anteil von Sekundärstahl am Produktionsgut Stahl in Deutschland)
(3)	Bezugsparameter 1	Produktionsmenge
(4)	Bezugsparameter 2	Produktionsgut (Stahl)
(5)	Bezugsparameter 3	Produktionsprozess (Sekundärstahl)
(6)	Bezugsparameter 4	...
(7)	Identifikationsnummer Prozess	3075 (Sekundärstahl)

Tabelle 9-16: Restriktionsmatrix Energieträger/Emissionen

Index	Parameter	Beispiel
(1)	Identifikationsnummer Maßnahme/Technologie	-1 (Nicht Technologiebezogen)
(2)	Identifikationsnummer Restriktion	3 (Emissionen Prozess)
(3)	Wert des Parameters	0.11 (11% Emissionseinsparung ggü. Bezugsparameter 3)
(4)	Bezugsparameter 1	Ernährung und Tabak (Wirtschaftszweig)
(5)	Bezugsparameter 2	Milchproduktion (Prozess)
(6)	Bezugsparameter 3	Jahr 2015 (Emissionswert in 2015)

Tabelle 9-17: Beispiel der Edukte in einer Massenbilanz auf Prozessebene, Zementherstellung

Jahr	Klinker	Hütten-sand	Flug-asche	Öl-schiefer	Trass	Sonstige	Gips natürlich	Anhydrit	Gips aus Rauchgas	Ausschuss
2015
2016
...

Tabelle 9-18: Brennermatrix mit Attributen der Brennertechnologie in Smlnd

Identifikationsnummer Brennertechnologie	Brennermatrix	Anteil am Produktionsvolumen	Identifikationsnummer Technologie
z.B. 1: Standardversion	Vgl. Tabelle 3-3	z.B. 0.5: 20 % Anteil der Brennertechnologie am Produktionsoutput	z.B. 3151: Klinkerproduktion
2	...	...	...
3	...	...	...

Tabelle 9-19: Konstruierte Altersstruktur der Technologie zur Hochkonsistenzstoffauflösung in der Altpapierproduktion mit einem Umsetzungsgrad von 30 % und einer Lebensdauer von 10 Jahren (A: 1-10) im Basisjahr 2015

Jahr	A: 1	A: 2	A: 3	A: 4	A: 5	A: 6	A: 7	A: 8	A: 9	A: 10
2015	524280*	524280	524280	524280	524280	524280	524280	524280	524280	524280
2016	543300**	524280	524280	524280	524280	524280	524280	524280	524280	524280
2017	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

* Produktionsmenge in Tonnen produziert mit der Technologie mit Anlagenalter von einem Jahr in 2015

** Produktionsmenge in Tonnen produziert mit der Technologie mit Anlagenalter von einem Jahr in 2016 verändert um Produktionsmengenänderung in der Altpapierherstellung multipliziert mit dem Umsetzungsgrad von 2015 auf 2016 (+ 19020 t)

Tabelle 9-20: CO₂-Abscheidungsmatrix mit allen relevanten Parametern

Index	Parameter
(1)	Identifikationsnummer Prozess
(2)	Produktionsmenge mit CO ₂ -Abscheidung (tProduktion)
(3)	Abscheiderate (dl)
(4)	Änderung Strom (MWh/t)
(5)	Änderung Brennstoff (MWh/t)
(6)	Emissionsfaktor energiebedingte Emissionen (tCO ₂ /MWh)
(7)	Emissionsfaktor prozessbedingte Emissionen (tCO ₂ /tProduktion)
(8)	Kumulierte abgeschiedene energiebedingte CO ₂ -Emissionen (tCO ₂)
(9)	Abgeschiedene prozessbedingte CO ₂ -Emissionen (tCO ₂)
(10)	Zeitabhängige abgeschiedene energiebedingte CO ₂ -Emissionen (tCO ₂ pro Zeiteinheit)
(11)	Zeitabhängige abgeschiedenen energiebedingten CO ₂ -Emissionen unter Berücksichtigung von Biomasse und kohlenstoffhaltigen erneuerbaren Energieträgern (tCO ₂ pro Zeiteinheit)
(12)	Kumulierte abgeschiedene energiebedingte CO ₂ -Emissionen unter Berücksichtigung von Biomasse und kohlenstoffhaltigen erneuerbaren Energieträgern (tCO ₂)

Tabelle 9-21: Maßnahmenindividuelle Umsetzungsmatrix im Technologiemixmodul

Index	Parameter
(1)	Zeit
(2)	Zugrundeliegender Umsetzungsparameter in Abhängigkeit der Maßnahmen/Technologiekategorie: Produktionsmenge, Anzahl an Betrieben, Leistung, Energiemenge
(3)	Änderung des grundlegenden Umsetzungsparameters zum Vorjahr
(4)	Änderung des grundsätzlichen Umsetzungsparameters im Vergleich zum Startwert der Maßnahmenumsetzung
(5)	Jahresbeginn: Absolute Umsetzung hinsichtlich des zugrundeliegenden Parameters (bestückt)
(6)	Jahresbeginn: Absolutes Umsetzungspotenzial hinsichtlich des zugrundeliegenden Parameters (nicht-bestückt)
(7)	Jahresbeginn: Umsetzungsgrad (UMG)
(8)	Jahresbeginn: Anwendungspotenzial (AWP)
(9)	Im Jahr: Umsetzung
(10)	Jahresende: Absolute Umsetzung hinsichtlich des zugrundeliegenden Parameters (bestückt)
(11)	Jahresende: Absolutes Umsetzungspotenzial hinsichtlich des zugrundeliegenden Parameters (nicht-bestückt)
(12)	Jahresende: Umsetzungsgrad (UMG)
(13)	Jahresende: Anwendungspotenzial (AWP)
(14)	Ausschließlich Maßnahmenkategorie Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Elektrifizierung auf Prozessebene: Grundlegender Umsetzungsparameter in Abhängigkeit der Maßnahmen/Technologiekategorie am Ende der Umsetzung
(15)	Ausschließlich Maßnahmenkategorie Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Elektrifizierung auf Prozessebene: Änderungsfaktor der Umsetzung