



**HOCHSCHULE
ESSLINGEN**

Masterthesis

Modellentwicklung für Szenarien zukünftiger Energienachfragen und Technologien im Industriesektor

Im Wintersemester 2021/2022 des Studiengangs
Ressourceneffizienz im Maschinenbau

Robin König (763821)

Erstbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Stefan Rösler

Zweitbetreuerin: Dr. agr. Sonja Simon

30. März 2022

Abstract

In recent years, German industry has been responsible for around a quarter of the overall greenhouse gas emissions. Therefore, the industry is credited with a major mission to save emissions. Since the plant runtimes are very long, sometimes more than half a century, and the necessary new technologies will not be available for several years at the earliest, every decision to make new investments has a major impact on the climate. Consequently, a model is needed which serves pathways for the industrial transition to climate neutrality. This thesis entitled "*Model development for scenarios of future energy demands and technologies in the industrial sector*" deals with the development of such a model and shows key findings as well as first results for the industry and its subsectors up to 2050. As a result, a model for generating energy scenarios of the steel industry is created by using a new open source software tool. For this purpose, existing and future technologies are implemented and validated using the data provided. By expanding the created model with all other relevant energy consumers, a scenario model for the entire industry is now available and can be used to create various energy scenarios with sectoral disaggregation in the industrial sector.

Keywords:

Industry scenarios, green iron and steel industry, CO₂ emissions, climate change mitigation, energy scenario modelling, model development

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	3
1.2	Aufgabenstellung.....	4
2	Hintergrundwissen zu der Modellierung von Industrieszenarien	6
3	Entwicklung des Industriemodells	10
3.1	Grundgerüst des Modells	10
3.1.1	Einteilung und Zuordnung der Energieanwendungen	11
3.1.2	Methodik für die Modellierung der Top-Down Bereiche des Modells.....	14
3.1.3	Definition und Einordnung der Prozesse der Stahlindustrie	14
3.1.4	Definition der modellierten Umwandlungsprozesse	17
3.1.5	Methodik für die Modellierung der Bottom-Up Bereiche des Modells	18
3.2	Daten und Parametrisierung des Industriesektors	19
3.2.1	Definition und Klassifikation der Energieträger	19
3.2.2	Parametrisierung der Top-Down Bereiche des Modells	23
3.2.3	Parametrisierung der Bottom-Up Bereiche des Modells.....	25
3.2.4	Daten für die Ermittlung der CO ₂ -Emissionen.....	28
3.3	Implementierung des Modells im Framework LENS.....	32
3.3.1	Struktur und Bereitstellung der Eingangsdaten für LENS	35
3.3.2	Bereitstellung des Gleichungssystems für LENS	38
3.3.3	Struktur und Bereitstellung der Ergebnisse aus LENS.....	41
3.4	Kalibrierung des LENS-Industriemodells	42
3.4.1	Kalibrierung mit dem Vergleichsmodell für den Stahlsektor	42
3.4.2	Kalibrierung des Industriesektors an statistischen Daten.....	46
4	Modellanwendung für Szenarien	49
4.1	Szenariendefinition	49
4.2	Auswertung der Szenarienergebnisse	52

4.2.1	Energiebedarfe innerhalb des Industriegesektors	53
4.2.2	Energiebedarfe innerhalb der Subsektoren	57
4.2.3	Ausblick auf die CO ₂ -Emissionen des Industriegesektors	60
5	Benutzerfreundlichkeit des Modells	65
5.1	Methodik für die Untersuchung der Benutzerfreundlichkeit	65
5.2	Ergebnisse in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit von LENS	68
6	Diskussion	73
7	Fazit und Ausblick	75
8	Literaturverzeichnis	77
9	Anhang	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Energiebedarf der deutschen Industrie im Jahr 2019 [7]	2
Abbildung 2.1: CO ₂ -Emissionen aus dem Jahr 2020 und aktuelle Minderungsziele aus dem Klimaschutzgesetz.....	6
Abbildung 2.2: Kalibrierung eines Szenarienmodells.....	9
Abbildung 3.1: Methodik für die Modellierung des Industriesektors in LENS	10
Abbildung 3.2: Aufteilung der Energieanwendungen auf den Gesamtenergiebedarf nach Industriezweigen	13
Abbildung 3.3: Betrachtete Prozesse und Systemgrenzen im Modell dieser Arbeit ..	16
Abbildung 3.4: Einteilung von Energien und deren Zusammenhänge.....	20
Abbildung 3.5: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) von 2000 bis 2050	25
Abbildung 3.6: Produktionsmengen der energieintensivsten Subsektoren und deren zukünftige Trends	27
Abbildung 3.7: Verlauf der gemittelten Emissionsfaktoren in den letzten Jahren	31
Abbildung 3.8: Allgemeine Funktionsweise von LENS.....	33
Abbildung 3.9: Allgemeine Struktur der Prozessdefinition innerhalb der „Input Data“ Datei	36
Abbildung 3.10: Sektorhierarchie des Industriemodells.....	39
Abbildung 3.11: Gegenüberstellung der Energiebedarfe für Hochöfen und den Subsektor Eisen und Stahl nach IEA und AGEB	43
Abbildung 3.12: Relative Fehler δx pro Energieträger, Szenario und Jahr	45
Abbildung 3.13: Aufstellung der Gesamtenergiebedarfe nach IEA und AGEB mit unterschiedlichen Systemgrenzen	46
Abbildung 3.14: Einordnung der Modellergebnisse in die internationale und nationale Statistik.....	48
Abbildung 4.1: Marktanteile des Szenarios All Technologies.....	53
Abbildung 4.2: Energiebedarf der Industrie nach Subsektoren.....	53
Abbildung 4.3: Gesamtenergiebedarf der Industrie nach Energieträgern	54
Abbildung 4.4: Strombedarf der Industrie nach Energieanwendung	55

Abbildung 4.5: Wasserstoffbedarf der Industrie nach Anwendung und in Summe..	56
Abbildung 4.6: Sankey-Diagramm des Energiebedarfs der Industrie im Jahr 2030...	56
Abbildung 4.7: Energiebedarfe der Subsektoren Gebäude, Umwandlung und Rest der Industrie nach Energieträger	57
Abbildung 4.8: Energiebedarfe der Stahlindustrie in PJ/a in unterschiedlichen Szenarien.....	59
Abbildung 4.9: Einfluss unterschiedlicher Systemgrenzen im Subsektor Eisen und Stahl.....	60
Abbildung 4.10: CO ₂ Emissionen des deutschen Industriesektors aufgeschlüsselt nach Subsektoren.....	61
Abbildung 4.11: Darstellung der CO ₂ -Emissionen des Industriesektors nach Energieanwendungen.....	62
Abbildung 4.12: Anteil von biogenem CO ₂ an den Gesamtemissionen aus Gebäudeenergie (Absolutwerte in Mt/a)	62
Abbildung 4.13: CO ₂ -Emissionen des Subsektors Eisen und Stahl	63
Abbildung 5.1: Bewertung der Benutzerfreundlichkeit des LENS-Modells ohne Verbesserungskonzept.....	69
Abbildung 5.2: Konzept eines einfachen User Interface für LENS	70
Abbildung 5.3: Bewertung der Benutzerfreundlichkeit des LENS-Modells mit Verbesserungskonzept.....	71
Abbildung 9.1: Aufteilung des Industriesektors in seine Subsektoren und der jeweiligen Prozesszuordnung nach ISIC.....	91
Abbildung 9.2: Systemgrenzen im Stahlsektor in unterschiedlichen Quellen.....	93
Abbildung 9.3: Aufbereitungsverfahren von Eisenerz	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Verwendete Energieträger und deren Aggregation	22
Tabelle 3.2: Übersicht der verwendeten Daten und deren Quellen in den Top-Down Modellbereichen	23
Tabelle 3.3: Übersicht der verwendeten Daten und deren Quellen in den Bottom-Up Modellbereichen	26
Tabelle 3.4: Zuordnung der Emissionsfaktoren zu den aggregierten Energieträgern	30
Tabelle 3.5: Emissionsfaktoren des Stroms in kg CO ₂ /GJ	31
Tabelle 3.6: Gewählte SI-Einheitenpräfixe	34
Tabelle 3.7: Zusammenfassung aller Übergabeparameter an LENS.....	37
Tabelle 4.1: Beschreibung der vier Basisszenarien für die Modellanwendung	51
Tabelle 5.1: Fragen des System Usability Scale (SUS) Fragebogens nach J. Brooke....	66

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\bar{\epsilon}$	tCO ₂ /TJ	Gewichteter mittlerer Emissionsfaktor
K_n	J/€	Energieintensität eines Szenarienjahres
K_0	J/€	Energieintensität des Bezugsjahres
p	%	Jährliche Änderungsrate
n	-	Anzahl
$Production_t$	Mt	Gesamte Produktionsmenge
$Production_{pr}$	Mt	Produktionsmenge eines Prozesses
MS_{pr}	%	Marktanteil eines Prozesses
MS_{tech}	%	Marktanteil in Bezug auf eine Technologie
$ratio_{ec}$	-	Energie/Stoff-Verhältnis des Prozesses in Bezug auf einen Energieträger
$Demand_{ec}$	PJ	Energiebedarf in Bezug auf einen Energieträger
COP_{HP}	-	Leistungszahl der Wärmepumpe
P_{el}	PJ	Elektrische Leistung
Q_{amb}	PJ	Umgebungswärme
\dot{Q}_{useful}	PJ	Abgeführte Nutzwärme
UE_t	PJ	Gesamte Nutzenergie
η_{tech}	%	Wirkungsgrad einer Technologie
η_{th}	%	Thermischer Wirkungsgrad
η_{el}	%	Elektrischer Wirkungsgrad
s	-	Stromkennzahl
s_{tech}	-	Stromkennzahl der KWK in Bezug auf eine Technologie

Abkürzungen

AGEB	=	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
BF	=	Hochofen (<i>Blast Furnace</i>)
BMWi	=	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BOF	=	Sauerstoffblaskonverter (<i>Basic Oxyge Furnace</i>)
CCS	=	Carbon Capture and Storage
COP	=	Coefficient of Performance
COP 26	=	26th UN Climate Change Conference of the Parties
EAF	=	Elektrolichtbogenofen (<i>Electric Arc Furnace</i>)
EW	=	Eisenelektrolyse (<i>Electrowinning</i>)
FED	=	Endenergiebedarf (<i>Final Energy Demand</i>)
H2/DRI	=	Wasserstoff Direkt Reduktion (<i>Hydrogen Direct Reduction</i>)
IEA		International Energy Agency
IRES	=	International Recommendations for Energy Statistics
ISIC	=	International Standard Industrial Classification of All Economic Activities
KSG	=	Klimaschutzgesetz der Bundesrepublik Deutschland
NECP	=	Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan
NG/DRI	=	Erdgas Direkt Reduktion (<i>Natural Gas Direct Reduction</i>)
SIEC	=	Standard International Energy Product Classification
UI	=	User Interface
WZ 2008	=	Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Nutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen sind, sind als solche eindeutig kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht veröffentlicht und noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Ludwigsburg, 30.03.22

Ort, Datum:

Unterschrift:

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be 'M. S.' followed by a long horizontal stroke.

1 Einleitung

Das Thema Klimawandel ist bereits seit mehreren Dekaden bekannt, aber heute so aktuell wie nie. Anfang des Jahrtausends gelang es dem ehemaligen US-Vizepräsidenten Al Gore mit seinem Dokumentarfilm *an inconvenient truth* große Aufmerksamkeit zu gewinnen [1], der stark auf die Kernproblematik aufmerksam macht. Die Auseinandersetzung mit dem Klimawandel ist wichtig und Maßnahmen gegen die weitere anthropogene Erderwärmung müssen getroffen werden. Auf internationaler Ebene ist der *Intergovernmental Panel on Climate Change* (kurz IPCC) mit schweizer Hauptsitz eine der wichtigsten Organisationen in der Klimaforschung und unterstreicht mit jüngsten Berichten die Dringlichkeit von Klimaschutzmaßnahmen in allen Bereichen [2]. An dieser Stelle greift die vorliegende Arbeit, welche sich mit der deutschen Industrie in Bezug auf zukünftige Klimaszenarien auseinandersetzt.

Im vergangenen Jahr wurde das Klimaschutzgesetz überarbeitet, das die deutschen Klimaziele beinhaltet. Durch die Überarbeitung wurden strengere Minderungsziele bis zum Ziel der Netto-Null Emissionen bis 2045 festgelegt. Für die Erreichung dieses Ziels müssen in allen Bereichen Einsparungen von Emissionen erreicht werden. Der Industriesektor war 2020 für knapp 186 Mio. t CO₂-Äq verantwortlich, was etwa 23% der deutschen Gesamtemissionen entspricht [3][4]. Damit besitzt die Industrie einen großen Einsparauftrag.

Im Industriesektor haben die Anlagen, vor allem im Grundstoffbereich, sehr hohe Lebensdauern von bis zu 70 Jahren. Technologiesubstitutionen sind daher sehr träge und Neuinvestitionen der nächsten Jahre bleiben bis weit über das Jahr 2035 oder sogar 2050 bestehen [5]. Aus diesem Grund ist es essentiell zu wissen, wann welche Technologien ersetzt werden müssen und welche neuen Technologien hierfür in Frage kommen.

Ein Großteil der industriellen Emissionen ist auf die Nutzung und Umwandlung von Energien zurückzuführen, weshalb die Energienachfrage als wichtige Betrachtungsgröße gilt [6]. Durch die energieintensiven industriellen Prozesse ist auch der energetische Anteil der Industrie am deutschen Gesamtenergiebedarf (FED) mit knapp 28%

beachtlich [7]. Abbildung 1.1 schlüsselt hierzu den deutschen Energiebedarf des Jahres 2019 nach Sektoren auf und stellt die energieintensivsten Industriezweige dar, die zusammen über die Hälfte des Gesamtbedarfs ausmachen. Dadurch wird deutlich, wie wichtig nicht nur die Betrachtung der Industrie ist, sondern auch wie einflussreich einzelne Industriezweige sind.

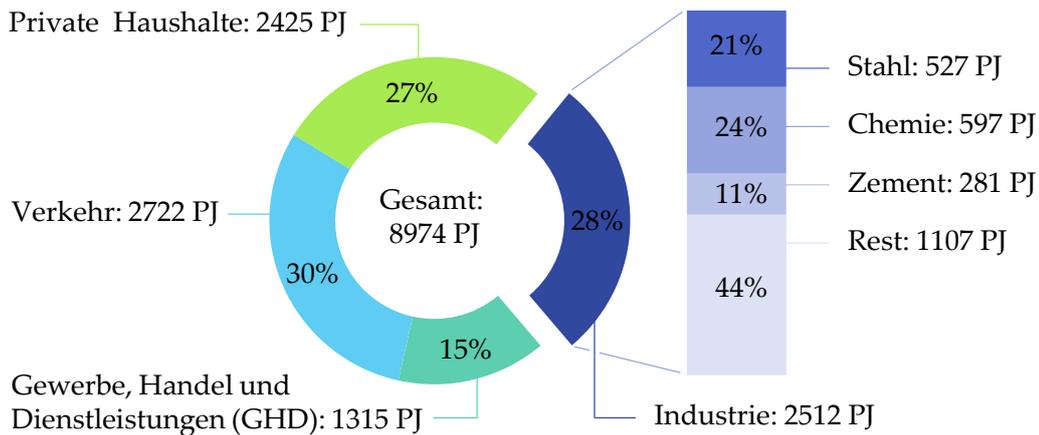


Abbildung 1.1: Energiebedarf der deutschen Industrie im Jahr 2019 [7]

Die Untersuchung einer sektoral aufgelösten Industrie in Bezug auf dessen zukünftige Energienachfrage ist damit notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird speziell die Stahlindustrie näher betrachtet. Unterschiedliche Arbeiten haben sich damit bereits auseinandergesetzt, allen voran die Publikation von Harpprecht et al. (2022), in der eine detaillierte Analyse des deutschen Stahlsektors durchgeführt wurde und anhand unterschiedlicher Szenarien mögliche Wege zu klimafreundlicher Stahlherstellung aufgezeigt werden [8]. Ähnliche Betrachtungen wurden von Agora Industry (2021) und auch von Bataille et al. (2021) für den globalen Stahlsektor durchgeführt [9][10]. Weitere Veröffentlichungen analysieren ebenso andere Industriezweige und Regionen, haben aber stets die Reduktion von CO₂-Emissionen und die damit einhergehende Minderung oder Transformation der Energiebedarfe als gemeinsames Ergebnis. Beispielhaft seien hierfür die Arbeiten von Karakaya et al. (2018), Kobiela et al. (2020), Agora Energiewende (2019), Fleiter et al. (2021), Fleiter et al. (2012) oder Lutz et al. (2014) genannt [5][6][11][12][13][14].

1.1 Problemstellung

Wie bereits beschrieben ist es in der Industrie besonders schwierig, Klimaschutzmaßnahmen zu treffen, da jede Entscheidung mit hohen Investitionskosten und langen Anlagenlebensdauern verbunden ist. Darüber hinaus sind neue Technologien teilweise noch nicht kommerziell verfügbar [5]. Deshalb ist es in der Industrie besonders wichtig, frühzeitig einen Pfad vorzugeben, der notwendige Maßnahmen mit Zeitpunkt und Umfang beinhaltet, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen.

Auf einem Side Event der COP 26 wurde hierzu treffenderweise gesagt:

“For a decarbonization in the industrial sector, three things are crucial. Access to fossil free electricity, production and storage of green hydrogen and access to fossil free carbon atoms.” [15]

Dabei gibt es das Problem der unbekanntenen zukünftigen Mengenbedarfe, die durch gegenwärtige und zukünftige Technologien innerhalb der Industriezweige getrieben werden.

Allgemeine Untersuchungen hierzu gibt es, wie etwa die Veröffentlichung von Mengis et al. (2022) mit der Untersuchung der deutschen Emissionen und deren Kategorisierung, wie viel im Jahr 2050 vermieden, reduziert und zusätzlich entfernt werden muss, um Netto Null Emissionen zu erreichen [16]. Eine ganzheitliche aber aggregierte Betrachtung von Deutschland bietet hingegen Simon et al. (2022). Dabei geht es um die Bereitstellung unterschiedlicher Szenarien, die Deutschland einen Weg zu Klimaneutralität bis 2045 bietet [17]. In den Arbeiten enthalten die dabei genutzten Modelle zwar die einzelnen Sektoren, diese sind aber auf aggregierter Ebene abgebildet. Somit werden keine detailliert aufgelösten Subsektoren modelliert oder können nicht unkompliziert in den Modellen quantifiziert werden. Daher können keine expliziten Technologieablösungen oder die wechselseitigen Einflüsse unterschiedlicher Industriezweige betrachtet werden. Daraus ergibt sich ein klares Defizit in den verwendeten Modellen.

Es bedarf daher eines Modells zur Vorhersage der Energienachfragen innerhalb einzelner Industriezweige, woraus sich die Forschungsfragen dieser Arbeit ergeben:

1. *Wie lässt sich die Energienachfrage der deutschen Industrie verursachergetreu modellieren?*

2. *Wie können langfristig relevante Industrieprozesse und ihre Abhängigkeiten anhand des Beispiels der Stahlindustrie in das Modell integriert werden?*
3. *Wie kann ein benutzerfreundliches Modell für die Generierung zukünftiger Energieszenarien erstellt werden?*

Zentraler Bestandteil ist damit die Auseinandersetzung mit der Entwicklung eines Energiemodells, das zur Aufgabe hat, die Energiebedarfe der Industrie zu bilanzieren. Darüber hinaus muss dieses Modell eine Möglichkeit zur einfachen Implementierung unterschiedlicher Industrieprozesse enthalten, welche in der Auswertung separat analysiert und deren Einflüsse ausgewertet werden können. Deren Gruppierung soll die entsprechenden Industriezweige abbilden. Zur Auswertung der zukünftigen Entwicklung der bilanzierten Energiebedarfe muss eine benutzerfreundliche Möglichkeit zur Verfügung gestellt werden, diese in Szenarien zu überführen und so Technologieablösungen abbilden zu können.

1.2 Aufgabenstellung

Durch die definierten Forschungsfragen ist das Ziel dieser Arbeit, ein Modell für den Industriesektor zu entwickeln, das die oben genannten Punkte beinhaltet. Hierfür wird die Industrie als Modul mit höherer Auflösung zum Gesamtmodell ergänzt. Neuartig ist hierbei die sektorale Auflösung der Industrie und die damit verbundene Modellierung der einzelnen Technologien und Prozesse. Damit können künftig auch prozessbedingte Limitationen aus einzelnen Industriesektoren in Transformationspfaden und Energieszenarien des Gesamtsystems berücksichtigt werden. Dabei dient der Subsektor der Stahlindustrie als Beispiel und wird entsprechend aus dem Gesamtmodell extrahiert. Die gegenwärtigen und zukünftigen Technologien, sowie deren Ein- und Ausgangsgrößen werden untersucht und eingebunden. Abschluss dessen soll die Auswertung der generierten Daten durch das neue Industriemodell sein, wobei sowohl die Einzelsektoren als auch die gesamte Industrie betrachtet werden. Darüber hinaus wird das Modell auf dessen Benutzerfreundlichkeit hin untersucht und ein Verfahren angewendet, das zur Quantifizierung und Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit dient.

Ergebnis dieser Arbeit ist abschließend ein Modell, das die Energiebedarfe der Industrie bilanziert und eine sektorale Auflösung ermöglicht. Dadurch können künftig einzelne Industriezweige innerhalb der Industrie einfach und schnell modelliert werden um daraus Energieszenarien abzuleiten.

2 Hintergrundwissen zu der Modellierung von Industrieszenarien

Für die spätere Einordnung des Modells und dessen Funktionsumfangs mit dem Ziel der Generierung von Szenarien werden hier einleitend die relevanten Klimaabkommen für Deutschland vorgestellt, für deren Einhaltung die Szenarien erstellt werden. Darauf baut die Klärung des Szenariobegriffs und die Erläuterung der dazugehörigen Methoden und Typen auf. Darüber hinaus werden zentrale Modellierungsansätze vorgestellt, welche für die Modellentwicklung von zentraler Bedeutung sind und auch in der nachgelagerten Modellkalibrierung eine wichtige Rolle spielen.

Der größte und verbreitetste Klimastandard ist das *Pariser Abkommen*, welches seit 2016 besteht und heute weltweit 195 Mitgliedsnationen umfasst. Ziel dessen ist unter anderem die Beschränkung der anthropogenen Erderwärmung auf 2 °C und möglichst unter 1,5 °C [18]. Darüber hinaus hat sich die EU 2019 auf den *European Green Deal* geeinigt und damit festgelegt, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen [19]. Deutschland manifestiert dies im Klimaschutzgesetz der Bundesrepublik Deutschland (KSG). Darin enthalten ist das Ziel der deutschen Klimaneutralität bis 2045, zu sehen in Abbildung 2.1.

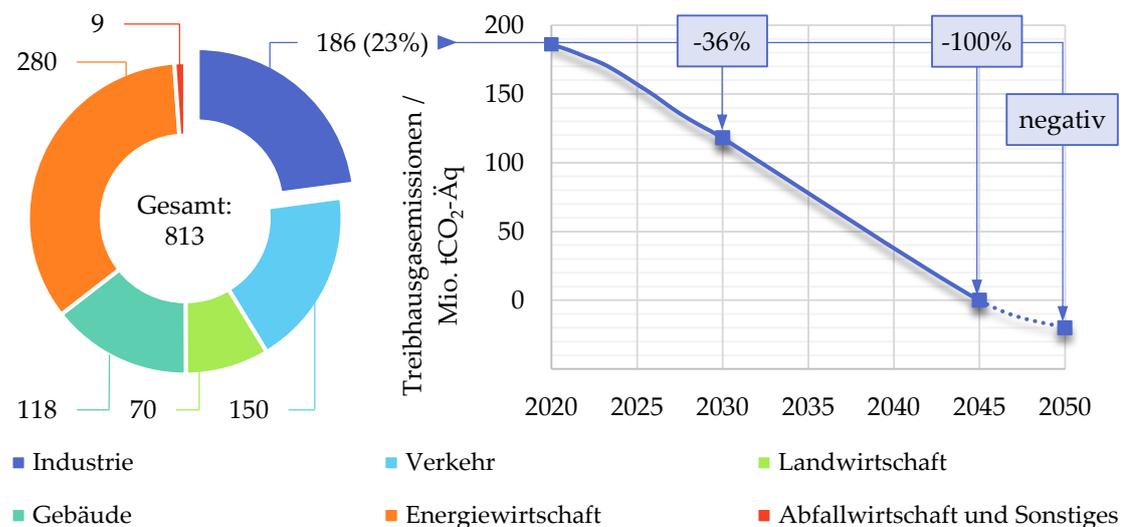


Abbildung 2.1: CO₂-Emissionen aus dem Jahr 2020 und aktuelle Minderungsziele aus dem Klimaschutzgesetz

Im August 2021 wurde dieses KSG angepasst und verschärft, wodurch neuste Maßgaben hervor gehen. In Abbildung 2.1 sind die Treibhausgasemissionen von Deutschland im Jahr 2020 dargestellt, wie sie im KSG beschrieben und nach Sektoren aufgeschlüsselt sind. Darüber hinaus werden auch die Minderungsziele abgebildet, die in der Auswertung der Modellergebnisse dieser Arbeit (siehe Kapitel 4.2) Anwendung finden sollen [3].

Sinn und Zweck der Erstellung und Auswertung von Energie- und Emissions-Szenarien ist es, gewonnene Erkenntnisse der Vergangenheit systematisch für die Gestaltung der Zukunft einzusetzen. Dies stellt eine wichtige Methode der Vorausschau zukünftiger Veränderungen dar und ist ein Hilfsmittel für politische Entscheidungsprozesse. Szenarien differenzieren sich dabei klar von Prognosen. Eine Prognose stellt eine wahrscheinliche zukünftige Entwicklung eines betrachteten Systems dar, wie es z.B. für das Wetter üblich ist. Mithilfe eines Szenarios hingegen wird nicht versucht, die Zukunft möglichst präzise vorherzusagen, sondern einen Raum möglicher Entwicklungen eines Systems zu bieten. Dies stützt sich auf zukünftigen Annahmen für wesentliche Einflussgrößen, basierend auf historischen Entwicklungen und/oder Zielvorgaben [20].

Unterschieden wird in der Szenarientwicklung zwischen den zwei Methoden der qualitativen und quantitativen Szenarien. Ein qualitatives Szenario bildet einen Möglichkeitsraum der Entwicklung eines Systems ab. Dieser Raum wird auch *Szenariotrichter* genannt und, ausgehend von der Gegenwart, durch die Extremszenarien eingegrenzt. Innerhalb dieses Trichters befinden sich wahrscheinliche Szenarienfade, die für weitere Analysen ausgewählt werden können. Im Gegensatz dazu beschäftigen sich quantitative Szenarien mit der Erstellung wahrscheinlichkeitsbasierter Modelle, die sich auf statistische und mathematische Grundlagen stützen [20].

Neben der Methodik ist auch der Typ eines Szenarios ausschlaggebend. Explorative Szenarien gehen von gegenwärtigen Randbedingungen aus und führen diese Situation bis zum gewählten Zeithorizont fort. So kann z.B. ermittelt werden, wie sich bestimmte politische Entscheidungen zukünftig auswirken. Es wird also eine Vorwärtsbetrachtung ausgehend von der Ist-Situation durchgeführt (Englisch auch *forecasting* genannt). Dem gegenüber steht die Rückwärtsbetrachtung normativer Szenarien (Englisch auch

backcasting genannt), die einen vorgegeben Zielwert anstreben und mögliche Pfade zur Erreichung dieses Ziels angeben. In der Klimaforschung werden oft explorative und normative Szenarien gekoppelt, um den Nutzen von Klimaschutzmaßnahmen im Vergleich zu *Business-as-usual* Verläufen quantifizieren zu können. Dies ist wertvoll für die Prioritätensetzung möglicher Maßnahmen [20].

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell soll vorrangig quantitative Szenarien betrachten und dabei sowohl *forecasting* als auch *backcasting* Szenarien ermöglichen. Dies wird erneut in der Implementierung des Modells in Kapitel 3.3 aufgegriffen.

Als Modell zur Erzeugung solcher Szenarien gibt es zum einen Klimamodelle, wie sie z.B. von IPCC verwendet werden und das Ziel verfolgen, die künftige Entwicklung des Klimas zu berechnen [2]. Zum anderen gibt es Energiemodelle, die das Ziel verfolgen, Energiesysteme abzubilden und deren künftige Entwicklung zu berechnen, wie es auch Umfang dieser Arbeit ist. In der Modellierung eines Energieszenarios wird grundsätzlich zwischen dem *Top-Down* und dem *Bottom-Up* Ansatz unterschieden. Der *Top-Down* Ansatz ist eher ökonomisch ausgerichtet. Dabei wird das Gesamtsystem basierend auf makroökonomischen Zusammenhängen modelliert und berechnet. Die Individualergebnisse resultieren durch Dekomposition aus den prozentualen Anteilen, bezogen auf das Gesamtergebnis. Der *Bottom-Up* Ansatz hingegen ist ingenieurtechnisch ausgerichtet und bildet das System mit detaillierten technischen Beschreibungen der betrachteten Technologien ab. Damit wird jedes individuelle Element modelliert und dessen Ergebnisse berechnet. Das Gesamtergebnis ergibt sich aus den Individualergebnissen durch Aggregation [21][22]. In Bezug auf die vorangestellte Problemstellung sind die bisherigen Modelle nach dem *Top-Down* Ansatz modelliert. Ziel des Modells dieser Arbeit ist es damit, durch die sektorale Auflösung einzelne Industriezweige aus dem *Top-Down* Modell zu extrahieren und detailliert nach dem *Bottom-Up* Ansatz abzubilden.

Für den Industriesektor ergeben sich daraus zwei Betrachtungsweisen. Für die Statistik, die meist das allgemeine übergeordnete Gesamtsystem betrachtet, ist die Industrie eine Unterkategorie von vielen. Die Daten der Industrie ergeben sich dementsprechend aus der prozentualen Zerlegung der Gesamtmenge nach dem *Top-Down* Prinzip. In der individuellen Betrachtung des Industriesektors ist viel weniger das Gesamtsystem von

Interesse, als vielmehr die Einzelprozesse, die in Aggregation den Industriesektor abbilden. Hier wird also der *Bottom-Up* Ansatz angewandt. Es liegt in der Natur dieser zwei Ansätze, dass ein Vergleich zweier identischer Betrachtungsebenen (hier der Industriesektor), die mit unterschiedlichen Ansätzen generiert wurden, nicht exakt identische Ergebnisse liefert. Dies ist auf Rundungsdifferenzen und Ungenauigkeiten in der Aggregation, bzw. Dekomposition der Daten zurückzuführen.

In der Szenarientwicklung ist es daher wichtig, dass erstellte Szenarien auf dessen realitätsgetreue Abbildung des Systems überprüft werden. Diese Überprüfung findet in Form einer Kalibrierung des Modells an geeigneten statistischen Daten statt und stellt damit sicher, dass das Szenarienmodell möglichst korrekte Ergebnisse liefert. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 2.2 dargestellt und wird in Kapitel 3.4 aufgegriffen.

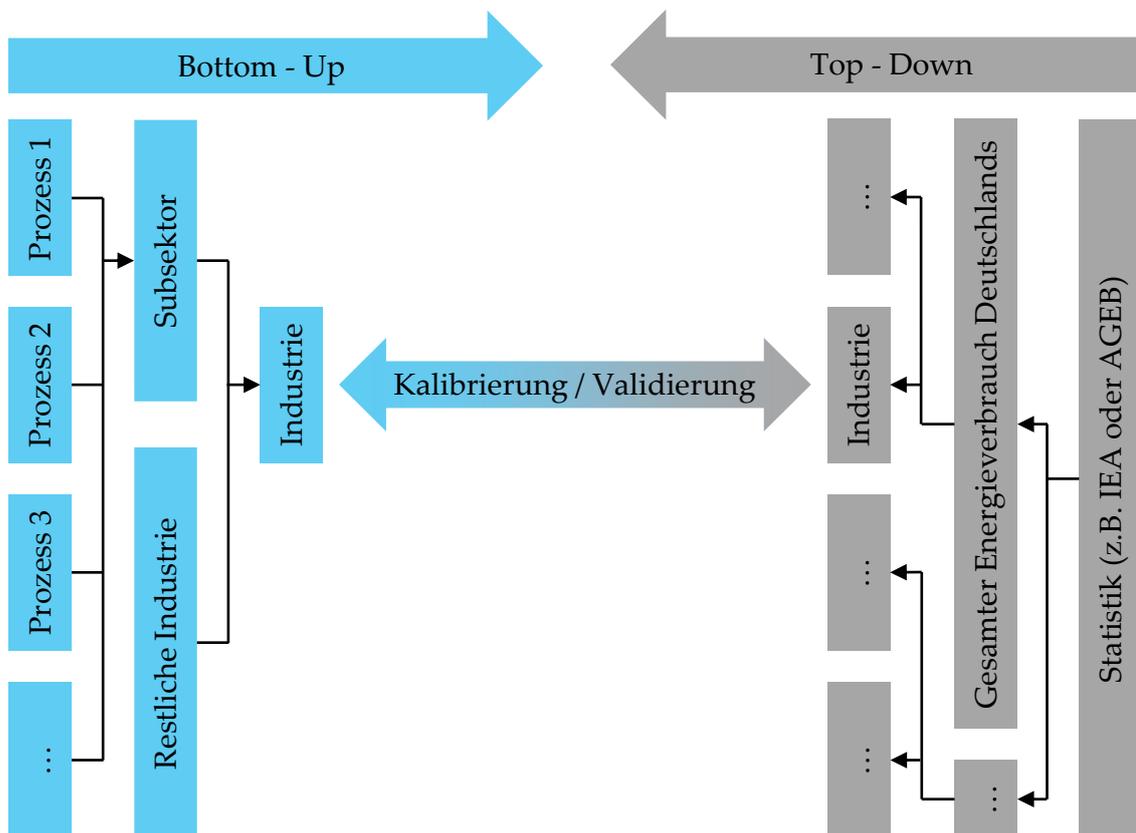


Abbildung 2.2: Kalibrierung eines Szenarienmodells

3 Entwicklung des Industriemodells

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung des Modells für die Abbildung des Industriesektors, und stellt damit die Methodik zur Beantwortung der anfangs definierten Forschungsfragen dar. Zuerst wird hierfür die grundlegende Struktur des Modells definiert, welche anschließend durch Daten parametrisiert und im genutzten Framework LENS abgebildet wird. Eine abschließende Kalibrierung erbringt den Nachweis der Funktionsfähigkeit des entwickelten Modells.

3.1 Grundgerüst des Modells

Die zugrundeliegende Struktur des Industriemodells ist in Abbildung 3.1 zu sehen und wird im Folgenden erläutert.

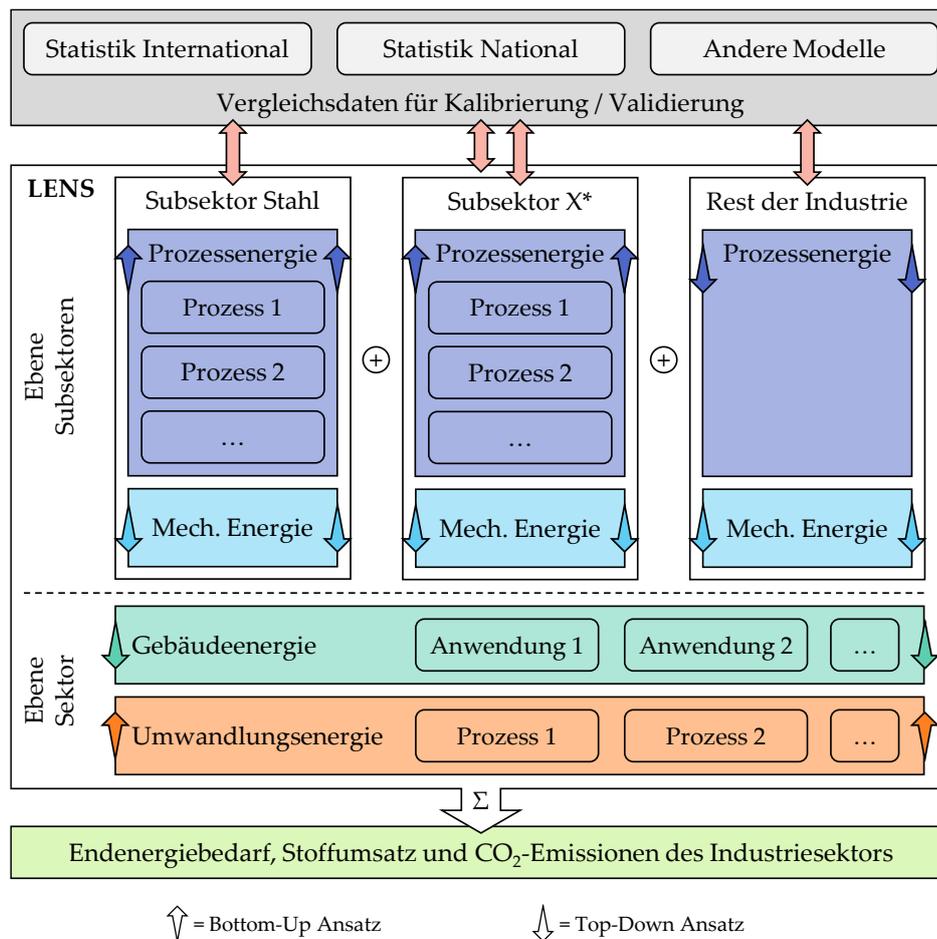


Abbildung 3.1: Methodik für die Modellierung des Industriesektors in LENS

*Die Modellierung weiterer Subsektoren ist nicht Umfang dieser Arbeit

Das Modell besteht dementsprechend aus mehreren Bereichen und Ebenen, die im Framework LENS (siehe Kapitel 3.3) abgebildet werden. Dies soll genutzt werden, um künftig alle relevanten Prozesse der verschiedenen Industriesektoren mit ihren Energieverbräuchen und CO₂-Emissionen zu bilanzieren und Szenarien für ihre künftige Entwicklung abzubilden. Die vorliegende Arbeit stellt einen ersten Entwicklungsschritt dar und bildet zunächst den Stahlsektor detailliert ab. Alle weiteren Industriesektoren werden aggregiert dargestellt, eine detaillierte Abbildung weiterer Subsektoren wird in der Modellstruktur aber bereits angelegt.

In dem Modell wird zwischen den Energieanwendungen *Prozessenergie*, *mechanische Energie*, *Gebäudeenergie* und *Umwandlungsenergie* unterschieden. *Prozessenergie* sowie *mechanische Energie* werden direkt in den detailliert modellierten Subsektoren abgebildet, während *Gebäudeenergie* und *Umwandlungsenergie* aggregiert für den gesamten Industriesektor modelliert werden. Die Stahlindustrie wird demnach dem Industriesektor als Subsektor untergeordnet. Neben der Stahlindustrie gibt es in der Industrie noch weitere Subsektoren, deren detaillierte Modellierung zwar nicht Umfang dieser Arbeit ist, aber deren Energiebedarfe für Prozesse trotzdem in der Bilanzierung beachtet werden müssen. Dies geschieht hier in aggregierter Form im Subsektor *Rest der Industrie*, welcher ebenfalls *Prozessenergie* und *mechanische Energie* beinhaltet. Neben diesen zwei Bereichen gibt es noch den Subsektor *Gebäude*, der alle Energieanwendungen für die Nutzung von industriellen Gebäuden abdeckt, und den Subsektor *Umwandlungsprozesse*, der industrierelevante Prozesse für die Umwandlung von Energien beinhaltet. Außerdem ist zu beachten, dass in dem Modell sowohl *Bottom-Up* als auch *Top-Down* modellierte Bereiche verknüpft werden. Nachfolgend wird detailliert auf die einzelnen Bereiche des Modells und entsprechenden Modellierungsansätze eingegangen.

3.1.1 Einteilung und Zuordnung der Energieanwendungen

Die oben vorgestellte Zuordnung der verschiedenen Energieanwendungen wird nachfolgend genauer untersucht und begründet. In der Anwendungsbilanz zur nationalen Statistik der AGEB [23] werden unterschiedliche Energieanwendungen aufgeführt, welche separat analysiert werden können. Diese werden zusammen mit den

jeweiligen Energiebedarfen in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Energiebedarfe werden nach Subsektoren der nationalen Statistik aufgeschlüsselt und entsprechend des Gesamtenergiebedarfs absteigend sortiert. Die Balken stellen die prozentualen Anteile der Anwendungen an dem Gesamtbedarf dar. Unterschieden wird dabei zum einen in den Anteil zwischen Elektrizität und Brennstoffen im Gesamtbedarf und zum anderen in den Einzelanteilen innerhalb des Elektrizitäts- und Brennstoffbedarfs.

Klar ersichtlich ist dabei der große Anteil der *Prozessenergie* am Gesamtenergiebedarf. In Bezug auf die Forschungsfragen wird dabei erneut die Relevanz einer detaillierten Modellierung der Industrieprozesse deutlich. Der *Prozessenergie* werden die *Prozesswärme* und *Prozesskälte* zugeordnet und im Modell dementsprechend direkt an die Prozesse gebunden.

Ebenso wird der mechanischen Energie ein beträchtlicher Teil des Energiebedarfs zugeschrieben, der darüber hinaus in den Subsektoren unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Aus diesem Grund ergänzt die mechanische Energie die Subsektoren. In den detailliert modellierten Subsektoren wie hier *Eisen und Stahl* (bzw. *Metallerzeugung*) soll allerdings nur der Strombedarf der mechanischen Energie abgebildet werden, da dieser überwiegt. Der sehr geringe Anteil an Brennstoffen wird im Subsektor *Rest der Industrie* abgebildet.

Für den Gebäudesektor bleiben damit viele weitere Anwendungen übrig, die alle getrennt definiert werden müssten. Da viele dieser Anwendungen nur geringfügige Anteile am Gesamtbedarf haben, ist eine solch detaillierte Betrachtung mit viel Aufwand für wenig zusätzliche Erkenntnis verbunden. Aus diesem Grund werden die Anwendungen entsprechend ihres Anwendungstypes und des Hauptbedarfs zusammengefasst und aggregiert auf Ebene des Industriesektors modelliert. Damit ergibt sich eine Wärmeanwendung, die einen großen Brennstoffanteil besitzt, bestehend aus *Raumwärme* und *Warmwasser*. Die übrigen Anwendungen *IKT*, *Beleuchtung* und *Klimakälte* bedürfen nahezu ausschließlich Strom und werden daher ebenfalls zusammengefasst.

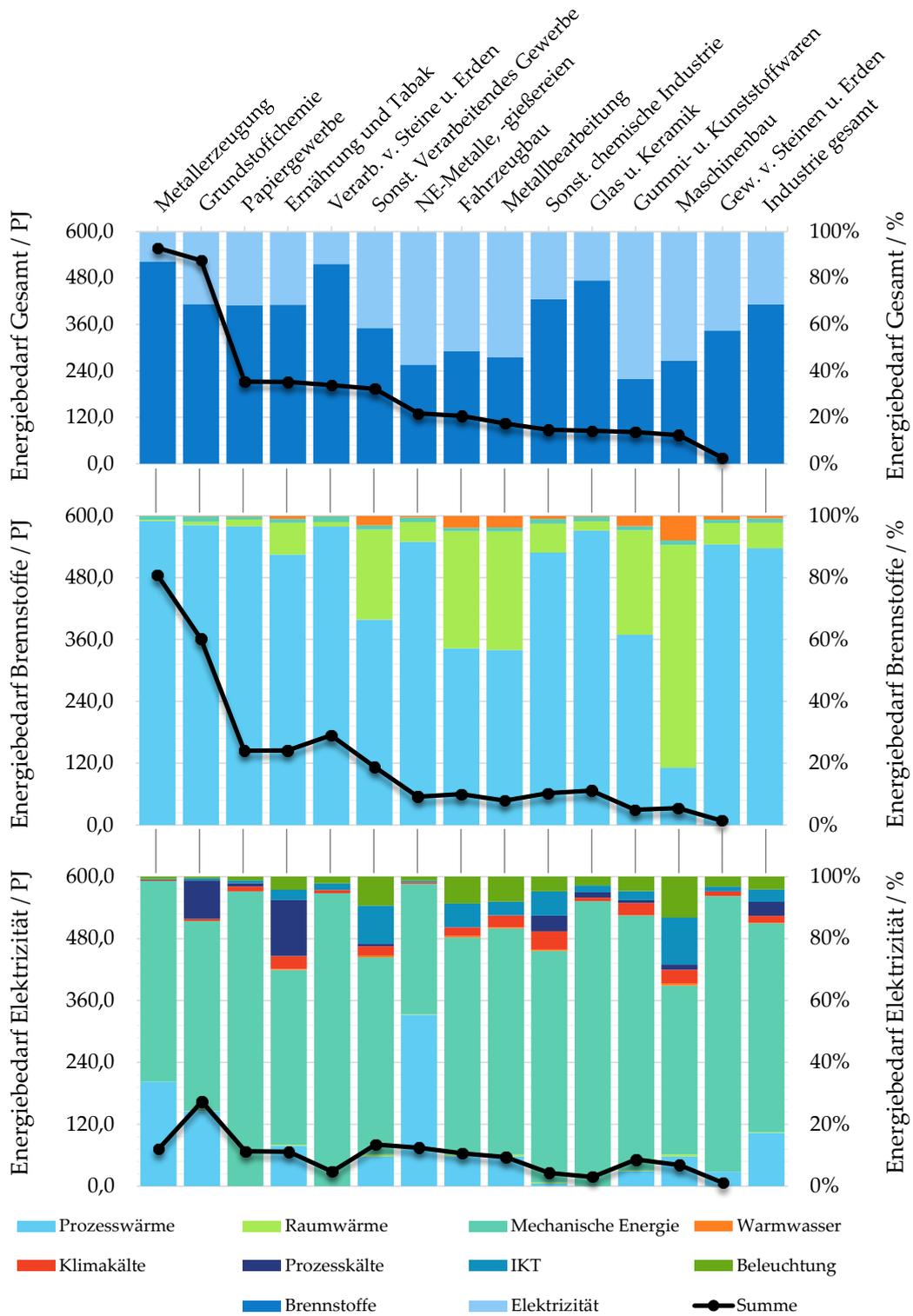


Abbildung 3.2: Aufteilung der Energieanwendungen auf den Gesamtenergiebedarf nach Industriezweigen

3.1.2 Methodik für die Modellierung der Top-Down Bereiche des Modells

Die Bereiche *Gebäudeenergie*, *mechanische Energie* und *Prozessenergie* des Subsektors *Rest der Industrie* werden über den *Top-Down* Ansatz modelliert. Für jede der oben definierten Energieanwendungen wird die Gesamtnutzenergiemenge vorgegeben. Diese wird mit energieträgerspezifischen Wirkungsgraden und Marktanteilen verrechnet, um so die gewünschten Endenergiebedarfe zu erhalten.

Im Fall der mechanischen Energie wird direkt der Gesamtendenergiebedarf vorgegeben. Die Nutzenergie ist oft kinetische Energie oder stark gekoppelt an andere Technologien wie Pumpen oder Kompressoren. Die Betrachtung der Nutzenergie ist daher an dieser Stelle nicht zielführend.

Die künftig anfallenden Energiebedarfe der *Top-Down* modellierten Bereiche werden in den Szenarien anhand der Fortschreibung von Energieintensität und der Wirtschaftsentwicklung fortgeschrieben. Die Wirtschaftsentwicklung geht in Form des Bruttoinlandsprodukts (BIP) als externe Annahme in das Modell ein [24]. Für beide Parameter werden Annahmen anhand einschlägiger Literatur vorgenommen (vgl. Simon et al. [17] und Fette et al. [25])

Basierend auf den Annahmen wird für die Berechnung der Energiebedarfe innerhalb einzelner Szenarienjahre die Formel für die Zinseszinsrechnung verwendet, vgl. Formel (3.1), bzw. umgeformt auf die Formel der jährlichen Änderungsrate (3.2) [26]. Für die Berechnung der Energieintensität des Szenarienjahren K_n wird die Energieintensität des Bezugsjahres K_0 um die jährliche Änderungsrate p für n Jahre beaufschlagt, wobei sich n aus der Differenz zwischen dem Bezugsjahr und dem Szenarienjahr berechnet.

$$K_n = K_0 \cdot (1 + p)^n \quad (3.1)$$

$$p = \left(\frac{K_n}{K_0}\right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (3.2)$$

3.1.3 Definition und Einordnung der Prozesse der Stahlindustrie

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Modellbereichen wird der Subsektor der Stahlindustrie nach dem *Bottom-Up* Ansatz modelliert. Dies bringt den gewünschten Vorteil mit sich, dass die enthaltenen Produktionsprozesse detailliert abgebildet und analysiert werden können. Entsprechend ist es wichtig, vorab die betrachteten Prozesse

und die Systemgrenzen des Modells zu definieren. Abbildung 3.3 stellt alle modellierten Prozesse der Stahlindustrie und deren Einzeltechnologien dar.

Der konventionelle Prozess der Stahlherstellung besteht aus der Roheisenherstellung im Hochofen (BF) und der nachgelagerten Stahlherstellung im Sauerstoffblaskonverter (BOF), mit anschließenden Veredelungsschritten. Dieser Prozess wird BF/BOF genannt. Das Verfahren der Direktreduktion (DRI) mit anschließender Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen (EAF) wird DRI/EAF genannt. Als Reduktionsgas wird hierfür im Idealfall Wasserstoff aus 100% erneuerbaren Energien eingesetzt, da damit eine erhebliche Reduktion der CO₂-Emissionen um bis zu 97% möglich ist. In diesem Fall wird der Prozess H₂/DRI/EAF genannt. Das Verfahren kann auch mit Erdgas (CH₄) betrieben werden (NG/DRI/EAF), emittiert dann aber CO₂. Daher ist es vor allem für den Einstieg interessant, bis ausreichend Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht [6][27][28]. Die Stahlherstellung mittels EAF mit vorgelagerter Roheisenherstellung durch das Eisenelektrolyse-Verfahren (EW) wird EW/EAF genannt. Die reine Sekundärstahlherstellung durch einfaches Recycling von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen heißt Scrap/EAF. Darüber hinaus gibt es noch den Prozess der Schmelzreduktion, der ebenfalls als Alternative zur konventionellen Stahlherstellung gilt. Dieser wird hier aber nicht betrachtet. Detaillierte Prozessbeschreibungen können Anhang 12 entnommen werden.

Für die Abbildung des CCS Prozesses (*Carbon Capture and Storage*) wird der gekoppelte Gesamtprozess betrachtet und modelliert. In diesem Fall ist dies die Kopplung an den Hochofen Prozess und ergibt damit den BF/BOF/CCS Prozess. Eine separate Modellierung eines CCS Prozesses ist nicht sinnvoll, da der CCS Prozess direkt an den Herstellprozess gekoppelt und entsprechend ausgelegt ist. Ein CCS Prozess für einen anderen Herstellungsprozess wird andere Ein- und Ausgangswerte haben.

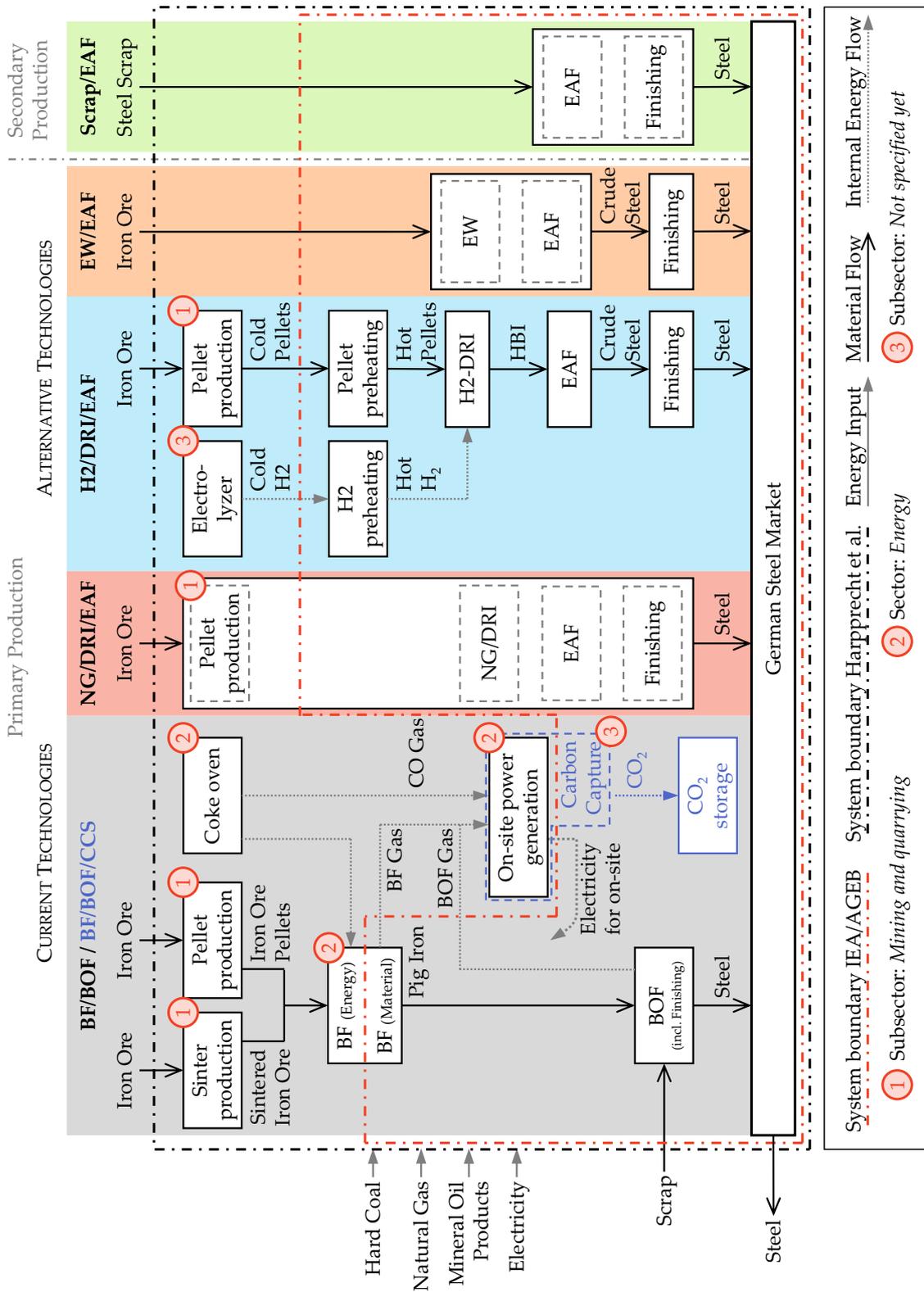


Abbildung 3.3: Betrachtete Prozesse und Systemgrenzen im Modell dieser Arbeit
 Abbildung adaptiert nach Harprecht et al. [8]

Die in Abbildung 3.3 dargestellten Systemgrenzen beziehen sich auf Datenquellen, die in Kapitel 3.4 für die Kalibrierung des Modells relevant sind. Die IEA Statistik nutzt für die Systemgrenzen die Klassifizierung der *International Recommendations for Energy Statistics* (IRES) [29], welche sich im Wesentlichen auf die *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities* (ISIC) der UN [30] beruft. Die deutsche Statistik der AGEB klassifiziert die Industrieprozesse nach der *Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008)* [31]. Im Wesentlichen sind diese Klassifikationen identisch. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Systemgrenzen der Statistiken kann Anhang 11 entnommen werden. Im Vergleich dazu werden die Systemgrenzen in Harpprecht et al. [8] deutlich differenziert. Hier wird dem Subsektor der Stahlindustrie deutlich mehr zugerechnet als es in den beiden Statistiken der Fall ist. Die Systemgrenzen für das Modell dieser Arbeit werden gleich derer der Statistiken definiert. Die damit ausgegrenzten Prozesse in der Stahlindustrie werden den Umwandlungsprozessen zugeordnet und im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3.1.4 Definition der modellierten Umwandlungsprozesse

Der Bereich der Umwandlungsprozesse im Modell enthält lediglich industrierelevante Umwandlungsprozesse und ist ausdrücklich nicht mit dem Umwandlungssektor gleichzusetzen, wie er in Statistiken aufgeführt wird. Der Vorteil der separaten Abbildung von Umwandlungsprozessen im Modell ist, dass diese anschließend auch separat ausgewertet und individuell an gegebene Systemgrenzen angepasst werden können. Modelliert werden hierbei die Prozesse Koksofen, Wasserstoffherstellung, allgemeine (nicht prozessintegrierte) industrielle KWK, Sinterproduktion und Pelletproduktion. Prozessintegrierte KWK wie im Fall des BF bleibt innerhalb der Prozesse, da eine Herauslösung durch die tiefe Integration nur schwer umsetzbar ist.

Die Wasserstoffherstellung wird einerseits innerhalb der industriellen Prozesse abgebildet, um energetische und stoffliche Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Andererseits kann Wasserstoff als Energieträger von außen zugeführt werden. Dies ermöglicht die Ankopplung des Industriemodells an Modelle des gesamten Energiesystems.

Die Sinter- und Pelletproduktion lässt sich nicht aus dem Prozess NG/DRI/EAF herauslösen, da hierfür keine detaillierten Daten vorliegen. Aus diesem Grund wird dieser Prozess so belassen und die Ungenauigkeit in Kauf genommen.

3.1.5 Methodik für die Modellierung der Bottom-Up Bereiche des Modells

Im Modell werden die Prozessenergien der detailliert modellierten Subsektoren und der Umwandlungsprozesse nach dem *Bottom-Up* Prinzip modelliert und bringen damit eine entscheidende Neuentwicklung. Für die implementierten Prozesse werden Produktionsmengen vorgegeben, welche die treibende Größe darstellen. Für die Stahlindustrie ist dies verkaufsfertiger Stahl. Zudem wird jedem Prozess eine Stoff- und Energiebilanz hinterlegt, die auf eine Produktionseinheit (z.B. 1 t Stahl) normiert ist. Über prozentuale Marktanteile der einzelnen Prozesse an der Gesamtproduktionsmenge ergeben sich prozessbezogene Produktionsmengen, welche wiederum über die Verrechnung mit den Stoff- und Energiebilanzen die Endenergiebedarfe ergeben. Die zukünftige Entwicklung der Produktionsmengen für die Szenarien ergibt sich aus dem Trend der Historie und wird entsprechend fortgeführt.

Ein Unterschied in der Modellierung der Umwandlungsprozesse ist, dass die Prozesse direkt an die Energiebedarfe der Endenergieverbraucher innerhalb der Subsektoren gekoppelt sind. Damit entfällt die Angabe von Marktanteilen. Stattdessen wird hier eine prozentuale Marktabdeckung angegeben, durch die es möglich ist, auch nationale Unter- oder Überproduktionen abzubilden. Die dann noch übrig bleibenden Energiebedarfe innerhalb des Industriesektors sind als notwendiger Importanteil (oder Exportanteil im Falle einer Überproduktion) zu betrachten.

Zusätzlich wird für die Wärmeanwendungen innerhalb der *Top-Down* modellierten *Prozessenergie* und *Gebäudeenergie* die allgemeine Nutzung einer Wärmepumpe modelliert, da diese, vor allem für Nieder- und Mitteltemperaturprozesse, eine mögliche Schlüsseltechnologie für die Zukunft darstellt. Diese wird in anderen Szenarien ebenfalls betrachtet und daher soll auch hier die Möglichkeit bestehen, Wärmepumpen einzubinden.

3.2 Daten und Parametrisierung des Industriesektors

Neben der grundlegenden Modellstruktur ist auch die korrekte Definition der Daten wichtig. Alle verwendeten Datenquellen, sowie die Berechnungen und getroffenen Annahmen werden nachfolgend erläutert, wobei die resultierenden Modelldaten hier nur in Auszügen gezeigt werden. Alle Daten des Modells können der beiliegenden *Input Data* Datei in Anhang 2 entnommen werden.

Das Jahr 2018 stellt das Basisjahr der Parametrisierung dar und ist damit das Bezugsjahr für die Fortschreibung der Szenariendaten sowie für die spätere Kalibrierung des Modells in Kapitel 3.4. Die Szenarienjahre werden ab 2020 in Fünfjahresschritten bis 2050 parametrisiert.

Als statistische Grundlage dienen dieser Arbeit die internationalen Statistiken der IEA aus den Jahren 2005 [32], 2010 [33], 2015 [34], 2017 [35], 2018 [36] und 2019 [37] sowie die nationale Statistik der AGEB aus dem Jahr 2018 [38].

3.2.1 Definition und Klassifikation der Energieträger

Die Ergebnisse des Modells sollen Endenergiebedarfe darstellen, die sich auf unterschiedliche Energieträger beziehen. Dementsprechend ist die Festlegung dieser Energieträger, auf die sich die Daten und Gleichungen beziehen, Grundlage der Parametrisierung. Aus diesem Grund folgen eine kurze Einführung sowie die Definition der verwendeten Energieträger.

Energieträger werden definiert als Substanzen, die Energie beinhalten und transportieren und durch unterschiedliche Umwandlungsprozesse in nutzbare Endenergie umgewandelt werden können. Dafür werden Energieträger entsprechend ihres Umwandlungsgrades eingeteilt und kategorisiert. Diese Kategorisierung ist wichtig, da verschiedene Energieträger nur sinnvoll miteinander verglichen werden können, wenn der entsprechende Umwandlungsgrad berücksichtigt wird. Grund hierfür ist, dass jede Umwandlung mit Verlusten behaftet ist. Auch die stoffliche Nutzung von Energieträgern, z.B. für die Kunststoffherstellung, muss in einer Gesamtbilanz beachtet werden [39].

Eingeteilt werden die Energieträger, bzw. die zugehörigen Energien in Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie. Die Einteilung und die Zusammenhänge sind in Abbildung 3.4 zu sehen [39].

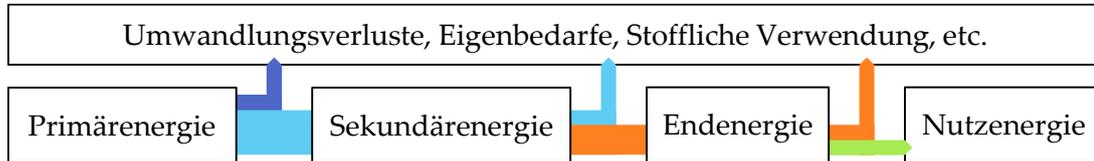


Abbildung 3.4: Einteilung von Energien und deren Zusammenhänge
Abbildung adaptiert von [39]

Energieträger, die noch keine Umwandlungsprozesse durchlaufen haben, werden Primärenergieträger genannt. Diese kommen direkt in der Natur vor und können aus entsprechenden Vorkommen, wie beispielsweise Kohleflözen, gewonnen werden. Zu Primärenergieträgern gehören die fossilen Brennstoffe wie Kohle, Erdgas, Erdöl und Uran, aber auch die erneuerbaren Energien: Wind-, Wasser- und Sonnenenergie. [39]

Viele Primärenergieträger müssen für den Verwendungszweck umgewandelt werden, um den Transport, die Nutzung oder auch die Speicherung des Energieträgers zu erleichtern. Durch erste Umwandlungen von Primärenergieträgern entstehen dann Sekundärenergieträger. Dazu zählen z.B. fossile Kraftstoffe, Heizöl, Koks, Wasserstoff aber auch Strom, der üblicherweise durch einen Mix verschiedener Umwandlungsprozesse erzeugt wird [39].

Als Endenergie wird die Energie bezeichnet, die vom Endverbraucher für die Umwandlung in Nutzenergie verwendet wird. Sie resultiert aus Sekundär- und Primärenergie abzüglich aller Verluste. Beispiele hierfür sind Strom, Fernwärme, Benzin oder auch Wasserstoff [39].

Die Nutzenergie ist schlussendlich die Energie, die nach der letzten Umwandlung übrig bleibt und für die Erfüllung der Bedürfnisse des Verbrauchers eingesetzt wird. Darunter fällt z.B. Licht, Wärme, Kälte oder mechanische Energie [39].

Durch die vielen möglichen Umwandlungsschritte und -prozesse gibt es auch viele verschiedene Energieträger, die in einer Bilanz betrachtet werden müssen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, Energieträger auf den entsprechenden Primärenergieträger zurückzuführen, damit auch die Umwandlungsverluste nicht vernachlässigt werden.

Allerdings ist es nicht immer möglich und zielführend, da beispielsweise die gesetzten Systemgrenzen dies nicht zulassen oder die explizite Bilanzierung eines Sekundärenergieträgers gefordert ist. In solchen Fällen wird eine Kategorisierung der Energieträger vorgenommen, um ähnliche Energieträger zusammenzufassen.

Als internationaler Standard gilt hierfür die Klassifikation *Standard International Energy Product Classification* (SIEC) aus den *International Recommendations for Energy Statistics* (IRES). Diese umfasst eine mehrstufige Unterteilung der Energieträger, die in Energiestatistiken bilanziert werden. Idealerweise sollte diese international eingehalten werden, um die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Studien zu verbessern [29].

Die im Rahmen dieser Arbeit gewählte Einteilung der Energieträger stimmt weitestgehend mit der vorgestellten Standard Klassifikation der UN (SIEC) überein. Abweichungen werden nachfolgend erläutert. Um die Bilanz und das Modell schlank zu halten, werden alle betrachteten Energieträger wie in Tabelle 3.1 entsprechend zusammengefasst. Dabei werden nur die industrierelevanten Energieträger berücksichtigt, die aus den drei aktuellsten internationalen Statistiken der IEA von 2017, 2018 und 2019 hervorgehen [35][36][37].

Im Wesentlichen sind auch die Energieträger von AGEB für Statistiken ab 2000 gleich zusammengefasst [7]. Eine Vergleichbarkeit zwischen dieser Arbeit, der IEA Statistik und der AGEB Statistik ist auf Basis der Energieträger hiermit gegeben.

Darüber hinaus sind im Stahlsektor zusätzliche Energieträger für die Prozessgase notwendig: Diese sind *CO Gas* für die Abgase aus dem Koksofen, *BF Gas* für die Abgase aus dem Hochofen, *BOF Gas* für die Abgase aus dem Sauerstoffblaskonverter und *Steam* als generelles Prozessgas. In der SIEC werden diese Prozessgase nicht separat aufgeführt, sondern den Kohle Produkten zugewiesen.

Ein Spezialfall stellt die Biomasse dar. Hier werden alle Energieträger aggregiert, die in der Gesamtbetrachtung mit einem Netto CO₂-Ausstoß von Null betrachtet werden. Dabei wird die Annahme getroffen, dass alle Emissionen, die durch die Nutzung der Biomasse ausgestoßen werden, in der Entstehung organisch gebunden werden. Dies führt allerdings dazu, dass die Vorkettenemissionen sehr viel stärker ins Gewicht fallen und in der Gesamtbetrachtung nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Die Industrie

schließt diese Vorkette aus den Systemgrenzen aus, weshalb es zwingend notwendig ist, die Vorkettenprozesse zusammen mit den entsprechenden Emissionen in der Gesamtbetrachtung abzubilden. Um trotzdem die Möglichkeit einer spezifischen Bilanzierung der Emissionen aus Biomasse zu haben, werden die Emissionen in der Modellierung als biogenes CO₂ speziell aufgeführt (siehe Kapitel 3.2.4 und 3.3.2).

Relevante Energieträger für die Industrie:	Aggregierte Energieträger:
Anthracite	Hard Coal
Coking Coal	
Other bituminous coal	
Industrial waste	Waste
Municipal waste (non-renewable)	
Lignite	Lignite
BKB/peat briquettes	
Coke oven coke	Coke
Natural Gas	Natural Gas
Municipal waste (renewable)	Biomass
Primary solid biofuels	
Biogases	
Biogasoline	
Biodiesels	
Other liquid biofuels	
Refinery gas	Mineral Oil Products
Liquefied petroleum gases (LPG)	
Motor gasoline	
Gas/diesel oil	
Fuel oil	
Petroleum coke	
Non-specified oil products	
	Solarthermal
	Electricity
	Hydrogen
	District Heat
	Energy For HP
	Geothermal

Tabelle 3.1: Verwendete Energieträger und deren Aggregation

Waste als Energieträger wird hier aufgeteilt in erneuerbar und nicht erneuerbar und unterscheidet sich damit auch von der Klassifikation der SIEC. Der erneuerbare Müll wird der Biomasse zugeschrieben, weil auch dabei die Netto Emissionen von Null angenommen werden. Der nicht erneuerbare Müll wird als eigene Kategorie gelistet.

Wärme als Energieträger wird hier auf Fernwärme (*District Heat*) begrenzt. Andere Formen der Wärme, wie Nahwärme oder Abwärme bleiben davon unberührt. Prozessintern generierte Wärme, wie sie beispielsweise interne KWK produziert (siehe BF/BOF

Route), soll auch nicht als Energieträger geführt werden. Diese Wärme wird direkt innerhalb des Prozesses verrechnet und mindert lediglich die Gesamtmenge an Prozesswärme, die generiert werden muss.

Speziell für die Modellierung von Wärmepumpen ist der Energieträger *Energy For HP* als Hilfsgröße von Nöten, der die Energiemenge angibt, die für Wärmepumpen als Eingangsgröße dienen. Dieser Wert wird in Kapitel 3.3.2 im Gleichungssystem von LENS in die verschiedenen anderen Energieträger umgewandelt.

Nach der oben vorgenommenen Aggregation werden verschiedene Arten von Energieträgern zusammengefasst. Dies führt dazu, dass Sekundär- und Primärenergieträger verglichen werden. Dieses Modell stellt durch die definierten Systemgrenzen allerdings nur einen Teilbereich des Gesamtenergiesystems dar, weshalb alle Energieträger, die für die Industrie als Eingang dienen, auf gleicher Ebene betrachtet werden können. Die Rückrechnung auf die jeweiligen Primärenergieträger muss in der Gesamtbetrachtung vorgenommen werden.

3.2.2 Parametrisierung der Top-Down Bereiche des Modells

Die verwendeten Datenquellen zur Parametrisierung der *Top-Down* Bereiche des Modells können Tabelle 3.2 entnommen werden.

Sektor	Anwendung	Daten	Datenquelle
Industrie	Ökonomie	BIP	[24][40][41]
Rest der Industrie	Prozessenergie	Wirkungsgrade	[17][25][42]
Industrie	Mech. Energie	Endenergiebedarf	[17][25][42]
Gebäudeenergie	Raumwärme, Warm-	Nutzenergiebedarf	[17]
	wasser, IKT, Beleuch-	Marktanteile	[17][25][42]
	tung, Raumkälte	Wirkungsgrade	[17][25][42]

Tabelle 3.2: Übersicht der verwendeten Daten und deren Quellen in den Top-Down Modellbereichen

Die Daten des Nutzenergiebedarfs für die Gebäudeenergie werden von Simon et al. [17] übernommen und in den Szenarienjahren über die Abnahme der Energieintensität definiert. Für die Auslegung der zukünftigen Nutzenergiebedarfe wird als Orientierung der Zielwert aus Simon et al. [17] herangezogen und die jährliche Änderung der

Energieintensität so angenommen, dass etwa ein konstanter Rückgang mit Erreichen des Zielwertes resultiert. Das Ergebnis dessen ist ein angenommener Rückgang für *Raumwärme und Warmwasser* von 1% bis 2020 und von da an bis 2050 konstant 2%. Für *IKT, Beleuchtung und Raumkälte* wird bis 2020 eine Zunahme der Energieintensität von 2% angenommen. Von 2020 bis 2050 wird ein jährlicher Rückgang von 1% angenommen.

Darüber hinaus basieren sowohl die Marktanteile als auch die Wirkungsgrade, einschließlich des COP (= *Coefficient of Performance*) für die Wärmepumpen, auf den Daten von Fette et al. [25] und Nitsch et al. [42] und werden an die Aggregation der Energieanwendungen angepasst.

Für den Subsektor *Rest der Industrie* ist der Basiswert für die mechanische Energie der Endenergiebedarf der gesamten Industrie aus Simon et al. [17]. Davon wird der Endenergiebedarf für die Stahlindustrie aus den Anwendungsbilanzen abgezogen [23]. Hieraus ergibt sich der Wert für 2018. Für 2020 wird eine Zunahme der Energieintensität von 1% angenommen, wodurch eine leichte Minderung des Endenergiebedarfs erreicht wird. Für die restlichen Jahre wird eine konstante Abnahme um 2% angenommen. Die Technologiemarktanteile für mechanische Energie werden ebenso aus Simon et al. [17] und den Referenzquellen Fette et al. [25] und Nitsch et al. [42] übernommen und angepasst. Es folgt ein Abzug des Strombedarfs aus der Stahlindustrie und dementsprechend die Neuvergabe der Marktanteile.

Die Definition des Nutzenergiebedarfs für die Prozessenergie des Subsektors *Rest der Industrie* ergibt sich schließlich aus der Differenz der Gesamtprozessenergie und aller Prozessenergien der modellierten Subsektoren. In diesem Fall wird der Basiswert aus Simon et al. [17] entnommen und die Prozessenergie der Stahlindustrie davon abgezogen. Diese resultiert aus den einzelnen Endenergiebedarfen der modellierten Prozesse, welche mit den Wirkungsgraden der Gesamtindustrie aus Simon et al. [17] verrechnet werden. Daraus ergibt sich für jeden Energieträger ein Nutzenergiebedarf, dessen Summe vom oben genannten Basiswert abgezogen wird. Das Resultat ist der Nutzenergiebedarf des Subsektors *Rest der Industrie*.

Für die Szenarienjahre wird eine jährliche Abnahme der Energieintensität von 1% bis 2020 angesetzt, um eine leichte Minderung des Nutzenergiebedarfs zu erreichen. Zur

Fortführung dieses Trends wird für die restlichen Jahre bis 2050 eine jährliche Abnahme der Energieintensität von 2,5% angenommen.

► *Bestimmung der Daten für das Bruttoinlandsprodukt*

Der historische Verlauf des BIP sowie dessen Prognose ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Die abgebildeten Daten beziehen sich dabei auf das Preisniveau von 2018. Die hierfür verwendeten Daten stammen aus der Statistik des BMWi [40] sowie dem deutschen *integrierten nationalen Energie- und Klimaplan* (NECP) [41] und dessen Hintergrundstudie [24].

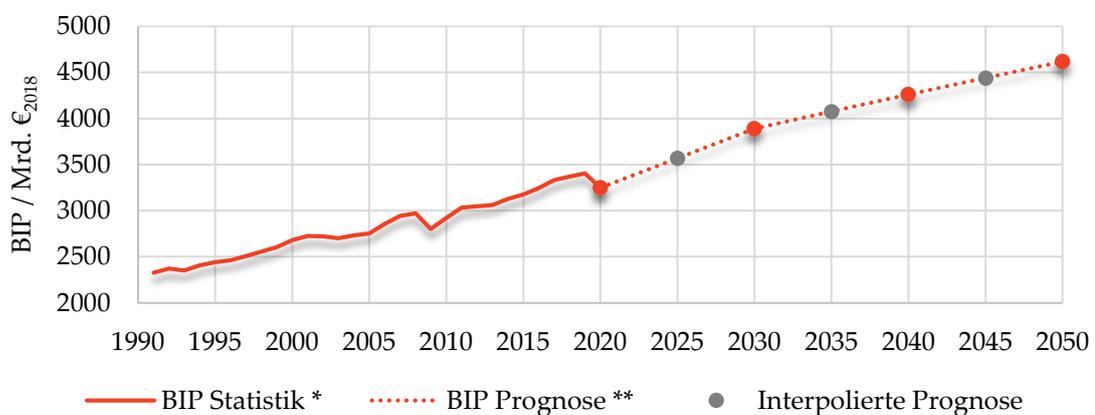


Abbildung 3.5: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) von 2000 bis 2050
* [40] ** [24]

Im Modell sind die Daten der Szenarienjahren und des Jahres 2018 wie abgebildet eingebunden. Die Daten der Jahre 2025, 2035 und 2045 wurden jeweils durch eine lineare Interpolation zwischen den zwei angrenzenden Datenpunkten aus der angegebenen Quelle errechnet.

3.2.3 Parametrisierung der Bottom-Up Bereiche des Modells

Die Prozessdaten der Stahlindustrie und der Umwandlungsprozesse werden den in Tabelle 3.3 aufgeführten Quellen entnommen. Die darin verwendeten Prozessdaten sind identisch zu den Quelldaten in Harpprecht et al. [8]. Im Modell werden die Daten entsprechend aufbereitet und normiert, sodass für jeden Prozess eine Stoff- und Energiebilanz resultiert, die als Basiswert für das Jahr 2018 dient. Für die Szenarienjahren werden diese Werte konstant fortgeführt.

Sektor	Anwendung	Daten	Datenquelle
Eisen und Stahl	Prozessenergie	Produktionsmengen	[43][44][45]
		BF/BOF	[46][47][48][49]
		BF/BOF/CCS	[50] [51]
		NG/DRI/EAF	[47] [8]
	Mech. Energie	H2/DRI/EAF	[52] [53] [54] [47]
		EW/EAF	[55] [54] [47]
		Scrap/EAF	[47] [8]
Umwand- lungs- energie	KWK	Endenergiebedarf	[23]
		Stromerzeugung	[17]
		Marktanteile	[17][25][42]
	Prozessenergie	Wirkungsgrade	[17][25][42]
		Prozessdaten	[8][46][47]

Tabelle 3.3: Übersicht der verwendeten Daten und deren Quellen in den Bottom-Up Modellbereichen

Der Anteil mechanischer Energie innerhalb des Subsektors *Eisen und Stahl* wird basierend auf dem Endenergiebedarf des Jahres 2018 aus der Anwendungsbilanz zur AGEB Statistik [23] entnommen. Basierend darauf wird eine etwa konstante Entwicklung angenommen, die durch eine jährliche Zunahme der Energieintensität um 1,8% bis 2020 und von da an mit einer konstanten jährlichen Abnahme von 1% modelliert wird. Da innerhalb des Subsektors nur der Stromanteil der mechanischen Energie betrachtet wird, entfällt die Angabe der Marktanteile.

► Festlegung der Produktionsmengen

Für die Produktionsmengen der Prozesse der *Bottom-Up* modellierten Bereiche des Modells, in diesem Fall des definierten Subsektors *Eisen und Stahl*, werden die statistischen Daten der Jahre 1990 bis 2020 herangezogen und in Abbildung 3.6 visualisiert [43][44]. Aus den statistischen Daten wird der Trend bis 2050 fortgeschrieben. Die Stahlproduktion ist im Trend nahezu konstant, trotz kurzfristig großen Schwankungen [45]. Auch die Produktionsmengen der Zement-, Chemie- und Papierindustrie sind hier mit abgebildet, da sie wichtige Subsektoren der Industrie darstellen [56][57][58][59][60].

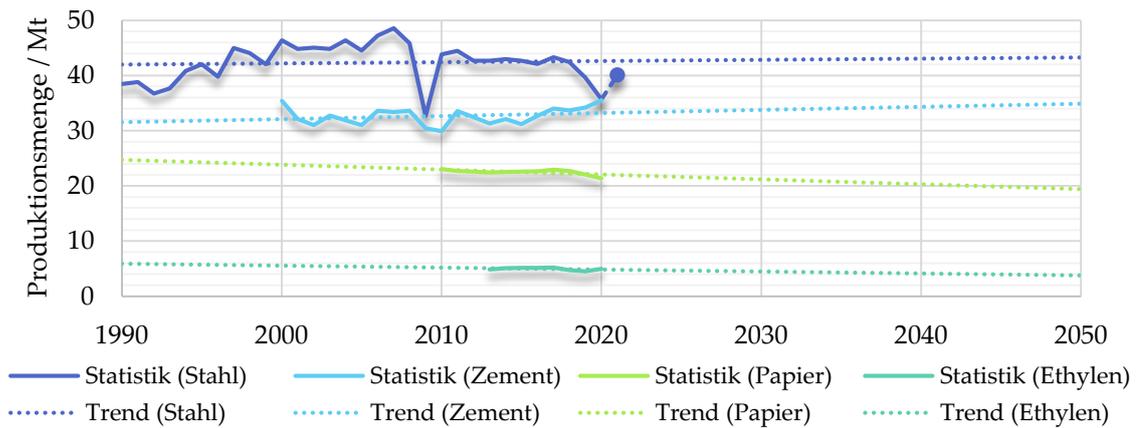


Abbildung 3.6: Produktionsmengen der energieintensivsten Subsektoren und deren zukünftige Trends

Für die Stahlproduktion werden die Produktionsmengen der historischen Jahre den entsprechenden Daten aus der Statistik entnommen. Für die Szenarienjahren wird die mittlere Produktionsmenge der letzten 30 Jahre mit 42,514 Mt angesetzt und diese konstant fortgeführt bis 2050. Damit wird hier keine Zu- oder Abnahme der Produktionsmenge angenommen. Der Wert unterscheidet sich leicht von dem in der Arbeit von Harpprecht et al. [8], in der von einer konstanten Stahlproduktion von 42,4 Mt (Fortführung des Wertes aus 2018) ausgegangen wird.

Diese Annahme kann auch gut in vergleichbare Arbeiten eingeordnet werden, in welchen ebenso konstante Verläufe bis leichte Zu- oder Abnahmen der Produktionsmengen angesetzt werden [6][14][24].

► **Produktionsmengen und Marktabdeckungen der Umwandlungsprozesse**

Für den Prozess *Coke Oven* wird für 2018 eine prozentuale Abdeckung des nationalen Koksbedarfs von 93% und für 2020 von 94% angenommen. Damit wird eine leichte Unterproduktion abgebildet, wie sie sowohl aus der nationalen als auch aus der internationalen Statistik hervor geht [36][38]. Ab 2025 wird eine vollständige Abdeckung angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die vorhandene CO-Kapazität in Deutschland weiterhin genutzt wird, auch wenn die BF Kapazität langsam heruntergefahren wird. Damit sinkt der Koksbedarf, wobei gleichzeitig die nationale Produktionskapazität konstant bleibt. Daraus resultiert ein steigender nationaler Produktionsanteil. Eine Überproduktion hingegen wird nicht betrachtet, da ab einer 100% Abdeckung auch von einer sukzessiven Abschaltung nicht benötigter Koksöfen ausgegangen wird.

Für die Prozessdaten des Elektrolyseprozesses wird nach Harpprecht et al. [8] ein Wirkungsgrad von 74% angenommen. Für eine erste Abschätzung wird eine vollständig nationale Wasserstoffproduktion angenommen, die sich konstant auf 50% subsektorinterne und 50% industriezentrale Produktion aufteilt.

Die Sinter- und Pelletproduktion wird entsprechend der Daten aus Remus et al. [46] parametrisiert. Da auch hier bislang keine fundierten Importanteile vorliegen, wird ebenfalls von einer vollständig nationalen Abdeckung ausgegangen.

Im Fall der übergeordnete Industrie-KWK entspricht die vorgegebene Produktionsmenge der Stromproduktion, welche aus Simon et al. [17] entnommen wird. Von diesem Wert wird die Stromproduktion der bereits modellierten prozessinternen KWK der Stahlindustrie abgezogen. Die übrige Restmenge der Stromerzeugung wird durch die Angabe der Technologiemarktanteile, die Stromkennzahlen und die Wirkungsgrade aus Fette et al. [25] und Nitsch et al. [42] ergänzt. Die Marktanteile werden an die neuen Gegebenheiten angepasst. Die Stromkennzahlen, sowie die Wirkungsgrade der KWK Anlagen bleiben unverändert.

3.2.4 Daten für die Ermittlung der CO₂-Emissionen

Übergeordnetes Ziel der Szenarien ist die Reduktion von CO₂-Emissionen, wie zu Beginn beschrieben. Für die entsprechende Auswertung der CO₂-Emissionen aus dem Industriesektor werden die Angaben der prozessbedingten und energiebedingten Emissionen benötigt. Prozessbedingte Emissionen können einem Prozess direkt zugeordnet werden, da sie zum Beispiel durch Reduktionsprozesse oder die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen. Die energiebedingten Emissionen dagegen entstehen durch die Nutzung bzw. Umwandlung von Energieträgern [20].

Für die prozessbedingten Emissionen des Subsektors *Eisen und Stahl* wird auf die Daten von Remus et al. [46] und Otto et al. [61] und die Berechnungen von Harpprecht et al. [8] zurückgegriffen. Daraus ergeben sich die folgenden prozessbedingten Emissionen:

- BF: 0,0112 t CO₂/t Roheisen
- BOF: 0,0211 t CO₂/t Rohstahl

- EAF: 0,084 t CO₂/t Rohstahl

Diese Daten werden in den jeweiligen Prozessen direkt hinterlegt und ergeben in den Ergebnisdaten den Anteil der prozessbedingten Emissionen.

Die Berechnung der energiebedingten Emissionen basiert auf der Anwendung der *Tier 1-Methode* für die Ermittlung der CO₂-Emissionen nach IRES [29]. Dies bedeutet, die Verrechnung der jeweiligen umgesetzten Energieträgermengen mit dessen gemitteltem Emissionsfaktor. Daher wird die korrekte Angabe von Emissionsfaktoren benötigt, die sich auf die in Kapitel 3.2.1 definierten Energieträger beziehen. Die dabei vorgenommene Aggregation hat Einfluss auf die Emissionsfaktoren, da die Methode der Mittelwertbildung innerhalb einer Energieträgerkategorie zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Hierbei können verschiedene Ansätze verfolgt werden, wie die Annahme eines Worst-Case Emissionsfaktors jeder Kategorie oder die Wahl des Emissionsfaktors in einer Kategorie, dessen Energieträger den größten Anteil hat. Die hier gewählte Methode umfasst die Ermittlung des Emissionsfaktors aus dem gewichteten Mittel einer Kategorie nach Formel (3.3). Hierbei werden alle Energieträger in einer Kategorie betrachtet und deren Emissionsfaktoren entsprechend des zugehörigen FED aus der Statistik gewichtet. Das Mittel daraus ergibt den Emissionsfaktor der Kategorie. Dies hat den Vorteil, dass kein Energieträger außer Acht gelassen wird, aber auch die starken Unterschiede in der eigentlichen Nutzung der Energieträger miteinbezogen werden. Dadurch entsteht ein Emissionsfaktor, der mehr zu Lasten der intensiver genutzten Energieträger ausfällt und so die Realität möglichst exakt widerspiegelt.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_i (\varepsilon_i \cdot FED_i)}{\sum_i FED_i} \quad (3.3)$$

Die Einzelemissionsfaktoren entstammen der CO₂-Emissionsfaktoren Auflistung des Umwelt Bundesamtes [62]. Passend dazu wird der FED aus der internationalen Statistik der IEA des entsprechenden Jahres entnommen. Für das Jahr 2018 sind die Daten in Tabelle 3.4 dargestellt. Dabei werden einige Annahmen getroffen, die entsprechend kenntlich gemacht sind.

Relevante Energieträger für die Industrie:	ε_i / tCO ₂ /TJ [62]	FED_i 2018 / TJ [36]	Aggregierte Energieträger:	$\bar{\varepsilon}$ / tCO ₂ /TJ
Anthracite	93,1	19721		
Coking Coal	93,1 ¹	356700	Hard Coal	93,1
Other bituminous coal	93,1 ¹	187917		
Industrial waste	71,1	30955		
Municipal waste (non-renewable)	91,5	21157	Waste	79,4
Lignite	106,4	11697		
BKB/peat briquettes	99	64166	Lignite	100,2
Coke oven coke	108,1	17189	Coke	108,1
Natural Gas	55,7	844454	Natural Gas	55,7
Municipal waste (renewable)	91,5 ²	21157		
Primary solid biofuels	90,1 ³	88280		
Biogases	90,6	2743		
Biogasoline	71,6	133	Biomass	89,9
Biodiesels	70,8	1964		
Other liquid biofuels	71,2 ⁴	530		
Refinery gas	70,4	13810		
Liquefied petroleum gases (LPG)	66,3	3174		
Motor gasoline	73,3	3036		
Gas/diesel oil	74	79875	Mineral Oil Products	78,2
Fuel oil	80	30440		
Petroleum coke	104	16416		
Non-specified oil products	80,4	8360		

Tabelle 3.4: Zuordnung der Emissionsfaktoren zu den aggregierten Energieträgern

¹ Annahme: Emissionsfaktor = Hard Coal, ² Annahme: Emissionsfaktor = Municipal waste (non-renewable), ³ Mittelwert aller solid biofuels in den Quelldaten, ⁴ Annahme: Emissionsfaktor = Mittelwert aus Biodiesel und Biogasoline

Für die Prozessgase werden keine Emissionsfaktoren benötigt, da diese durch die Umwandlung des Energieträgers bereits miteinbezogen werden. Solarthermie und Wasserstoff wird darüber hinaus ein Emissionsfaktor von 0 zugeschrieben, da von rein erneuerbaren Energien ausgegangen wird. Mögliche Substitutionsprozesse von verschiedenen Wasserstoffarten werden hier nicht betrachtet.

Die errechneten Emissionsfaktoren des Jahres 2018 werden in den Szenarien konstant fortgeschrieben. In Abbildung 3.7 ist die Aufstellung der ermittelten Emissionsfaktoren der letzten Jahre dargestellt, woraus weitestgehend konstante Verläufe hervor gehen. Die leichten Zu- und Abnahmen, die beispielsweise in *Waste* ersichtlich sind, werden vernachlässigt, zumal sich diese auf Änderungen in der Statistik zurückführen lassen.

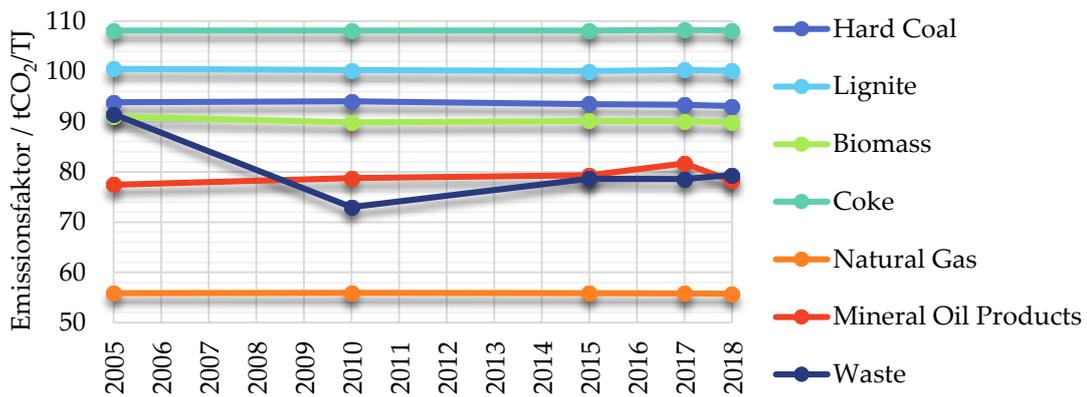


Abbildung 3.7: Verlauf der gemittelten Emissionsfaktoren in den letzten Jahren

Alternativ zum Emissionsfaktor kann für *Waste* auch ein sogenannter Substitutionsfaktor angenommen werden. Dieser gibt an, wie viel fossile Brennstoffe durch den Einsatz von *Waste* ersetzt werden. Bei einer genaueren Betrachtung des *Waste* in nachfolgenden Arbeiten sollte dies untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird aber der Emissionsfaktor angenommen.

Der Emissionsfaktor des Stroms verhält sich, im Gegensatz zu den bisher betrachteten Brennstoffen, nicht konstant. Dieses Verhalten lässt sich auf die Abhängigkeit des Stroms als Energieträger auf dessen Strommix und den damit verbundenen Herstellungsprozessen zurückführen. Da in Zukunft deutlich mehr regenerative Energiequellen genutzt werden sollen und fossile Energieträger wie Kohle und Gas verstärkt substituiert werden, nimmt der Emissionsfaktor des Stroms stetig ab. Aus der Literatur lässt sich bis 2050 in Fünfjahresschritten je eine Minimum- und Maximumprognose entnehmen, die in Tabelle 3.5 links zu sehen sind [8][63]. Daraus lässt sich ein Mittelwert berechnen, der nachfolgend für die Modellierung verwendet werden soll.

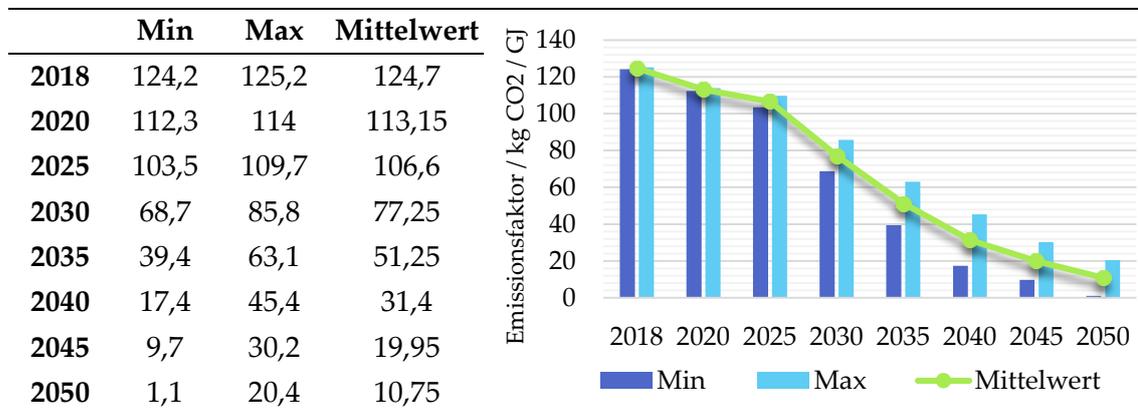


Tabelle 3.5: Emissionsfaktoren des Stroms in kg CO₂/GJ

Die historischen Daten des Emissionsfaktors für Strom werden der Statistik des Umweltbundesamtes entnommen [64].

3.3 Implementierung des Modells im Framework LENS

Für die Abbildung des definierten Modells und die Erstellung der Energieszenarien wird eine geeignete Software benötigt. Die in dieser Arbeit eingesetzte Software ist der Szenariengenerator LENS in Verbindung mit Microsoft Excel (Version *Professional Plus 2019*). LENS wird seit Mitte 2020 am DLR als OpenSource Software auf Basis eines Python Skriptes entwickelt und soll in dieser Arbeit erstmals Anwendung finden. Das Ziel von LENS ist die Berechnung der Endenergiebedarfe und Aufstellung der Energiebilanzen für das gesamte Industriemodell über den definierten Zeithorizont. Dazu wird in LENS ein Energiemodell basierend auf den Definitionen der vorangegangenen Kapitel abgebildet, welches die entsprechenden Systemzusammenhänge enthält. Diese Software wird demnach genutzt, um die Prozesse in den Industriesektoren abzubilden und deren Energiebedarf zu bilanzieren. Die daraus resultierenden quantitativen Szenarien können entsprechend der Definitionen in Kapitel 2 sowohl als *backcasting* als auch *forecasting* Szenarien ausgelegt werden.

Die allgemeine Funktionsweise von LENS ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Für die Berechnung der Szenarien werden demnach zwei Dateien benötigt, die vom Nutzer erstellt und LENS zur Verfügung gestellt werden müssen. Dabei handelt es sich um die *Input Data* Datei, welche die Eingangsdaten des Modells enthält, und die *Model* Datei, die das Gleichungssystem des Modells enthält. Detaillierte inhaltliche Beschreibungen der LENS Dateien folgen in Kapitel 3.3.1 bis 3.3.3. Beide Dateien werden LENS durch Kopieren in das entsprechende Arbeitsverzeichnis zur Verfügung gestellt. Die Benennungen sowie die Pfade der Dateien werden in der *config* Datei von LENS definiert.

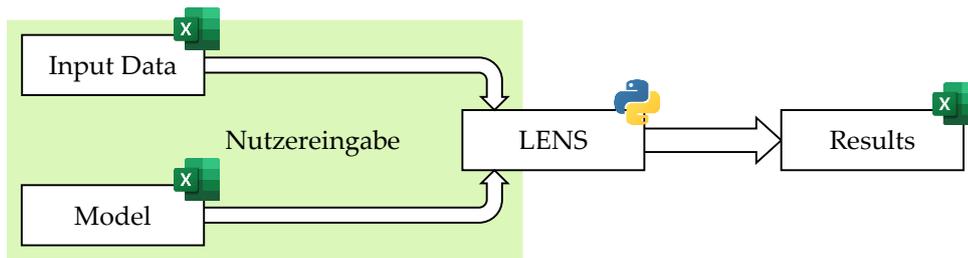


Abbildung 3.8: Allgemeine Funktionsweise von LENS

Nach Bereitstellung der Dateien und dem Starten von LENS werden die Dateiinhalte eingelesen und für die weitere Verwendung aufbereitet. Basierend auf den zwei Eingangsdateien erstellt LENS ein mathematisches Modell, das für jedes definierte Jahr des Szenarios Ergebnisse entsprechend der exogenen Größen ausgibt. Diese Ergebnisse werden zusammengefasst und von LENS in eine *Results* Datei geschrieben.

Für die Implementierung des Modells in LENS sind grundlegende Konventionen notwendig, die eine einheitliche und vergleichbare Modellerstellung garantieren. Diese werden nachfolgend erläutert und dienen in anschließenden Arbeitsschritten als Basis der Umsetzung.

► **Vorzeichenkonvention**

Für die korrekte Interpretation der Ein- und Ausgangsdaten wird eine Vorzeichenkonvention festgelegt. Im Allgemeinen gilt:

Größen mit positivem Vorzeichen stellen Eingangsgrößen dar, Größen mit negativem Vorzeichen entsprechend Ausgangsgrößen. Dies begründet sich darin, dass die Energiebedarfe später als positive Größen ausgegeben werden sollen. Wenn einem Wert durch dessen Benennung oder übergeordnete Definition bereits eine eindeutige Richtung vorgegeben wird, dann ist dieser Wert immer positiv, da ansonsten die Richtung der Größe doppelt definiert wäre.

► **Einheitenkonvention**

Einheiten sollen in dieser Arbeit konsequent mit den gleichen SI-Einheitenpräfixen verwendet werden. Nur in begründeten Ausnahmen wird davon abgewichen. Die verwendeten Einheiten werden in Tabelle 3.6 aufgelistet. Die gewählten Einheiten können oft auch in vergleichbarer Literatur wiedergefunden werden und erleichtern das

Rechnen und Vergleichen mit hochdimensionierten Werten, wie sie hier verwendet werden. Energien, besonders Strombedarfe, werden oft auch in TWh angegeben, welche hier aber grundsätzlich in die Einheit PJ umgerechnet werden.

	Einheit	SI-Präfix Wert
Energie	PJ	10 ¹⁵ J
Masse	Mt	10 ⁹ kg
CO₂-Emissionsfaktoren	kg/GJ	-
CO₂-Emissionen	Mt	10 ⁹ kg

Tabelle 3.6: Gewählte SI-Einheitenpräfixe

► Namenskonvention

Da das Modell in englischer Sprache entwickelt wird, sollen die zugehörigen Modellvariablen und -parameter auch hier englisch bezeichnet und in kursiver Darstellung als Eigenname kenntlich gemacht werden. Dadurch entstehen keine Unsicherheiten durch Übersetzungsfehler. Auch Abkürzungen beziehen sich immer auf die englische Benennung.

Die Benennung ganzer Prozessrouten wird entsprechend ihrer Hauptbestandteile gekennzeichnet und durch Schrägstriche „/“ getrennt. So wird z.B. die Hochofen Route für die Stahlerzeugung *BF/BOF* genannt und setzt sich aus den Hauptbestandteilen *BF = Blast Furnace = Hochofen* und *BOF = Basic Oxygen Furnace = Sauerstoffblaskonverter* zusammen.

Die Bezeichnung *Sektor* bezieht sich auf die erste Einteilungsebene von Energieverbrauchern in der übergeordneten Gesamtstatistik. Darunter zählt der *Energiesektor*, der *Transportsektor*, aber auch der *Industriesektor*. Die Benennung *Subsektor* bezieht sich auf die nächsttiefere Einteilungsebene. Für die Industrie zählen hier Subsektoren wie *Eisen und Stahl*, *Chemie* und *Zement* dazu.

3.3.1 Struktur und Bereitstellung der Eingangsdaten für LENS

Alle Daten, die exogen vorgegeben werden sollen und für LENS als Eingangsdaten dienen, sind Inhalt der *Input Data* Datei (siehe Anhang 2). Eine Erklärung und beispielhafte Verdeutlichung dessen folgt. Grundsätzlich ist die Datei in fünf Teile untergliedert, welche sich ebenfalls in den verschiedenen Tabellenblättern widerspiegeln, und enthält alle Schritte der Datenverarbeitung von den Rohdaten bis zu den fertigen Daten für die Übergabe.

Schritt 1 umfasst die Definition aller Variablen, sowie die Festlegung grundsätzlicher Rahmendaten wie z.B. die untersuchten Jahre und die oben beschriebenen Sektoren, Technologien und Prozesse. Die hier definierten Größen werden im gesamten Dokument referenziert und sind entsprechend von fundamentaler Bedeutung. Schritt 2 beinhaltet die Parametrisierung der in Schritt 1 definierten Größen. Hierfür werden entsprechende Felder zur Verfügung gestellt, um für Berechnungen, Annahmen und Endergebnisse sinnvolle Eintragungen machen zu können und das Vorgehen zu dokumentieren.

Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Prozessdefinition gelegt, die eine wichtige Rolle im Modell einnimmt und eine eigens entwickelte Eingabemaske besitzt. Diese ist in Abbildung 3.9 beispielhaft anhand des BF/BOF Prozesses dargestellt. Ein jeder Prozess definiert sich aus der Summe seiner Subprozesse, die jeweils explizite Einzeltechnologien und deren Bilanzen darstellen. Dabei sind die unterschiedlichen Subprozesse immer auf die Zielgröße normiert, die sich in der Abbildung rechts oben schwarz eingeraht wiederfindet. Für die Zielgröße 1 Mt Stahl im Prozess BF/BOF werden beispielsweise 0,86 Mt Roheisen aus dem Subprozess Hochofen (BF) benötigt, dessen Einzelbilanz entsprechend skaliert wird. Als Hilfestellung werden die Transfergrößen (wie Roheisen) grün formatiert, wenn der Prozess normiert ist und rot, wenn noch keine Normierung vorliegt. Die Prozess-ID, welche sich grundsätzlich links oben befindet, stellt automatisch die korrekten Referenzen zu den in Schritt 1 definierten Größen her und definiert somit das gesamte Grundgerüst des Prozesses. Diese ID ermöglicht durch dynamische Referenzierung eine einfache und schnelle Definition der Prozessdaten. Die summierten Daten des Gesamtprozesses können im Bereich der Szenario Daten in Trendverläufe überführt oder als einfache Konstante übergeben werden.

Process ID	Process specific energy/in- and outputs			Input Materials			Output Materials			Scenario data
	Amount	Unit		Amount	Unit	Amount	Unit	Amount	Unit	
836										
837	030201									
838	Energy Demand									
839	Hard Coal	4,081	PJ	Iron Ore	0,155	Mt	Steel	1,000	Mt	
840	Waste	0,000	PJ	Steel Scrap	0,221	Mt	CO ₂ (reaction related)	0,031	Mt	
841	Lignite	0,000	PJ	Iron Ore Sintered	0,935	Mt				
842	Coke	6,897	PJ	Iron Ore Pellets	0,308	Mt				
843	Natural Gas	1,500	PJ							
844	Biomass	0,000	PJ							
845	Mineral Oil Products	1,051	PJ							
846	Solarthermal	0,000	PJ							
847	Electricity	0,300	PJ							
848	Hydrogen	0,000	PJ							
849	District Heat	0,000	PJ							
850	Power for HP	0,000	PJ							
851	Geothermal	0,000	PJ							
852										
853										
854										
855										
856	Energy output		Unit							
857	Electricity (reuse)	1,006	PJ							
858	Hydrogen (reuse)	0,000	PJ							
859										
860										
861										
862	Resulting Process Energias		Unit							
863	Steam	-0,374	PJ							
864	CO Gas	1,269	PJ							
865	BF Gas	-1,142	PJ							
866	BOF Gas	-0,185	PJ							
867	Hydrogen hot	0,000	PJ							
868										
869										
870										
871										
872										
873										
874										
875										
876										
1172										

Abbildung 3.9: Allgemeine Struktur der Prozessdefinition innerhalb der „Input Data“ Datei

Grundlage aller Berechnungen sind die Rohdaten aus Kapitel 3.2, welche in Blatt 3 der Datei abgelegt werden. Jeder Wert wird in der Form, wie er in der Quelle zur Verfügung steht, eingetragen und mit der entsprechenden Quelle versehen. Die Quelle wiederum wird auf Blatt 4 der Datei eingetragen und kann von dort aus als Kurzzeichen referenziert werden.

Blatt 5 und damit der letzte Schritt der Datenvorbereitung umfasst die Schnittstelle zu LENS. Hier werden alle Daten so formatiert, dass LENS darauf zugreifen kann um sie dann zu verrechnen.

Die übergebenen Daten lassen sich inhaltlich zusammenfassen, eine Übersicht zeigt Tabelle 3.7. Dabei werden die Übergabedaten den jeweiligen Sektoren und Energieanwendungen zugeordnet.

Energieanwendung Übergabeparameter	Prozessenergie Eisen und Stahl		Prozessenergie Rest der Industrie		Mech. Energie Eisen und Stahl		Mech. Energie Rest der Industrie		Gebäudeenergie	Umwandlungsenergie KWK	Umwandlungsenergie Umwandlungsprozesse
	Produktionsmengen	x									
Marktanteile der Prozesse	x										x
Stoff-/Energieverhältnisse	x										x
Endenergiebedarf					x	x					
Nutzenergiebedarf			x						x	x	
Wirkungsgrade			x						x	x	
Marktanteile der Technologien			x		x	x	x	x	x	x	
CO ₂ -Emissionsfaktoren	x		x		x	x	x	x	x	x	x

Tabelle 3.7: Zusammenfassung aller Übergabeparameter an LENS

Durch die Eingangsdaten werden hier Szenarienjahren in Fünfjahresschritten definiert. Diese Jahre sind als Stützjahre zu betrachten, da sie mit Werten hinterlegt sind, die auf Berechnungen und Annahmen basieren. Diese sind wie beschrieben dokumentiert

und können entsprechend angepasst werden. Für die spätere Auswertung ist es allerdings von Vorteil, wenn die Szenarien nicht nur in Fünfjahresschritten, sondern in kleineren Intervallen, wie z.B. Einjahresschritten gerechnet werden. Hierfür bietet LENS eine Interpolationsfunktion der Eingangsdaten, wobei zwischen einer linearen und einer angepassten kubischen Interpolation unterschieden wird. Letztere strebt eine Interpolation zwischen zwei Punkten mit Polynomen 3. Grades an, die automatisch durch eine lineare Interpolation ersetzt wird, wenn ersteres nicht möglich ist.

3.3.2 Bereitstellung des Gleichungssystems für LENS

Inhalt der *Model* Datei (siehe Anhang 1) ist das mathematische Gerüst des Modells. Für die Berechnung der Energiebedarfe wird ein Gleichungssystem benötigt, das alle Ein- und Ausgangsgrößen enthält und angibt, in welchem physikalischen Verhältnis diese zueinander stehen.

Hierfür wird die Datei in drei Bereiche geteilt:

1. *Sectors*: Definition der Sektorhierarchie und der Zuordnung von Technologien zu Sektoren
2. *Technologies*: Definition der untersuchten Technologien
3. *Commodities*: Definition aller Stoff- und Energiegrößen

Die definierte Sektorstruktur des Industriemodells ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Von der Industrie auf oberster Ebene wird in *Building Energy*, *Conversion Energy* und die *Subsectors* aufgeteilt. Die eigentlichen Industriezweige ergeben sich eine Ebene tiefer aus den Subsektoren. An dieser Stelle wird auch das BIP auf oberster Ebene sowie die Produktionsmenge(n) auf unterster Ebene als exogene Zeitreihe eingelesen. Damit sind die zentralen Treiber der Szenarien vorgegeben. Zudem werden hier alle modellierten Prozesse den Sektoren entsprechend der Definition in Kapitel 3.1 zugeordnet.

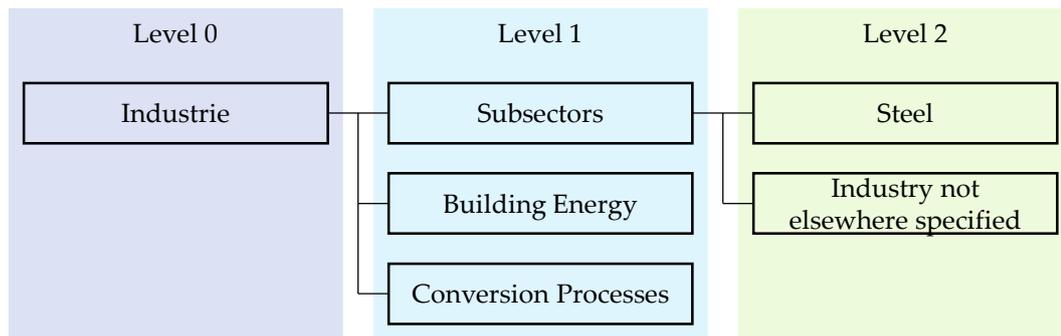


Abbildung 3.10: Sektorhierarchie des Industriemodells

Die definierten Gleichungen sind vor allem von dem Modellierungsansatz abhängig und müssen immer in impliziter Form, das heißt $\dots = 0$, geschrieben werden. Die Prozesse, die nach dem *Bottom-Up* Ansatz modelliert werden, definieren sich durch die Vorgabe der Produktionsmenge. Dies resultiert in der Berechnung der einzelnen Energiebedarfe $Demand_{ec}$ nach Gleichung (3.4) und (3.5). Dabei werden zusätzlich die Marktanteile der Prozesse und die Energie/Stoff-Verhältnisse aus den Prozessbilanzen als Parameter verrechnet. Analog werden auch die Stoffumsätze berechnet.

$$Production_t \cdot MS_{pr} - Production_{pr} = 0 \quad (3.4)$$

$$Production_{pr} \cdot ratio_{ec} - Demand_{ec} = 0 \quad (3.5)$$

Dabei gilt:

$Production_t$ = Gesamte Produktionsmenge

$Production_{pr}$ = Produktionsmenge eines Prozesses

MS_{pr} = Marktanteil eines Prozesses

$ratio_{ec}$ = Energie/Stoff-Verhältnis des Prozesses in Bezug auf einen Energieträger

$Demand_{ec}$ = Energiebedarf in Bezug auf einen Energieträger

Auch die prozessbedingten Emissionen werden analog zu Formel (3.5) berechnet, mit dem Unterschied, dass die Emission pro produzierte Einheit als *ratio* eingesetzt und das Vorzeichen umgedreht wird.

Anders verhält es sich bei den *Top-Down* modellierten Anwendungen. Hier werden die Energiebedarfe direkt aus der Nutzenergie berechnet, die hierfür nach Formel (3.6) mit den Marktanteilen der Technologien und den dazugehörigen Wirkungsgraden verrechnet wird.

$$UE_t \cdot \frac{MS_{tech}}{\eta_{tech}} - Demand_{ec} = 0 \quad (3.6)$$

Dabei gilt:

UE_t = Gesamte Nutzenergie

MS_{tech} = Marktanteil in Bezug auf eine Technologie

η_{tech} = Wirkungsgrad einer Technologie

Für die Wärmeanwendungen *Prozesswärme* und *Raumwärme/Warmwasser* wird der Einsatz der Wärmepumpe nach Formel (3.7) und (3.8) definiert. Hierfür wird die Hilfsgröße *EnergyForHP* benötigt, die den exogenen Bezug herstellt und die Summe der Einzelenergiebedarfe beschreibt. Diese sind in dieser Arbeit nur Strom und Umgebungswärme und werden durch die Verrechnung der Hilfsgröße mit der Leistungszahl der Wärmepumpe ermittelt.

$$\frac{EnergyForHP}{COP_{HP}} - P_{el} = 0 \quad (3.7)$$

$$EnergyForHP - P_{el} - Q_{amb} = 0 \quad (3.8)$$

Dabei gilt:

COP_{HP} = Leistungszahl der Wärmepumpe

P_{el} = Elektrische Leistung

Q_{amb} = Umgebungswärme

Im Fall der übergeordneten Industrie-KWK wird die Stromproduktion exogen vorgegeben und über Gleichung (3.9) mit dem Gesamtwirkungsgrad und der Stromkennzahl verrechnet, um die Einzelenergiebedarfe zu erhalten. Zudem wird über eine weitere Verrechnung der Wirkungsgrade und Stromkennzahlen die abgegebene Nutzwärme nach Formel (3.10) berechnet. Der Gesamtwirkungsgrad sowie die Stromkennzahl sind dabei immer in Bezug auf die jeweilige Technologie bzw. den dazugehörigen Energieträger zu betrachten.

$$P_{el} \cdot MS_{tech} \cdot \frac{1 + s_{tech}}{\eta_{tech} \cdot s_{tech}} - Demand_{ec} = 0 \quad (3.9)$$

$$P_{el} \cdot \frac{MS_{tech}}{S_{tech}} - \dot{Q}_{useful} = 0 \quad (3.10)$$

Dabei gilt:

s_{tech} = Stromkennzahl in Bezug auf eine Technologie

\dot{Q}_{useful} = Abgeführte Nutzwärme

Die Berechnung der energiebedingten Emissionen resultiert schließlich aus der Verrechnung der Emissionsfaktoren mit den Bedarfen der einzelnen Energieträger.

Entsprechend der definierten Gleichungen bedarf es grundsätzlich für jeden Energieträger, jeden Stoff, jede Emission und jede exogen vorgegebene Größe eine Variable. Diese werden gesammelt im dritten Bereich der *Model* Datei definiert. Darüber hinaus wird die Variable für Strom und jene für CO₂-Emissionen weiter aufgeteilt, um explizitere Auswertungen zu ermöglichen.

Strom wird aufgeteilt in die Variablen *ElectricityFromCHP* für produzierten Strom aus KWK Anlagen, *ElectricityForHP* für Strombedarfe von Wärmepumpen und *Electricity* für alle allgemeinen Anwendungen.

Die CO₂-Emissionen werden in *CO2RR* für prozessbedingte Emissionen, *CO2ER* für energiebedingte Emissionen, *CO2ERBio* für biogene energiebedingte Emissionen und *CO2CCS* für abgespaltene und gespeicherte Emissionen durch die CCS Technologie unterteilt.

3.3.3 Struktur und Bereitstellung der Ergebnisse aus LENS

LENS stellt die Ergebnisse der Szenarienberechnung nach einem erfolgreichen Durchlauf in der *Results* Datei zur Verfügung. Diese enthält in erster Linie die Ergebniswerte aller berechneter Variablen für jedes berechnete Jahre. Für Kontrollzwecke werden auch Eingangswerte erneut mit ausgegeben, dies soll hier allerdings nicht weiter beachtet werden.

Für die Auswertung relevant sind vor allem unterschiedliche Aggregationen der Ergebnisdaten. Die globale Aggregation aller Daten ergibt die Ergebnisse für die gesamte Industrie auf oberster Ebene. Auf unterster Ebene werden die Ergebnisse für jede modellierte Technologie einzeln ausgegeben und können detailliert ausgewertet

werden. Für jede dazwischen liegende Stufe werden die Daten entsprechend der angelegten Sektorhierarchie ausgegeben. So können die Daten für jeden Betrachtungsbereich individuell und ohne zusätzlichen Summationsaufwand analysiert werden.

Für jeden Aggregationsbereich wird entsprechend der definierten Gleichungen grundsätzlich Folgendes ausgegeben:

- Die energetischen Ein- und Ausgänge pro Energieträger und Jahr
- Die stofflichen Ein- und Ausgänge pro Stoff und Jahr
- Die CO₂-Emissionen für jedes Jahr

Zu beachten ist dabei, dass der modellierte Stoffumsatz auf das Wesentliche reduziert ist und nicht als vollumfänglich zu betrachten ist.

3.4 Kalibrierung des LENS-Industriemodells

Nachdem das Modell erstellt, in das Framework LENS implementiert und mit Daten parametrisiert wurde, ist der nächste wichtige Schritt die Plausibilisierung der Modellergebnisse. Zur Sicherstellung von realitätsnahen Modellergebnissen wird überprüft, ob das Modell sowohl die korrekten System- und Prozessabhängigkeiten abbildet, als auch über richtige Eingangsdaten verfügt. Hierfür wird zuerst der Modellteil des Stahlsektors und anschließend das gesamte LENS-Modell kalibriert.

3.4.1 Kalibrierung mit dem Vergleichsmodell für den Stahlsektor

Die Kalibrierung des LENS-Modells für den Subsektor *Eisen und Stahl* wird durch ein Modellvergleich durchgeführt. Hierfür werden die Ergebnisse von Harpprecht et al. [8] als Referenz herangezogen, welche bereits mit Statistiken und realen Daten abgeglichen wurden. Ein Vergleich mit den bereits aufbereiteten Daten ist daher ausreichend.

Der Vergleich umfasst vier Szenarien mit Daten für jeweils acht berechnete Jahre, die aus Harpprecht et al. [8] hervorgehen. Weiterführende Informationen zu den Szenarien kann Kapitel 4.1 entnommen werden. Das Stützjahr der Kalibrierung ist hierbei das Jahr 2018, das in den Szenarien ab 2020 in Fünfjahresschritten bis 2050 fortgeführt und parametrisiert wird.

Die Systemgrenzen, die für den Modellvergleich definiert werden, entsprechen den Systemgrenzen von Harpprecht et al. [8], da sonst keine Vergleichbarkeit gegeben ist. Dies schließt den Koksofen, die Wasserstoffproduktion, die Sinterproduktion, die Pelletproduktion und auch den Hochofen in den Stahlsektor ein. Besonders letzterer wird in den Statistiken nicht innerhalb des Stahlsektors bilanziert. Die Differenzen, die dadurch entstehen, zeigt Abbildung 3.11. Die summierten Daten von Stahlindustrie und Hochofen weisen eine bessere Deckung auf als die Einzeldaten, weshalb der Hochofen auch hier innerhalb der Systemgrenzen des Stahlsektors abgebildet wird.

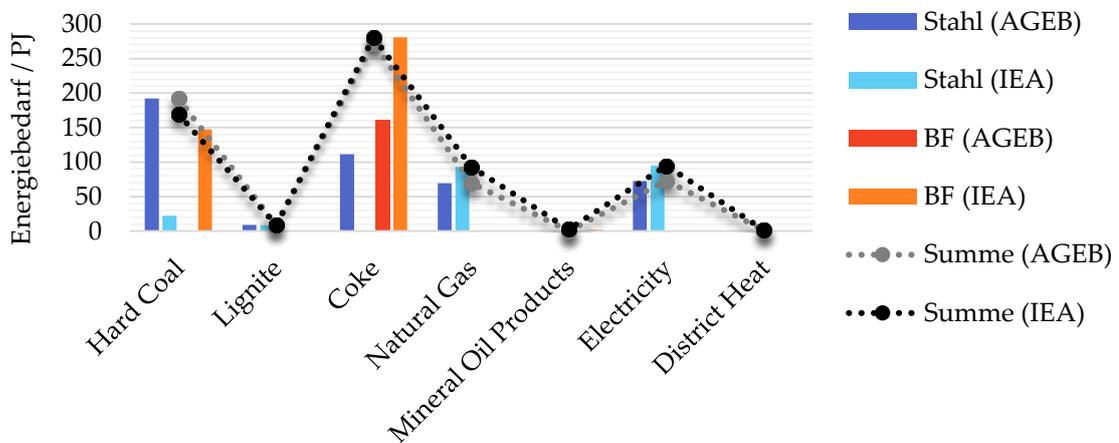


Abbildung 3.11: Gegenüberstellung der Energiebedarfe für Hochöfen und den Subsektor Eisen und Stahl nach IEA und AGEB

Für die Kalibrierung des Modells werden absolute und relative Fehler gegenüber den Daten nach Harpprecht et al. [8] genutzt. Diese werden nach Gleichung (3.11) und (3.12) berechnet und über die vier Szenarien hinweg verglichen.

$$\Delta x_i = x_i - y_i \quad (3.11)$$

$$\delta x_i = \frac{\Delta x_i}{y_i} = \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (3.12)$$

Um auch den gesamten Fehler für verschiedene Jahre und Szenarien angeben zu können, werden die Summen dieser Fehlerwerte nach Gleichung (3.13) und (3.14) gebildet. Da der absolute Fehler in Abhängigkeit der Mess- und Vergleichswerte positiv oder negativ sein kann, würde eine einfache Summierung unter Umständen zu einer gegenseitigen Aufhebung der Fehler führen. Um diesen gegenseitigen Minderungseffekten vorzubeugen, werden die Beträge der absoluten Fehler aufsummiert.

$$\Delta x = \sum_i^n |x_i - y_i| \quad (3.13)$$

$$\delta x = \frac{\sum_i^n |x_i - y_i|}{\sum_i^n y_i} \quad (3.14)$$

Das LENS-Modell für den Stahlsektor wurde solange angepasst, bis der Fehler für jeden Energieträger unter 1% liegt. In Abbildung 3.12 sind die Abweichungen zusammengefasst und pro Szenario dargestellt. Dabei ist klar zu sehen, dass die Hauptenergieträger, die auch für die Ermittlung des tatsächlichen Energiebedarfs von Bedeutung sind, sehr geringe relative Abweichungen von < 0,4 % aufweisen. Auch der relative Fehler, bezogen auf den Gesamtenergiebedarf, liegt durchgängig unter 0,4% und damit innerhalb des Zielbereichs. Etwas größere Ausschläge von teilweise > 1% sind in den Prozessenergien *Steam* und *BF-Gas* sichtbar. Diese sind auf die Prozessroute BF/BOF zurückzuführen, da die Ausschläge geringer werden, wenn der Marktanteil von BF/BOF abnimmt und vollständig verschwindet, sobald auch der Marktanteil auf Null absinkt. Gut zu erkennen ist das vor allem im Szenario *Coal Exit*. Absolut betrachtet bilden diese Abweichungen allerdings keine nennenswerten Ausschläge in Relation zu den übrigen Energieträgern ab. Gut sichtbar ist dies bei der Betrachtung des summierten relativen Fehlers der Prozessenergie. Dieser Fehler liegt deutlich unter 1% und damit relativiert sich der etwas größere Fehler in *Steam*. Aus diesen Gründen wird die Relevanz dieser Abweichung als niedrig eingestuft und nicht weiter untersucht. Der Stahlsektor ist damit durch den Vergleich mit dem Modell von Harpprecht et al. [8] und dem durchgängigen Erreichen eines Fehlers < 1% erfolgreich kalibriert.

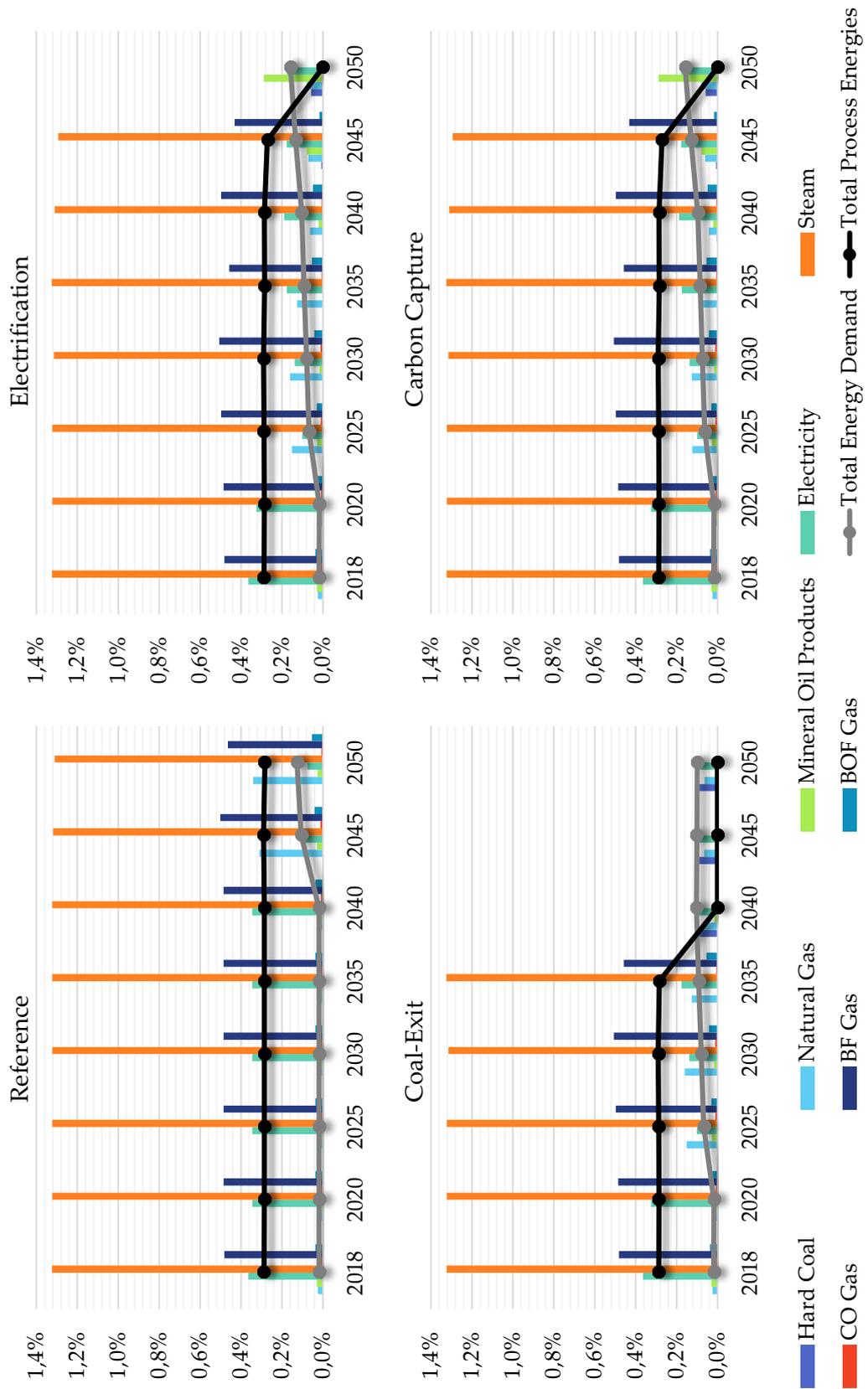


Abbildung 3.12: Relative Fehler δx pro Energieträger, Szenario und Jahr

3.4.2 Kalibrierung des Industriesektors an statistischen Daten

Um die wahrheitsgemäße Abbildung des Gesamtsystems der Industrie gewährleisten zu können, werden die Daten des LENS-Modells für die gesamte Industrie an der Statistik kalibriert. Hierfür werden sowohl die Daten der nationalen Statistik der AGEB als auch die der internationalen Statistik der IEA genutzt, um die Ergebnisse des Modells im Kalibrierungsjahr 2018 abzugleichen.

Für die Kalibrierung müssen die Systemgrenzen des LENS-Modells mit denen der Statistiken abgeglichen werden. In Abbildung 3.13 ist hierfür eine Aufstellung der Gesamtenergiebedarfe innerhalb der zwei Statistiken gezeigt. Dabei wird schrittweise die Definition der Systemgrenzen aus der Statistik variiert, bis sie im letzten Fall den Systemgrenzen des Modells gleicht.

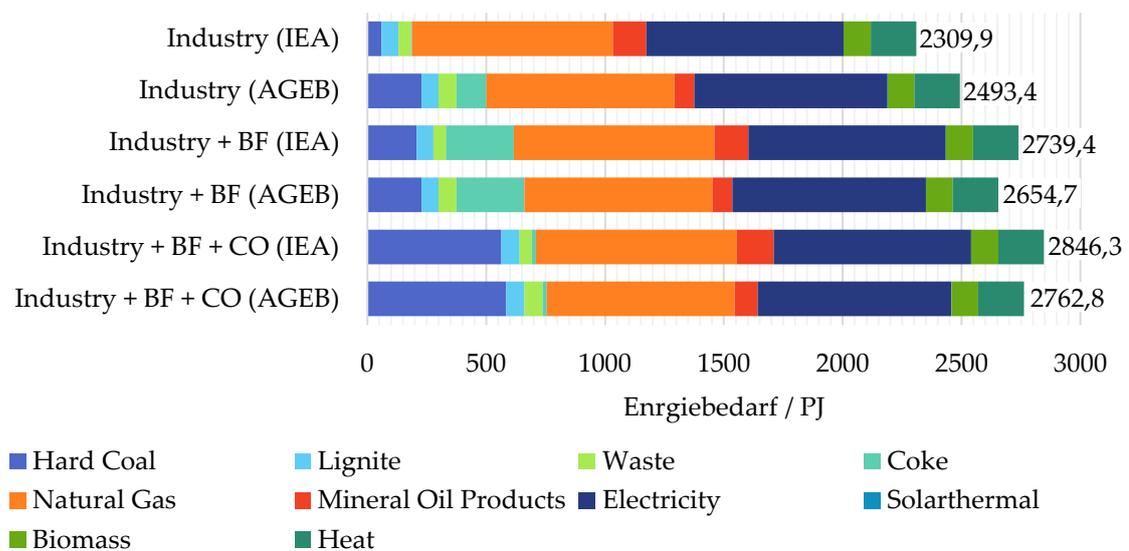


Abbildung 3.13: Aufstellung der Gesamtenergiebedarfe nach IEA und AGEB mit unterschiedlichen Systemgrenzen

Aus den beiden Statistiken wird für jeden Energieträger der zugehörige statistische Wert ermittelt und als Minimum oder Maximum eingeordnet. Die Differenz aus Min. und Max. jedes Energieträgers ergibt einen Korridor, wobei dieser um 5 % erweitert wird, um die Fehlertoleranz zu vergrößern. Ziel der Kalibrierung ist es, dass die Ergebnisdaten des LENS-Modells innerhalb der Korridore liegen und damit die Korrektheit der Daten nachgewiesen wird.

Da die Prozesse der Stahlindustrie bereits in Kapitel 3.4.1 kalibriert wurden, bedürfen diese keiner weiteren Anpassung. Auch die Modellergebnisse der übergeordneten

Industrie-KWK, der Gebäudeenergie und der mechanischen Energie werden durch einen Modellvergleich zwischen dem LENS-Modell und den Ergebnissen von Simon et al. [17] abgeglichen. Durch die Verwendung derselben Basisdaten, die hier lediglich auf andere Weise aggregiert werden, wird dabei eine vollständige Übereinstimmung der Ergebnisse erreicht. Daher ist an dieser Stelle keine weitere Anpassung notwendig.

Darüber hinaus sind allerdings Anpassungen in den Marktanteilen der Prozessenergie des Subsektors *Rest der Industrie* nötig, um die Zielkorridore zu erreichen.

Für den Energieträger *Waste* wurde in den Referenzmodellen bisher keine Einzelbetrachtung durchgeführt. In der nationalen Statistik der AGEB werden Abfälle ohne Biomasseanteil, wie sie ebenfalls in dieser Arbeit dem Energieträger *Waste* zugerechnet werden, nahezu ausschließlich in der Prozessenergie verwendet. Daher wird auch hier der Müll in der Prozessenergie verortet [23]. Es wird angenommen, dass der Bedarf dem Mittelwert der Statistiken der AGEB und IEA entspricht und der Wirkungsgrad dem von *Hard Coal* gleicht. Dieser Anteil wird teilweise von dem Bedarf für *Hard Coal* abgezogen, da hier *Waste* bisher inkludiert war. Für die Szenarienjahre wird dieser Anteil konstant fortgeführt, da keine Daten für eine Zu- oder Abnahme vorliegen. Ebenso wie für *Waste* wird auch für *Coke* die Annahme getroffen, dass der Bedarf dem Mittelwert beider Statistiken (ohne Stahlindustrie) entspricht, da auch hierfür keine Einzelbetrachtung in den Referenzmodellen vorliegt.

Die übrigen Marktanteile der Energieträger werden so lange angepasst, bis alle Ergebnisdaten innerhalb der Zielbereiche liegen. Das Ergebnis dessen zeigt Abbildung 3.14.

Die resultierenden Marktanteile des Subsektors *Rest der Industrie* für 2018 werden in den Szenarien entsprechend der Zielwerte aus Simon et al. [17] fortgeführt, wobei die Daten zwischen 2018 und 2050 linear interpoliert werden.

Zu beachten ist, dass diese Werte lediglich erste Anhaltswerte für die Parametrisierung darstellen sollen. Eine tiefgehende Analyse ist im Anschluss an diese Arbeit empfohlen, um exaktere Werte zu definieren.

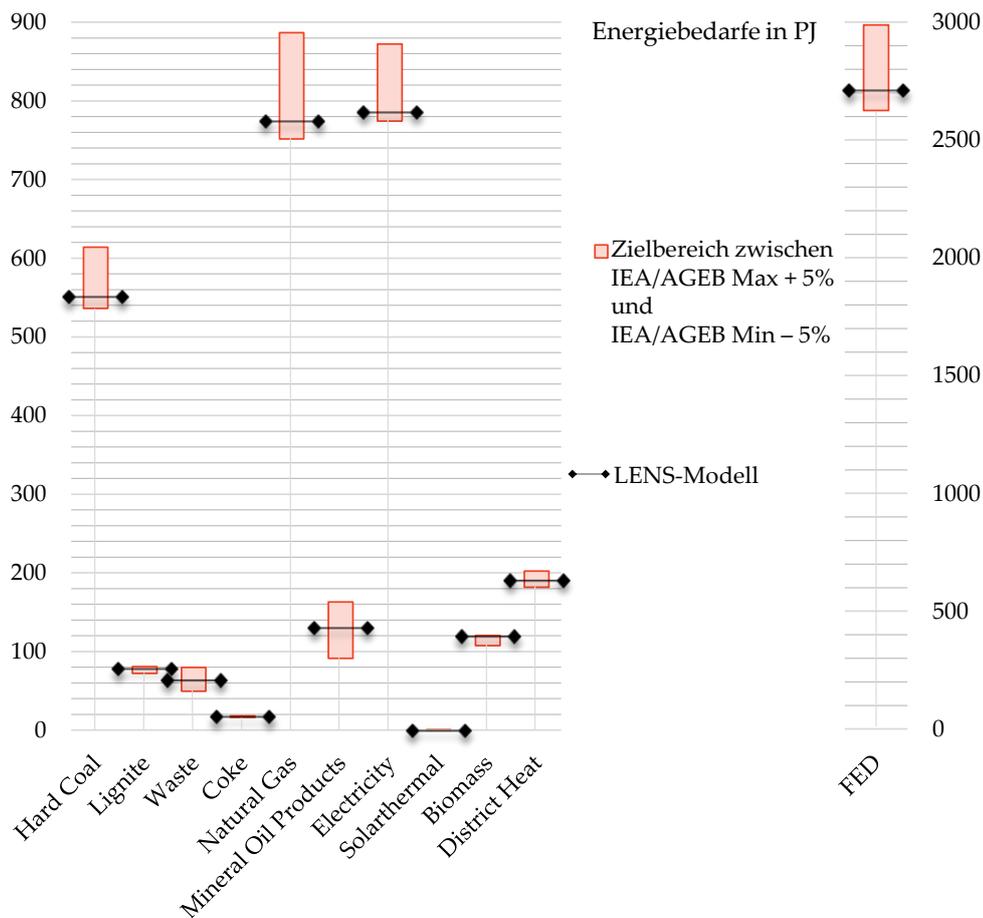


Abbildung 3.14: Einordnung der Modellergebnisse in die internationale und nationale Statistik.

Tendenziell ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse des LENS-Modells eher am unteren Ende der Zielkorridore orientieren. Dadurch ist allerdings keine Aussage möglich, ob die Daten näher an einer der Statistiken liegen, zumal keine pauschale Zuordnung der Statistiken zu den Minimum- oder Maximumwerten möglich ist.

In Summe ist das LENS-Modell der Industrie damit als kalibriert zu betrachten, weil die Abweichungen für Prozessenergie im Stahlsektor $< 1\%$ sind und alle anderen Bereiche in der Spannbreite der Statistikwerte von AGEB und IEA liegen. Im Stützjahr 2018 sind alle grundlegenden Daten und Systemabhängigkeiten abgeglichen und deren Korrektheit nachgewiesen. Darüber hinaus sind die Daten der Stahlindustrie auch für die Szenarienjahre durch den Modellvergleich kalibriert. Daher ist davon auszugehen, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte LENS-Modell realitätsnahe Szenarienergebnisse generiert und entsprechend für Aufgabenstellungen der Energiebilanzierung industrieller Prozesse angewendet werden kann.

4 Modellanwendung für Szenarien

Das erstellte Industriemodell soll in diesem Kapitel für die Generierung von Szenarien angewendet werden. Hierfür werden zuerst die Szenarien definiert und im Anschluss die Ergebnisse anhand unterschiedlicher Grafiken dargestellt. Das primäre Ziel dieser Arbeit ist hierbei nicht die Generierung quantitativ aussagekräftiger Szenarien, sondern die Veranschaulichung des Funktionsumfangs und möglicher Anwendungen des Modells.

4.1 Szenariendefinition

Das vorgestellte Modell wurde in LENS implementiert, um Szenarien für den künftigen Energieverbrauch des Industriesektors zu entwickeln. Im Modell wurden daher zunächst bereits bestehende Szenarien nachgebildet. Darüber hinaus wurde die Funktionsfähigkeit auf Sektorebene durch die Entwicklung eines neuen Stahlszenarios geprüft.

Den zu definierenden Szenarien liegen Systemgrenzen zugrunde, ohne deren korrekte Definition eine Szenarienerstellung nicht möglich ist. Diese können eingeteilt werden in zeitliche, regionale und technische Systemgrenzen, wobei letztere durch die Modellentwicklung in Kapitel 3 abgedeckt werden.

Regionaler Betrachtungsrahmen dieser Arbeit ist das Land Deutschland und dessen Auswirkungen auf die Umwelt. Dies bringt Zielvorgaben aus unterschiedlichen Vereinbarungen für die Minderung der Emissionen mit sich (siehe hierfür Kapitel 2).

Als zeitliche Systemgrenze wird das Jahr 2050 definiert. Sowohl das *Pariser Abkommen*, als auch der *European Green Deal* setzen 2050 als Zielmarke für Klimaneutralität [18][19]. Das KSG hat dieses Ziel seit August 2021 auf 2045 vorverlegt [3].

Darüber hinaus werden auch in vergleichbaren Arbeiten und Untersuchungen ähnliche zeitliche Systemgrenzen definiert. Als Beispiele seien hier die drei Arbeiten von Fleiter T. [14], Mengis N. [16] oder Agora Energiewende [6] genannt. Zudem definiert der Weltklimarat (IPCC) in einem Bericht von 2018 das Zieljahr 2050 für Szenarien mit keinem oder niedrigem Überschreiten der 1,5°C Marke [65].

Damit deckt das Jahr 2050 die wichtigsten Eckpfeiler der nationalen und internationalen Klimaziele ab und ist somit bestens für die Generierung von Energieszenarien geeignet.

Szenarien orientieren sich meistens an den Fragestellungen der entsprechenden Projekte und werden dementsprechend definiert. Aus unterschiedlichen Arbeiten bildet sich hierbei allerdings ein Konsens, der auf verschiedenen Strategien zur Bewältigung der Klimakrise (bzw. Energiekrise) beruht. Zum einen gibt es hier die CCS Strategie, die von einem großen Anteil abgespalteter und gespeicherter Emissionen ausgeht. Zum anderen gibt es die Strategien der indirekten (durch wasserstoffbasierte Power-to-X Energieträger) und direkten Elektrifizierung [5][66][67][14][68][69].

Im Rahmen dieser Arbeit werden fünf Szenarien betrachtet, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Die Szenarien variieren in der Prozessenergie, welche aus den definierten Prozessen der Subsektoren resultiert. Hierfür werden die jahresbezogenen Marktanteile der Prozesse definiert (und variiert), um Technologieablösungen abzubilden, woraus zeitliche Verläufe in den Energiebedarfen resultieren. Alle anderen Energieanwendungen sind in den fünf Szenarien identisch abgebildet und resultieren aus den Annahmen aus Kapitel 3.2.

Vier dieser Szenarien wurden vollständig von Harpprecht et al. [8] übernommen. Sie dienen dem Modellvergleich in Kapitel 3.4.1 und wurden unverändert implementiert. Darüber hinaus wird ein fünftes Szenario definiert, welches auf eigenen Erkenntnissen im Rahmen dieser Arbeit basiert und der Veranschaulichung des Funktionsumfangs des Modells dient. Sowohl dieses, als auch die vier Basisszenarien werden im Folgenden beschrieben und die Hintergründe und Annahmen erläutert.

Die vier Basisszenarien aus Harpprecht et al. [8] bestehen aus einem Referenzszenario *Reference* und drei Dekarbonisierungsszenarien *Electrification*, *Coal-Exit* und *Carbon Capture*, welche in Tabelle 4.1 gezeigt werden. Detailliertere Beschreibungen aller Annahmen können der angegebenen Quelle entnommen werden.

Szenario	Beschreibung	Prozesse, die den BF ersetzen			
		NG/DRI/EAF	H2/DRI/EAF	EW/EAF	BF/BOF/CCS
Reference	Fortführung der aktuellen Produktion mit dem Ziel Investmentkosten zu minimieren.	x			
Electrification	Starke Maßnahmen der Dekarbonisierung durch Einführung klimaschonender Technologien, sobald diese verfügbar sind.	x	x	x	
Coal-Exit	Maßnahmen des <i>Electrification</i> Szenarios mit zusätzlichem Kohleausstieg und damit abschalten aller BFs bis 2038.	x	x	x	
Carbon Capture (CCS)	Maßnahmen des <i>Electrification</i> Szenarios mit zusätzlichem Einsatz von CCS Anlagen ab 2025 in allen BFs mit einer restlichen Lebensdauer > 10 Jahre.	x	x	x	x

Tabelle 4.1: Beschreibung der vier Basisszenarien für die Modellanwendung
Tabelle adaptiert von Harpprecht et al. [8]

Das fünfte Szenario *All Technologies* fußt auf den Basisszenarien und variiert dementsprechend auch die Marktanteile der definierten Prozesse der Stahlindustrie. Der Zweck dieses Szenarios ist es, den Funktionsumfang des Modells zu verdeutlichen und eine Abgrenzung zu den bestehenden Szenarien zu schaffen. Dabei sollen alle modellierten Technologien einbezogen werden, um die Ergebnisse vollumfänglich darstellen zu können.

Für das Szenario *All Technologies* werden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird von einem Kohleausstieg im Jahr 2035 ausgegangen, wodurch alle Hochöfen ohne CCS Kopplung bis dahin abgeschaltet und ersetzt werden.

- Ab 2025 soll es einen steigenden CCS Anteil für die Hochöfen geben, der bis zum Kohleausstieg sein Maximum findet und als schnelle Lösung zur CO₂-Reduktion dienen soll.
- Der Anteil von Sekundärstahl steigt, nach der Angabe von S. Burrow [15], über die Jahre kontinuierlich.
- Abgeschaltete Hochöfen werden durch Direktreduktionsanlagen ersetzt, welche vorerst mit Erdgas betrieben werden und ab 2025 kontinuierlich durch Wasserstoff betriebene Anlagen ersetzt werden, wie es bereits von Thyssenkrupp geplant wird [70].
- Ab 2040 wird auch die Roheisenproduktion durch Eisenelektrolyse modelliert, allerdings mit längerer Anlaufzeit als in Harpprecht et al [8].

Die definierten Szenarien lassen sich alle in die anfangs beschriebenen Strategien einordnen und passen damit gut in die Szenarien vergleichbarer Arbeiten.

4.2 Auswertung der Szenarienergebnisse

Nachdem das LENS-Modell entwickelt wurde und die Szenarien definiert sind, können die generierten Szenarienergebnisse (siehe Anhang 3 bis 9) ausgewertet werden. Grundsätzlich wird hierfür das eigens entwickelte Szenario *All Technologies* verwendet, das alle modellierten Prozesse in die Auswertung miteinbezieht. Ausnahmen sind gekennzeichnet. Außerdem werden die Eingangsdaten des Modells durch LENS interpoliert, sodass die Ergebnisse in Einjahresschritten ausgewertet werden können.

Eingeteilt wird die Auswertung thematisch in Energiebedarfe und CO₂-Emissionen, wobei ersteres noch einmal in Energiebedarfe der gesamten Industrie und der Subsektoren unterteilt wird. Entsprechend ergibt sich die nachfolgende Kapitelstruktur.

Abbildung 4.1 zeigt die Prozessmarktanteile des Szenarios *All Technology*, die aus den oben getroffenen Annahmen resultieren. Der Anteil von Sekundärstahl aus dem *Scrap/EAF* Prozess steigt kontinuierlich bis zu 50% im Jahr 2050. Konventionelle BF Anlagen ohne CCS Technologie werden nicht länger als 2035 betrieben. Darüber hinaus gibt es noch einen Anteil an CCS gekoppelten BF Prozessen, die aber auch bis 2045 abgelöst werden. Für die neuen Technologien der Direktreduktion und Eisenelektrolyse

sind dabei gute Ablösungsprozesse zu sehen, die in einer rein wasserstoff- und strombasierten Stahlherstellung bis zum Jahr 2045 münden.

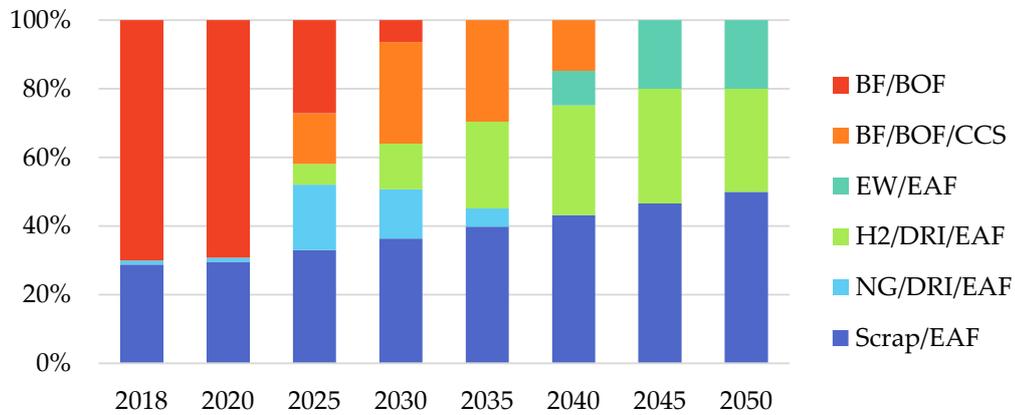


Abbildung 4.1: Marktanteile des Szenarios All Technologies

4.2.1 Energiebedarfe innerhalb des Industriesektors

Für die Auswertung des Energiebedarfs der gesamten Industrie wird das oben beschriebene *All Technology* Szenario verwendet. Eine Darstellung des Energiebedarfs nach Energieanwendung ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Dabei wird der Energiebedarf für den Subsektor *Eisen und Stahl* separat dargestellt und von den einzelnen Energieanwendungen abgehoben. Dadurch ist gut sichtbar, wie groß der Anteil der Stahlindustrie in der jeweiligen Energieanwendung ist. Die modellierten Stützjahre sind hier farblich gegenüber den durch LENS interpolierten Jahren hervorgehoben.

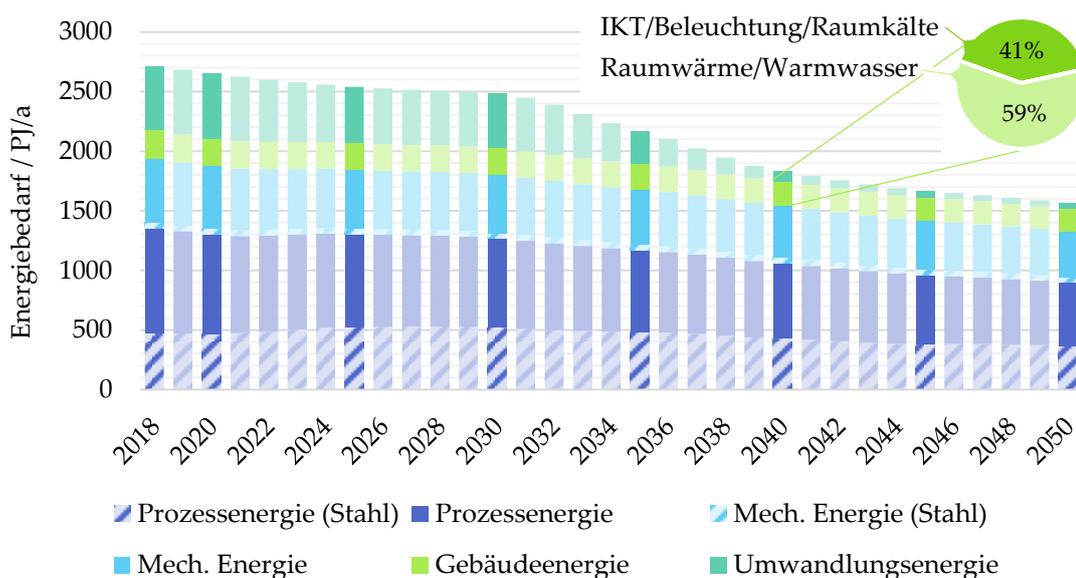


Abbildung 4.2: Energiebedarf der Industrie nach Subsektoren

Die Gebäudeenergie wird hier im Verlauf zusammengefasst dargestellt, kann aber auch separat ausgewertet und nach Anwendungsbereichen untersucht werden. Beispielhaft ist dies hier für das Jahr 2040 abgebildet. In Summe zeigt das Szenario für die Industrie einen deutlichen Rückgang im Endenergiebedarf, welcher auf steigende Wirkungsgrade und vor allem Technologieablösungen zurückzuführen ist.

Der Gesamtenergiebedarf kann aber auch nach Energieträgern aufgeschlüsselt werden, wobei der Prozess der Defossilisierung sehr gut sichtbar wird (Abbildung 4.3). Der stetige Rückgang der fossilen Brennstoffe Kohle, Gas und Öl durch die Ablösung der traditionellen Prozesse durch neue, wasserstoff- und strombasierte, ist gut zu erkennen und auch die Zunahme im Strombedarf zeichnet sich deutlich ab. Dabei werden Primärenergieträger voll und Sekundär- bzw. Endenergieträger schraffiert dargestellt, um die in Kapitel 3.2.1 erläuterte Einteilung kenntlich zu machen.

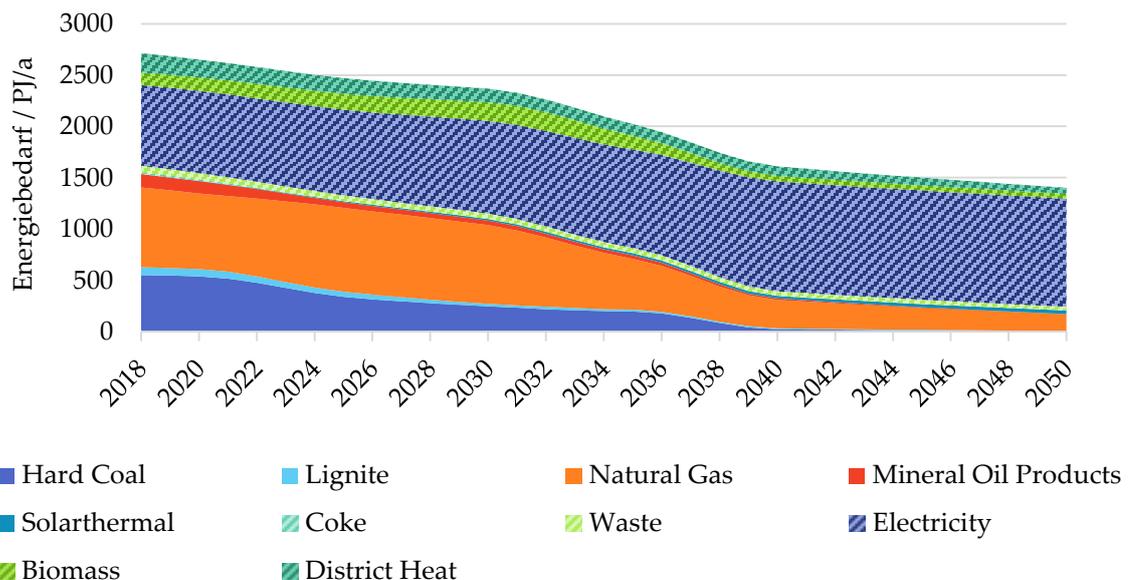


Abbildung 4.3: Gesamtenergiebedarf der Industrie nach Energieträgern

Der Energiebedarf kann auch für einen spezifischen Energieträger betrachtet und nach Anwendungsbereichen aufgeschlüsselt werden. In Abbildung 4.4 wird der Strombedarf der gesamten Industrie nach Energieanwendungen dargestellt. Über die Jahre ist dabei durchgehend ein Anstieg für den Strombedarf zu sehen, der auf den Trend der Elektrifizierung zurückzuführen ist. Die Gebäudeenergie verhält sich nahezu konstant im Strombedarf.

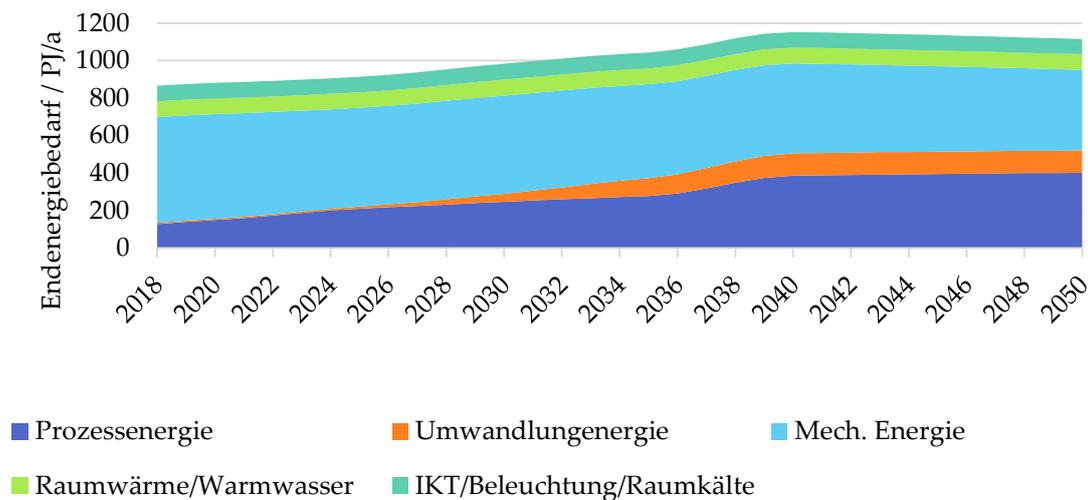


Abbildung 4.4: Strombedarf der Industrie nach Energieanwendung

Das Modell ermöglicht auch die Betrachtung einzelner Energieträger (Abbildung 4.5). Hier werden die einzelnen Bedarfe für Wasserstoff als Balken abgebildet, wobei die Prozessenergien klar dominieren und KWK vernachlässigt werden kann. Die Wasserstoff-Direktreduktion repräsentiert hier die einzelnen wasserstoffverbrauchenden Technologien. Durch die Modellierung weiterer Subsektoren kann dies noch deutlich verfeinert werden, um auch für andere Subsektoren eine Aussage über den Wasserstoffbedarf treffen zu können. Aktuell werden die anderen Subsektoren in der restlichen Prozessenergie zusammengefasst. Neben den Einzelbedarfen ist auch der Gesamtbedarf dargestellt, welcher sich rechts auf die Sekundärachse des Diagramms bezieht. Die Achsen sind so synchronisiert, dass die Verläufe der Einzelbedarfe und des Gesamtbedarfs übereinanderliegen, wodurch ein Vergleich beider Verläufe ermöglicht wird. So kann zum Beispiel bestimmt werden, welche Subsektoren in Relation zum Gesamtbedarf schneller den Wasserstoffbedarf erhöhen und in welchen Subsektoren dieser Prozess eher träge verläuft.

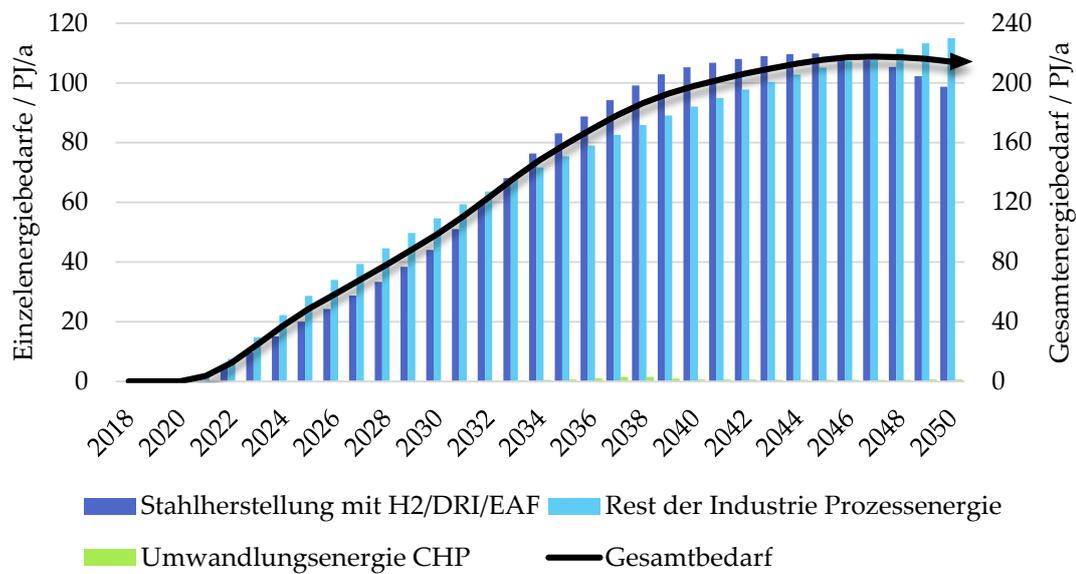


Abbildung 4.5: Wasserstoffbedarf der Industrie nach Anwendung und in Summe

Für Szenarien sind oft die Verläufe über mehrere Jahre hinweg interessant, aber auch einzelne Jahre können mit dem vorliegenden Modell detailliert ausgewertet werden. Das Sankey-Diagramm aus Abbildung 4.6 zeigt für das Jahr 2030 den Energiebedarf der einzelnen Subsektoren links und wie sich diese auf die Energieträger rechts verteilen. Die Dicke der Linien gibt dabei Aufschluss über die Mengen der jeweiligen Energieträger, wie es für ein Sankey-Diagramm üblich ist. Besonders für Schlüsseljahre der Energiewende, wie zum Beispiel das Jahr 2035 für den aktuell geplanten Kohleausstieg oder das Jahr 2045 für Klimaneutralität nach neuestem KSG, kann eine solche Auswertung von Interesse sein.

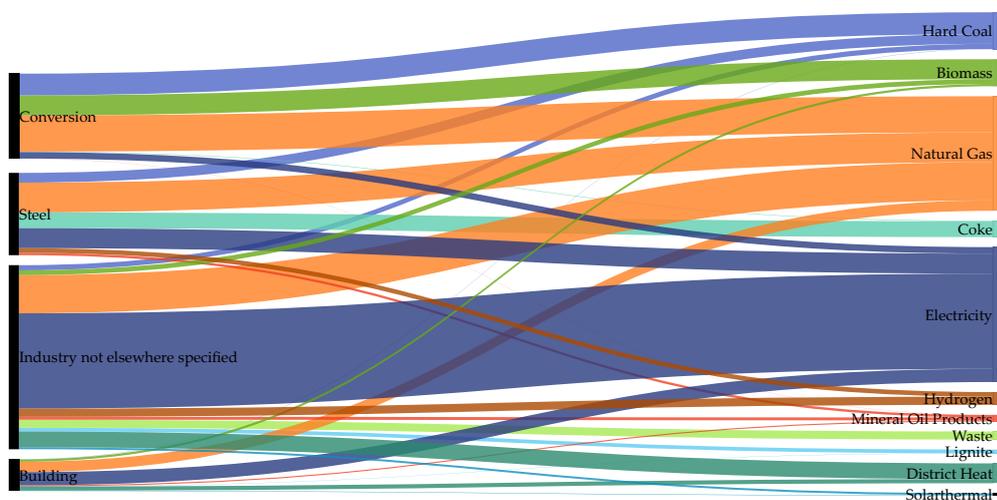


Abbildung 4.6: Sankey-Diagramm des Energiebedarfs der Industrie im Jahr 2030

4.2.2 Energiebedarfe innerhalb der Subsektoren

Neben der Betrachtung der gesamten Industrie ist durch das sektoral aufgelöste Modell nun auch die Analyse einzelner Subsektoren möglich. Dies ist besonders von Interesse, da hiermit die individuellen Einflüsse auf das Gesamtsystem sichtbar werden. Für die Subsektoren *Gebäudeenergie*, *Umwandlungsenergie* und *Rest der Industrie* ist dies in Abbildung 4.7 aufgeschlüsselt und nach Energieträgern dargestellt. Da für die Stahlindustrie verschiedene Szenarien modelliert sind, wird dieser Subsektor im Anschluss separat dargestellt.

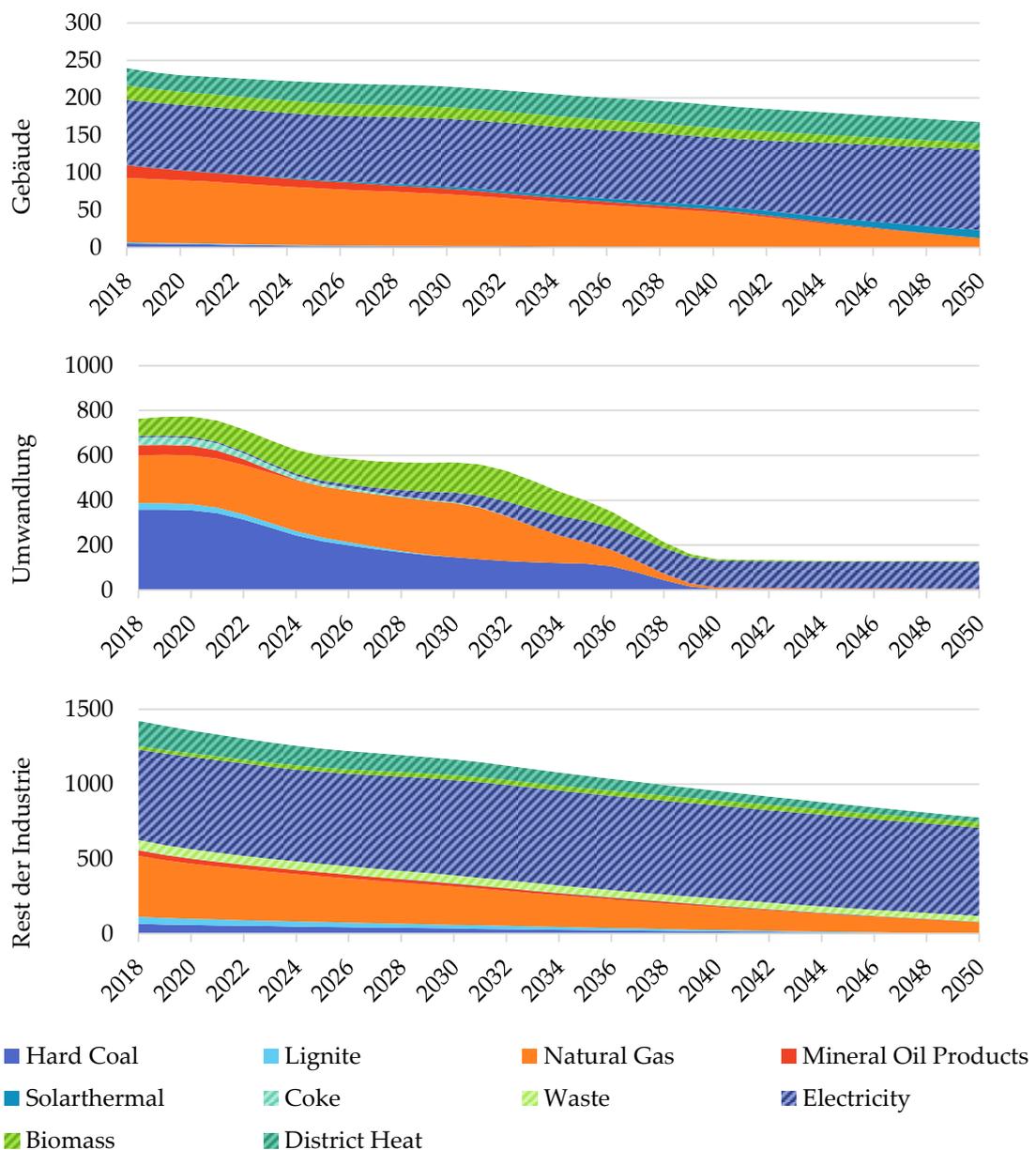


Abbildung 4.7: Energiebedarfe der Subsektoren Gebäude, Umwandlung und Rest der Industrie nach Energieträger

Für die *Top-Down* modellierten Subsektoren *Gebäude* und *Rest der Industrie* sind sehr konstante Verläufe innerhalb der Energieträger zu sehen. Dies ist nicht weiter überraschend, da den Eingangsdaten Annahmen konstanter Entwicklungen zu Grunde liegen. Zudem sind in diesen Subsektoren keine Technologieablösungen modelliert, die zu inkonstanten Verläufen führen könnten. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Modellierung weiterer Subsektoren. Jeder weitere *Bottom-Up* modellierte Subsektor, der durch Technologien und dessen Marktanteile über die Zeit definiert ist, erhöht die Genauigkeit und Aussagekraft des Gesamtmodells drastisch.

Der Umwandlungssektor, der ebenfalls *Bottom-Up* modelliert ist, zeigt den Unterschied zu den *Top-Down* Modellbereichen. Hier sind starke Schwankungen in den Energiebedarfen zu sehen, die auf den Abbau der fossilen Umwandlungsprozesse Koksofen und KWK zurückzuführen sind. Diese Schwankungen münden schließlich im nahezu reinen Strombedarf durch die zunehmende Wasserstoffproduktion.

Für die Auswertung der generierten Daten des Subsektors *Eisen und Stahl* werden die Basisszenarien von Harpprecht et al. als Referenz verwendet und dem Szenario *All Technologies* gegenübergestellt, das im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde. In Abbildung 4.8 sind alle fünf Szenarien zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass die Szenarien von Harpprecht et al. an die hier definierten Systemgrenzen angepasst sind, wodurch ein Koks- und Wasserstoffbedarf entsteht, der in der Arbeit von Harpprecht et al. nur als Energie für Koks und Wasserstoff dargestellt ist. Entsprechend der ursprünglichen Visualisierung wurden auch hier keine interpolierten Daten für die vier Basisszenarien abgebildet. An dieser Stelle wird deutlich, wie wichtig die *Bottom-Up* Modellierung der Subsektoren ist. Durch die Definition einzelner Prozesse bilden sich in den Energiebedarfen Ablösungsprozesse unterschiedlicher Energieträger ab. Beispielsweise ist im *All Technology* Szenario ein starker Anstieg des Erdgasbedarfs zwischen 2020 und 2025 sichtbar, der auf den Technologieumstieg auf NG/DRI/EAF zurückzuführen ist. Solche inkonstanten Verläufe sind nur durch die Abbildung einzelner Prozesse in *Bottom-Up* modellierten Subsektoren möglich. Auch die Interpolation der Daten von LENS zeigt hier seine Stärke, da die Verläufe deutlich detaillierter abgebildet werden, als es bisher der

Fall war. Besonders bei sprunghaften Änderungen, wie dem beschriebenen Anstieg des Erdgasbedarfs, ist die Möglichkeit einer feineren Auswertung von Vorteil.

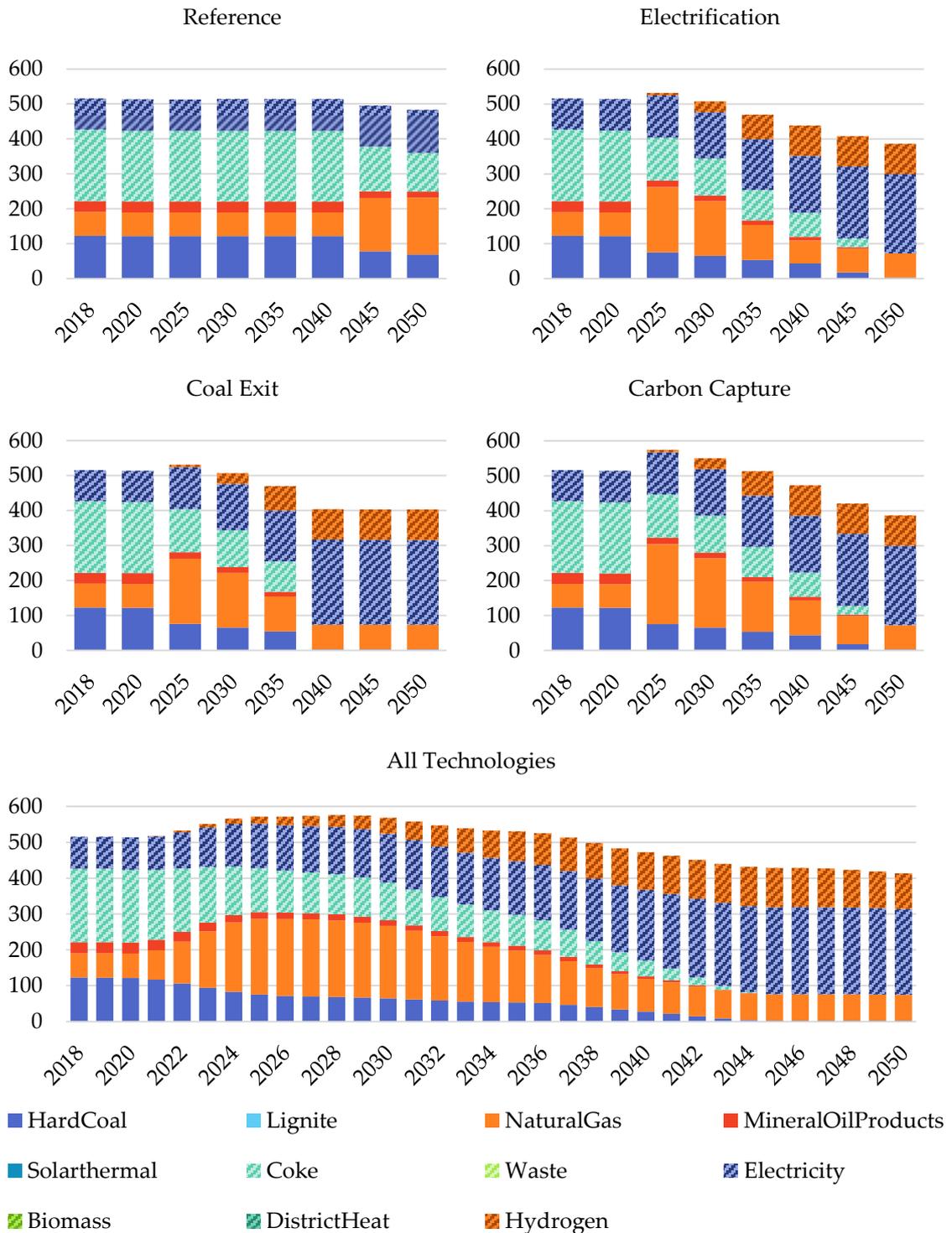


Abbildung 4.8: Energiebedarfe der Stahlindustrie in PJ/a in unterschiedlichen Szenarien

Der eingeführte Subsektor der industrierelevanten Umwandlungsprozesse (siehe Kapitel 3.1) ermöglicht an dieser Stelle auch die Gegenüberstellung unterschiedlich definierter Systemgrenzen. Abbildung 4.9 zeigt ein Sankey-Diagramm, in dem die Energiebedarfe des Stahlsektors entsprechend der Systemgrenzen von Harpprecht et al. [8] und dieser Arbeit gegenübergestellt werden. Als Betrachtungsjahr wird hierfür 2018 gewählt, weil dieses über alle Szenarien hinweg gleich ist. Dabei werden deutliche Differenzen sichtbar, vor allem im Hinblick auf zukünftige Potentiale in der Wasserstoffproduktion. Zum einen die Relevanz der Auseinandersetzung mit den Systemgrenzen und zum anderen die Flexibilität des Modells dieser Arbeit werden dadurch veranschaulicht.

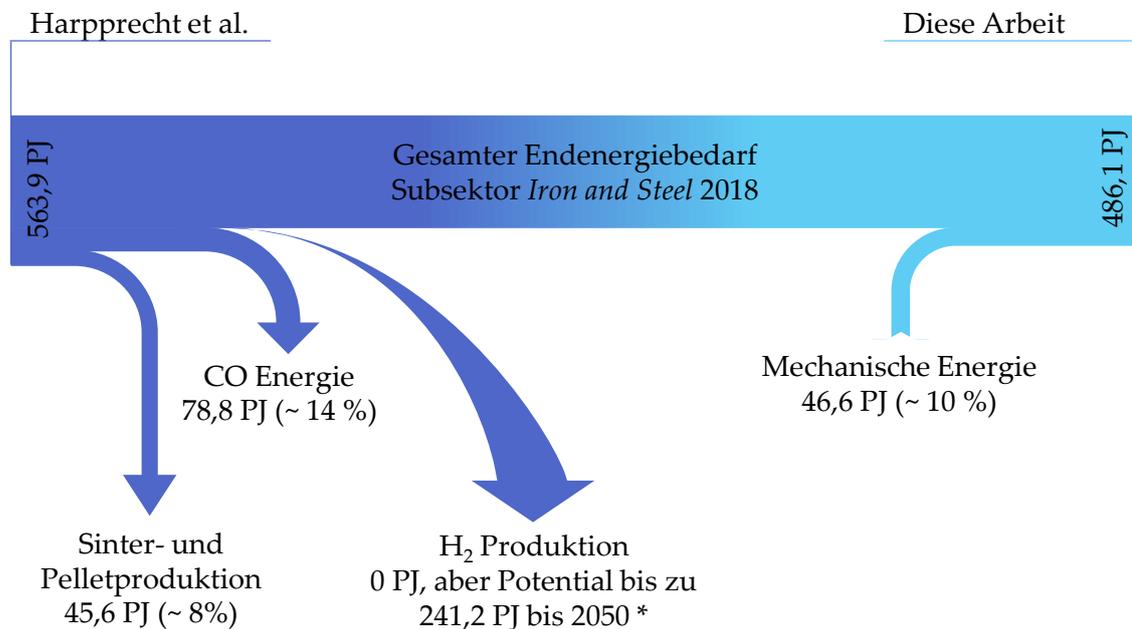


Abbildung 4.9: Einfluss unterschiedlicher Systemgrenzen im Subsektor Eisen und Stahl
* Nach [71]

4.2.3 Ausblick auf die CO₂-Emissionen des Industriesektors

Auch für die Auswertung der CO₂-Emissionen wird das Szenario *All Technologies* verwendet. Dabei werden die Emissionenfaktoren aus Kapitel 3.2.4 angewendet.

Für die gesamte Industrie können die CO₂-Emissionen nach Subsektoren aufgeschlüsselt und wie in Abbildung 4.10 dargestellt werden. Das Modell bildet dabei die stetige Abnahme der Emissionen aller Subsektoren korrekt und sektorgenau ab. Besonders der Subsektor *Umwandlungsprozesse* senkt die Emissionen bis 2040 drastisch. Dieser Verlauf ist auf den Ausstieg der Koksöfen bis 2040 zurückzuführen. Von da an sorgen

die Wasserstoffelektrolyseure für den größten Anteil, welcher durch den sinkenden Emissionsfaktor für Strom sehr gering ist. Zudem ist das Minderungsziel aus dem Klimaschutzgesetz (siehe Kapitel 2) als Linie mit eingezeichnet. Klar zu erkennen ist dabei, dass sich die Ergebnisse des Modells durchweg oberhalb der Linie aus dem KSG befinden. Dies kann wieder durch verschiedene Systemgrenzen begründet werden. Der Koksofen und die KWK, welche den überwiegenden Teil des Subsektors *Umwandlungsprozesse* ausmachen, werden in der Statistik nicht im Industriesektor aufgeführt. Damit passen die Ergebnisse, zumindest bis etwa 2030, deutlich besser an die Kurve des KSG.

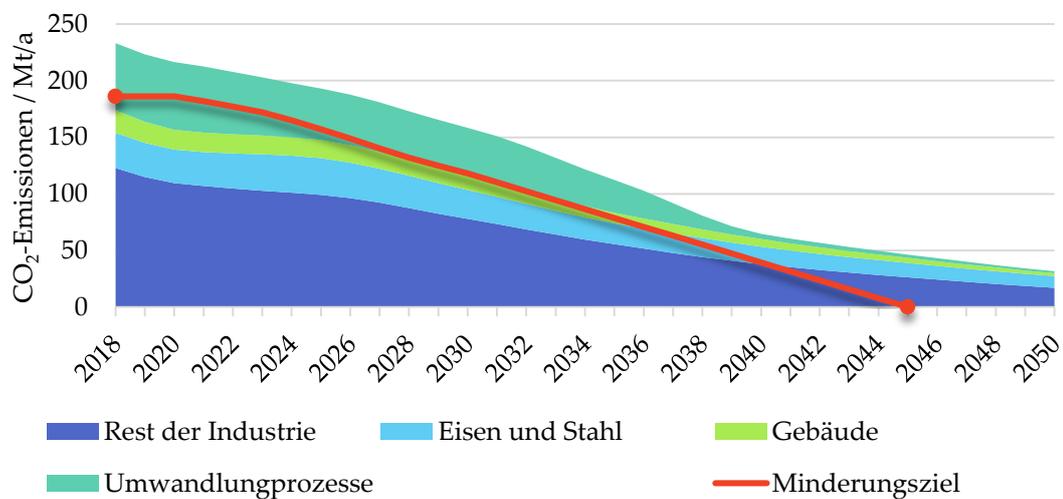


Abbildung 4.10: CO₂ Emissionen des deutschen Industriesektors aufgeschlüsselt nach Subsektoren

Alternativ dazu können die CO₂-Emissionen auch nach Energieanwendung und relativ zueinander dargestellt werden, wie in Abbildung 4.11 zu sehen ist. Der zunehmende Einfluss der Prozesswärme ist dabei gut zu erkennen. Auch hier kann eine Sensitivitätsanalyse angesetzt werden, was durch unterschiedliche Annahmen des Emissionsfaktors für den Strom durchgeführt wird. Abweichend zu den übrigen Auswertungen wird hier der Emissionsfaktor für Strom aus Kapitel 3.2.4 einmal als Minimum- und als Maximumwert angenommen und die Ergebnisse entsprechend gegenübergestellt. Klar zu erkennen ist, wie die Emissionen der strombasierten Energieanwendungen, parallel zum Emissionsfaktor, stark zurückgehen. Dadurch wird der prozentuale Einfluss der Prozessenergie noch größer.

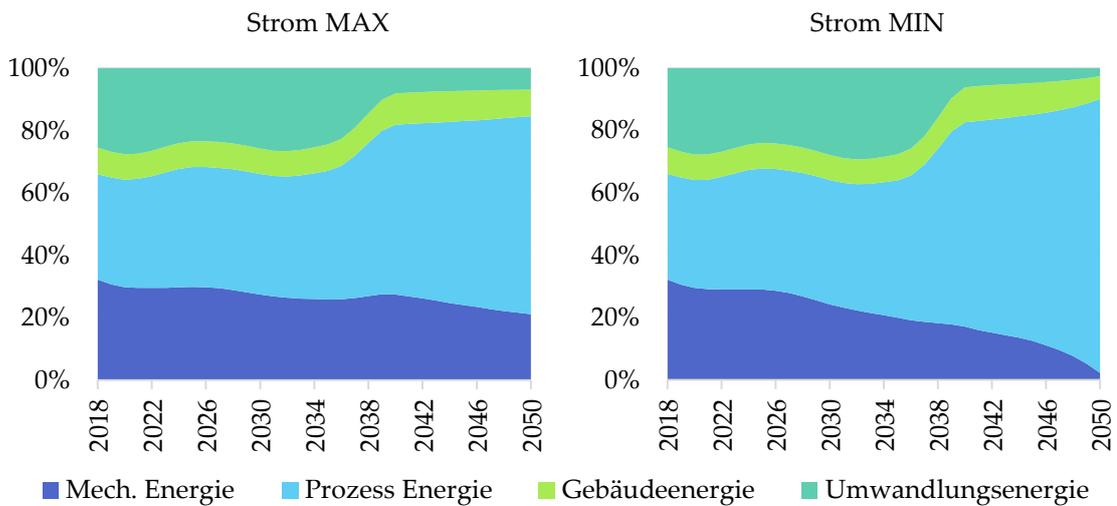


Abbildung 4.11: Darstellung der CO₂-Emissionen des Industriesektors nach Energieanwendungen

Die CO₂-Emissionen selbst können auch, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, für jeden Sektor, jede Energieanwendung und jede Technologie in prozessbedingte und energiebedingte Emissionen aufgeschlüsselt werden, wobei letztere nochmal in biogene und nicht biogene Emissionen aufgeteilt werden. Das resultiert in Zusammenhang mit der sektoralen Auflösung in deutlich mehr Auswertungsmöglichkeiten in Bezug auf die CO₂-Emissionen. Zu beachten ist dabei, dass sich biogene Emissionen aktuell nur auf die direkte Nutzung von Biomasse beziehen. Biogene Emissionen, die beispielweise durch die Stromerzeugung durch Biomasse entstehen, werden derzeit noch nicht den biogenen CO₂-Emissionen zugeschrieben. Eine beispielhafte Auswertung dessen ist in Abbildung 4.12 zu sehen. Hier wird der Anteil von biogenem CO₂ zusammen mit den Absolutwerten in Mt/a aus der Gebäudeenergie im Jahr 2018 dem Anteil von 2050 gegenübergestellt.

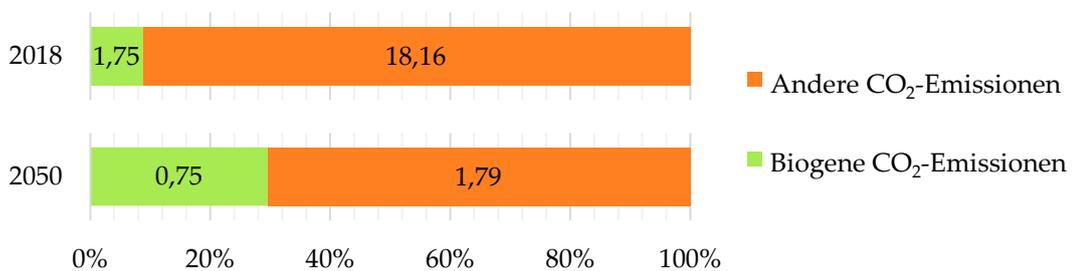


Abbildung 4.12: Anteil von biogenem CO₂ an den Gesamtemissionen aus Gebäudeenergie (Absolutwerte in Mt/a)

Auch die Emissionen der einzelnen Subsektoren können detailliert betrachtet werden, wie hier beispielhaft für den Subsektor *Eisen und Stahl* in Abbildung 4.13 dargestellt

ist. Dabei werden sowohl die Emissionen aus der Prozessenergie einzelnen Technologien, wie auch die Emissionen aus der mechanischen Energie dargestellt. Zusätzlich kann auch jede Gesamtemission für jede Technologie und jedes Jahr nach Art der Emissionen untersucht werden, wie für den Prozess *Scrap/EAF* im Jahr 2040 hier beispielhaft dargestellt ist. Außerdem werden die Stützjahre der Szenarioauslegung hervorgehoben dargestellt, um sie von den interpolierten Jahren abzuheben. Damit kann deutlich gemacht werden, welche der Balken tatsächlich mit Berechnungen und Annahmen hinterlegt sind und welche nicht. Die dargestellten Emissionen entstammen dem Szenario *All Technologie*, das auch einen CCS Anteil beinhaltet. Die separate Modellierung der CCS CO₂-Emissionen ermöglicht außerdem die Abbildung dieser Emissionen als negativ Emissionen, wie dargestellt. Diese kann einfach aufsummiert werden, um herauszufinden, welche Gesamtmenge CO₂ gespeichert werden muss. In diesem Fall müssen bis 2045 etwa 140 t CO₂ gespeichert werden.

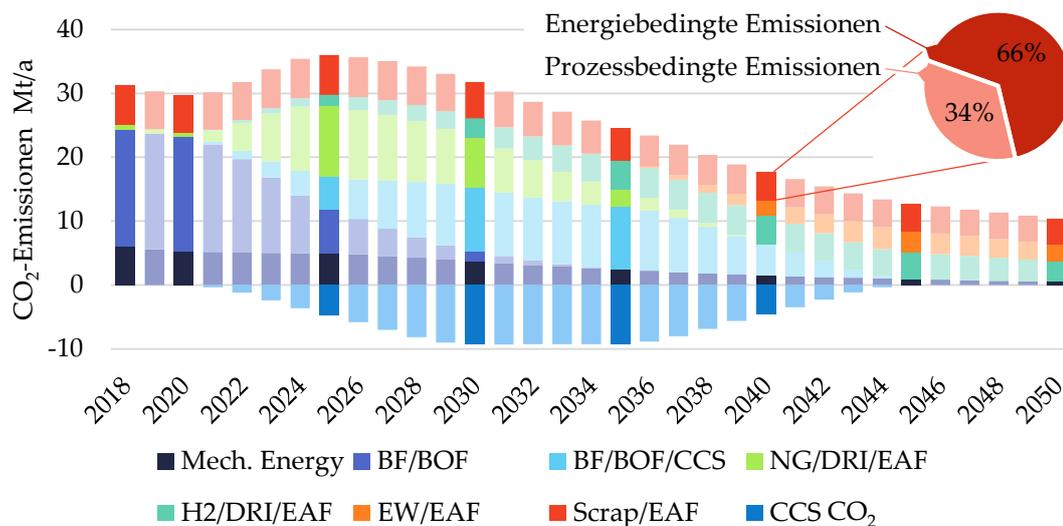


Abbildung 4.13: CO₂-Emissionen des Subsektors Eisen und Stahl

Je nach Zielsetzung können diese Auswertungen individuell verknüpft und kombiniert werden. Die feine Modellierung der unterschiedlichen Technologien in unterschiedlichen Subsektoren erlaubt auch eine individuelle Analyse der Daten. So kann die Analyse der Daten auch im Nachhinein mit relativ wenig Aufwand an gegebene Systemgrenzen angepasst werden. Als Beispiel sei hier der Koksofen oder die Pellet- und Sinterproduktion genannt, die bewusst separiert modelliert wurden, um eben jene individuelle

Analyse zu ermöglichen. Darüber hinaus sind auch Vergleiche zu bereits bestehenden Arbeiten einfacher möglich, da die Ergebnisse an die definierten Systemgrenzen anderer Arbeiten angepasst werden können.

Die vorgestellten Szenarioergebnisse zeigen, dass die detaillierte Modellierung der Industrieprozesse zusätzliche Erkenntnisse bringt. Sowohl in der Betrachtung der Energiebedarfe als auch der CO₂-Emissionen ermöglichen die *Bottom-Up* modellierten Subsektoren innerhalb des Industriemodells dieser Arbeit deutlich tiefergehende Analysen. Im Gegensatz zum *Top-Down* Ansatz können dadurch die Wechselwirkungen von Technologieablösungen genauer beschrieben werden. Außerdem kann der Einfluss einzelner Prozesse auf das Gesamtsystem oder bestimmte Energieträger ausgewertet werden. Für die Festlegung und Bewertung konkreter Maßnahmen für die industrielle Energietransformation ist die Betrachtung der Prozessebene daher unabdingbar und durch das Modell dieser Arbeit nun möglich.

5 Benutzerfreundlichkeit des Modells

Nach der Erstellung des Modells und dem Nachweis der Funktionsfähigkeit wird nachfolgend auch dessen Benutzerfreundlichkeit betrachtet. Diese spielt eine wichtige Rolle, wenn es um die Anwendung eines Tools zur Bearbeitung einer Aufgabenstellung geht. Das anzuwendende Tool setzt sich hierbei aus der Software LENS und dem Modell dieser Arbeit zusammen und bildet damit das zu untersuchende Gesamtsystem ab.

5.1 Methodik für die Untersuchung der Benutzerfreundlichkeit

Benutzerfreundlichkeit wird in der Norm DIN EN ISO 9241 Teil 11 Gebrauchstauglichkeit genannt und definiert sich als „[...] *das Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer genutzt werden kann, um in einem bestimmten Nutzungskontext bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen*“ [72, S. 6].

Im Englischen wird Benutzerfreundlichkeit als Usability angeführt und auf ähnliche Weise definiert. Eine Charakterisierung dessen in Bezug auf die beschriebene Norm wird beispielweise in der Arbeit von M. Speicher durchgeführt [73]. Dieser kommt zu dem Ergebnis, dass Benutzerfreundlichkeit nicht ohne die Definition des dazugehörigen Nutzungsfalles beschrieben werden kann.

Auch außerhalb der Norm wird Benutzerfreundlichkeit definiert und angewandt. So ist z.B. sowohl im allgemeinen Käuferlebnis als auch im M-Commerce¹ Benutzerfreundlichkeit ein großes Thema, denn der Erfolg einer Verkaufsplattform, egal ob App, Website oder sonstiges, hängt weniger von der Quantität und Qualität des Inhalts ab, sondern viel mehr von der Einfachheit der Erreichbarkeit der Inhalte [74][75]. Dies lässt sich problemlos auf die Anwendung eines Tools übertragen. Soll das Tool Verwendung finden, muss eine einfache und möglichst frustfreie Anwendung ermöglicht werden. Wo möglich und nötig müssen auch Hilfestellungen sinnvoll platziert werden. Aus dem M-

¹ M-Commerce = Mobile Commerce und bedeutet den Vertrieb von Produkten und Dienstleistungen speziell auf mobilen Endgeräten wie Smartphones und Tablets.

Commerce-Vergleich lassen sich darüber hinaus die Kategorien *Design/Gestaltung*, *Bedienung*, *Übersichtlichkeit* und *Performance* für die Benutzerfreundlichkeit ableiten.

Zur Evaluierung der Benutzerfreundlichkeit einer Software dient ein Usability-Test. Hierbei prüfen potentielle Nutzer das Produkt und geben Rückmeldung über dessen allgemeine Wirkung und identifizieren spezifische Problemstellungen. Versuchsinhalt ist dabei das Lösen typischer Aufgaben mit dem Testobjekt. Usability-Tests können auf unterschiedliche Weisen durchgeführt werden [75][76]. Zur Auswahl stehen *Expertenbasierte Usability-Evaluation*, *Laboranalysen*, *On-Site Befragungen*, *Pfad- und Klickanalysen* oder *Crowdtesting*.

Ein Usability-Test, der besonders in der Industrie große Anwendung findet, ist der *System Usability Scale* (SUS) Fragenbogen, der 1996 von John Brooke entwickelt wurde [77]. Dieser Test besteht aus 10 Fragen und soll die Merkmale einer untersuchten industriellen Anwendung wiedergeben und dessen Benutzerfreundlichkeit evaluieren. Der SUS stellt damit ein Instrument zur schnellen und einfachen Ermittlung der Benutzerfreundlichkeit dar. Die Fragen des SUS sind in Tabelle 5.1 dargestellt, wobei jede dieser Fragen mit einer Zahl zwischen 1 (starker Widerspruch) und 5 (starke Zustimmung) beantwortet werden soll.

-
- 1 *I think that I would like to use this system frequently*
-
- 2 *I found the system unnecessarily complex*
-
- 3 *I thought the system was easy to use*
-
- 4 *I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system*
-
- 5 *I found the various functions in this system were well integrated*
-
- 6 *I thought there was too much inconsistency in this system*
-
- 7 *I would imagine that most people would learn to use this system very quickly*
-
- 8 *I found the system very cumbersome to use*
-
- 9 *I felt very confident using the system*
-
- 10 *I needed to learn a lot of things before I could get going with this system*
-

Tabelle 5.1: Fragen des System Usability Scale (SUS) Fragebogens nach J. Brooke

Der SUS wird üblicherweise angewandt, sobald die Befragten einige Zeit mit dem zu prüfenden System gearbeitet haben, allerdings bevor jegliche Diskussion stattfindet. Bei

der Anwendung ist es wichtig, dass die Befragten eher ihre erste spontane Antwort eintragen als zu lange über eine Antwort nachzudenken. Zudem müssen alle Fragen ausgefüllt werden. Wenn eine Frage durch den Befragten nicht beantwortet werden kann, wird sie mit 3 angekreuzt.

Die eingetragenen Antworten können mithilfe von Formel (5.1) zu einem SUS-Score verrechnet werden, der die allgemeine Benutzerfreundlichkeit des untersuchten Systems quantifiziert. Das x steht hier für die Punktezahl der Frage mit der Nummer des jeweiligen Indexes. Dabei reicht der SUS-Score von 0 (nicht benutzerfreundlich) bis 100 (benutzerfreundlich). Die unterschiedliche Verrechnung von Werten aus Fragen mit gerader Nummer und Fragen mit ungerader Nummer kommt aus der Art der Formulierung. Fragen mit ungerader Nummer sind positiv formuliert und damit ist 5 der beste Wert. Bei Fragen mit ungerader Nummer ist es umgekehrt. Der Faktor 2,5 skaliert das Ergebnis schließlich auf 100.

$$SUS - Score = 2,5 \cdot \left[\sum_{i=1}^5 (x_{2i-1} - 1) + \sum_{i=1}^5 (5 - x_{2i}) \right] \quad (5.1)$$

Der SUS wurde bereits in unterschiedlichen Arbeiten und Untersuchungen verwendet und auf dessen Tauglichkeit erprobt. So z.B. auch in verschiedenen Arbeiten von J. Lewis, der trotz des Alters des SUS immer noch eine zeitgemäße Anwendbarkeit dessen sieht [78]. Er gibt aber auch zu bedenken, dass je nach Anwendungsfall eine kritische Auseinandersetzung mit den Fragen wichtig ist und eine gezielte Streichung einzelner Fragen sinnvoll sein kann [79].

Für die Modellentwicklung im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Maßnahmen getroffen, um die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen und so auch den Nutzer in den Entwicklungsprozess miteinzubeziehen:

Erstens wird im Rahmen der Entwicklung der Nutzerdateien von LENS, genauer der *Input Data* und der *Model Datei*, fortwährend auf die Einhaltung der Regeln der Gebrauchstauglichkeit geachtet. Diese sind Inhalt von Teil 110 der anfangs beschriebenen Norm DIN EN ISO 9241 und stellen grundsätzliche Regeln für die Gestaltung von Schnittstellen zwischen Nutzer und System samt Bewertung der entsprechenden Gebrauchstauglichkeit dar [80]. Vor allem bei Funktionalitäten, die durch den Nutzer in

vielen Fällen verwendet werden müssen, soll auf eine möglichst intuitive und wenig fehleranfällige Anwendbarkeit geachtet werden. An den Stellen wo fehlerhafte Eingaben durch den Nutzer gemacht werden können, sollen diese nicht zu einer Funktionsstörung des Gesamtsystems führen. Der Nutzer soll in der Anwendung unterstützt und wo nötig sollen helfende Beschreibungen platziert werden.

Zweitens soll nach der Modellentwicklung eine Evaluierung der Ist-Situation in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit des Gesamtsystems durchgeführt werden. Für eine echte Analyse gibt es durch das frühe Entwicklungsstadium von LENS zu wenig Anwender, die dafür in Frage kommen. Daher wird hier ein Verfahren eingeführt und getestet, das später in größerer Form durchgeführt werden kann. Dieses Verfahren umfasst die Anwendung des SUS, wie oben beschrieben. Die Durchführung geschieht im Rahmen von Expertenbefragungen. Dabei wird auf eine möglichst objektive und spontane Beantwortung Wert gelegt. Im Anschluss daran wird die Ist-Situation bewertet und Verbesserungspotentiale herausgearbeitet. Ein Konzept zur teilweisen Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit des Gesamtsystems wird erarbeitet, welches in Verbindung mit der bisherigen Situation Neubewertet wird.

5.2 Ergebnisse in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit von LENS

Neben der Beachtung der allgemeinen Regeln zur Steigerung der Benutzerfreundlichkeit soll hier die Benutzerfreundlichkeit des Gesamtsystems durch das vorgestellte Verfahren untersucht werden. Der Fragebogen des SUS wird von drei potenziellen Benutzern (B1, B2, B3) ausgefüllt, wobei die Befragungsergebnisse in Abbildung 5.1 abgebildet werden. Es ist zu beachten, dass diese Form der Evaluierung durch die stark begrenzte Anwendergruppe kaum statistisch aussagekräftig ist und lediglich einen Erwartungswert abbildet. Für aussagekräftigere Ergebnisse muss im Nachgang eine tiefergehende Studie angesetzt werden. Diese kann aber auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbauen und die genutzte Systematik wiederverwenden.

Durch die Umsortierung der Fragen nach gerader und ungerader Nummer, können die Ergebnisse leichter kategorisiert werden. Dies ist in der Abbildung auch farblich hinterlegt (grün = guter Wert, rot = schlechter Wert). Dargestellt wird von jeder Frage nur

der Mittelwert der Befragungsergebnisse. Die Einzelergebnisse sind rechts daneben zu sehen und werden ergänzt durch die Standardabweichung s , die Aufschluss über die Streubreite der Werte gibt. Der ermittelte SUS-Score liegt hier bei 55.

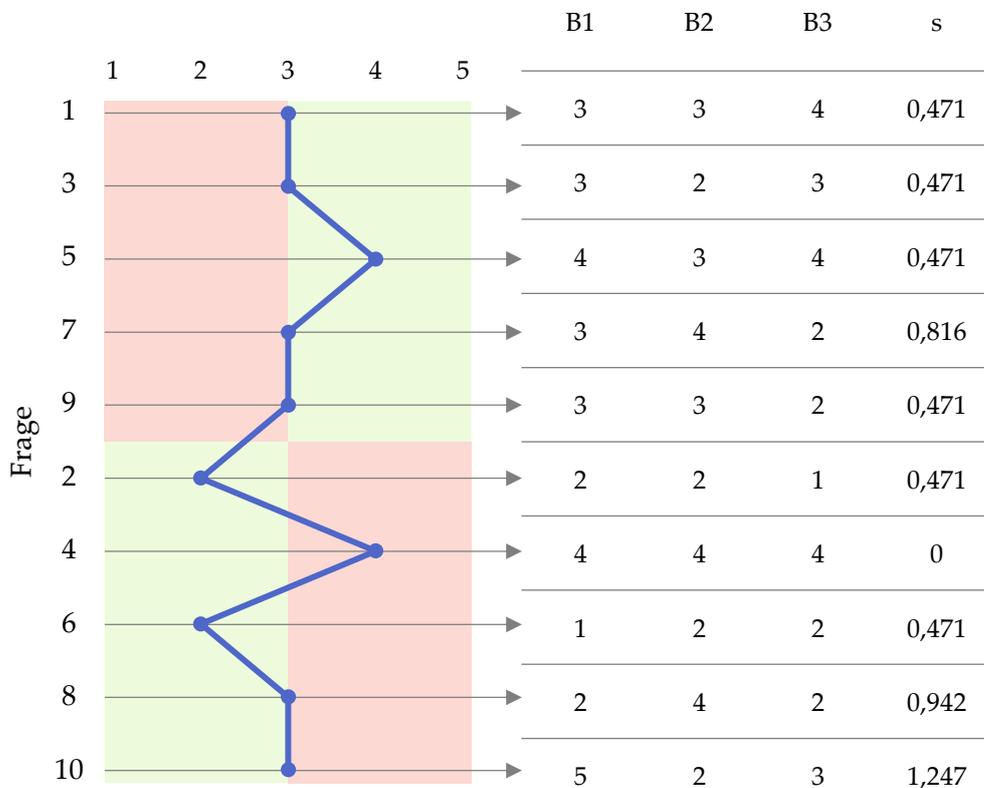


Abbildung 5.1: Bewertung der Benutzerfreundlichkeit des LENS-Modells ohne Verbesserungskonzept

Zur Verbesserung der evaluierten Ist-Situation werden zwei Maßnahmen definiert. Eine *Enduser-Guideline* (siehe Anhang 10) wird erstellt, die alle wichtigen Informationen enthält um LENS und die dazugehörigen Dateien zu nutzen. Für eine möglichst breite Nutzungsmöglichkeit im Anwenderbereich ist diese Guideline, gleich wie das LENS Modell, in Englisch verfasst. Inhalt dessen sind übersichtliche Darstellungen der notwendigen Nutzereingaben, Hinweise zur Fehlervermeidung, sowie anschauliche Schritt-für-Schritt Anleitungen für übliche Anwendungsfälle. Diese Guideline ist vor allem für die ersten Anwendungen sehr wichtig und auch für den Fall, dass das Tool vom Nutzer nur unregelmäßig angewendet wird. In diesen Fällen unterstützt die *Enduser-Guideline* stark und gibt Hilfestellungen wo nötig.

Darüber hinaus wird ein Konzept für ein *User Interface* (UI) erstellt, das für eine interaktive Nutzer-System-Schnittstelle sorgen soll. Dieses ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

Zweck dieses UI ist es, dem Nutzer eine direkte Schnittstelle für den Dateiaustausch zu geben, die beschriebene Guideline zugänglich zu machen und direkte Rückmeldung zu geben. Hierfür wird auf der ersten Seite des UI eine Eingabemaske erstellt, welche es dem Nutzer ermöglicht, die *Input Data* und die *Model* Datei einzulesen. LENS kopiert dann automatisch die entsprechenden Dateien aus dem Nutzerverzeichnis in das Arbeitsverzeichnis und schreibt die Dateinamen in die LENS *config* Datei.

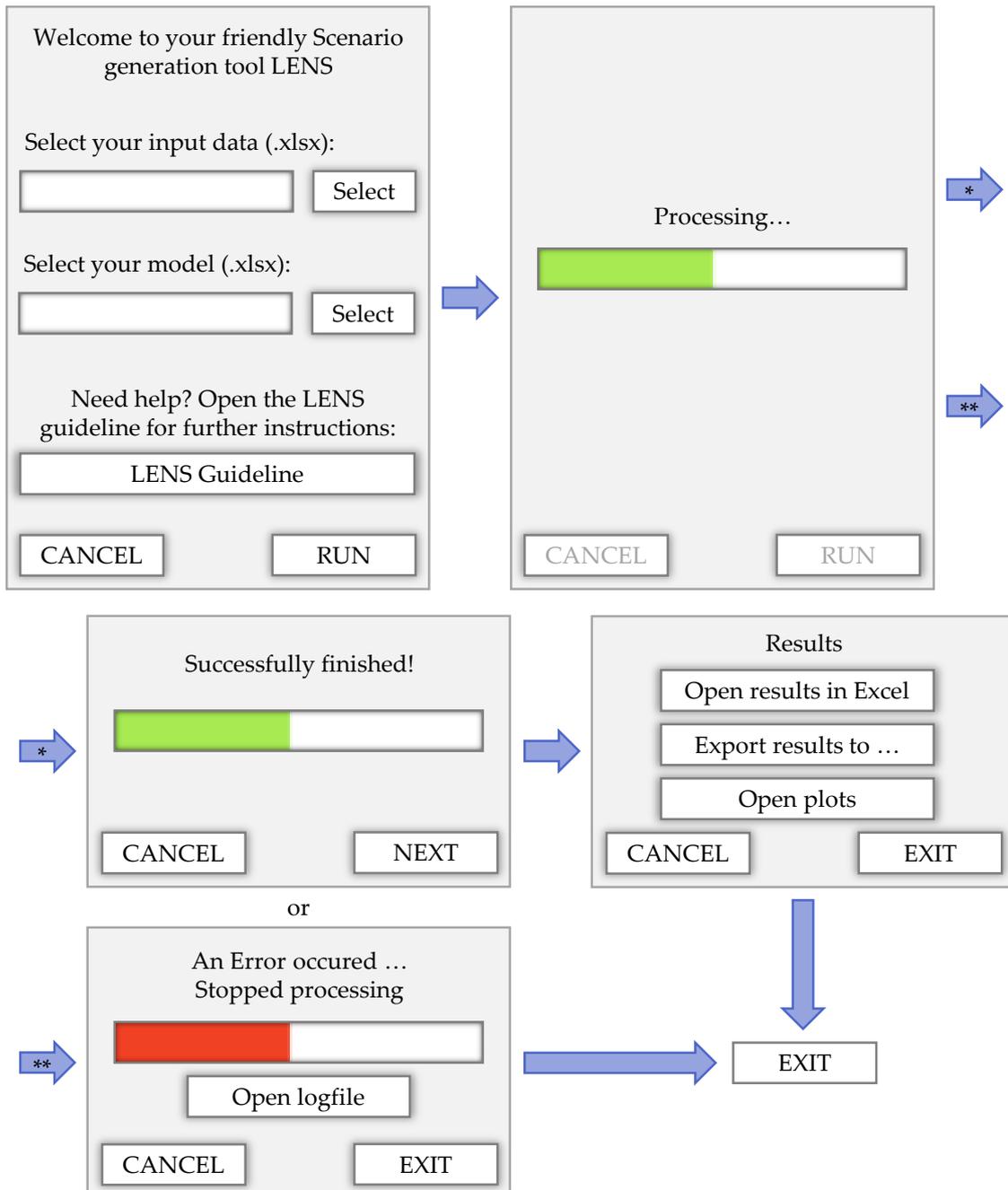


Abbildung 5.2: Konzept eines einfachen User Interface für LENS

Der Nutzer kann damit Dateien individuell benennen und muss keine Änderungen in der *config* Datei manuell durchführen. Außerdem wird nicht direkt auf das Arbeitsverzeichnis zugegriffen und somit können keine Dateien ungewollt geändert oder gelöscht werden. Darüber hinaus wird ein Feld implementiert, das einen direkten Link zur *Enduser-Guideline* enthält. Somit kann ein einfacher und schneller Zugriff gewährleistet werden. Nach einem Klick auf RUN beginnt LENS die Szenarien zu berechnen und beendet dies entweder erfolgreich oder mit einer Fehlermeldung. In letzterem Fall kann die Logdatei mit allen Fehlermeldungen ausgegeben werden, um die Fehler zu beheben. Nach einem erfolgreichen Durchlauf wird die letzte Seite des UI angezeigt, das dem Nutzer die Ergebnisse zur Verfügung stellt. Dabei können diese entweder direkt geöffnet, exportiert oder in grafischer Form dargestellt werden.

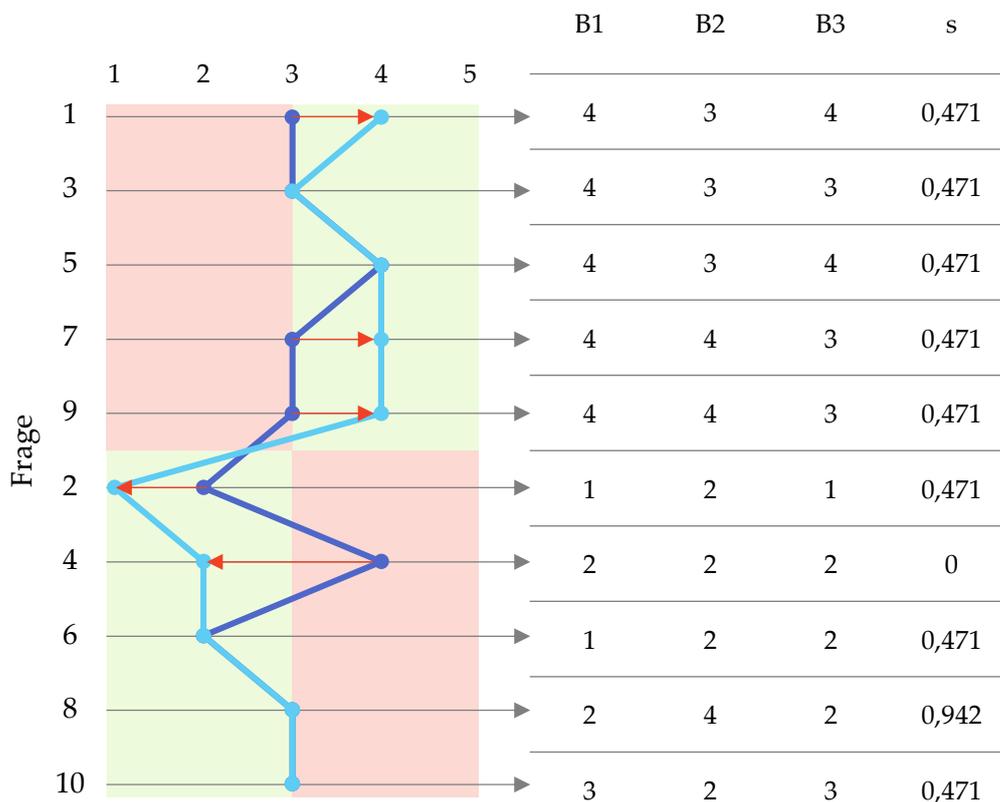


Abbildung 5.3: Bewertung der Benutzerfreundlichkeit des LENS-Modells mit Verbesserungskonzept

Unter Betrachtung dieser zwei Maßnahmen zur Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit von LENS wurde die Untersuchung erneut durchgeführt und kommt zu dem Ergebnis, das in Abbildung 5.3 zu sehen ist. Hierbei ist klar erkennbar, dass die

beschriebenen Maßnahmen zu einer Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit in unterschiedlichen Bereichen führen. Auch der SUS-Score hat sich von 55 auf 70 Punkte erhöht und lässt damit eine deutliche Verbesserung erwarten.

Die vorgestellte Methodik ist damit gut geeignet, um mit vergleichsweise wenig Aufwand die Benutzerfreundlichkeit des Tools zu quantifizieren. Durch den Vergleich zweier Situationen, wie es hier mit und ohne Verbesserungskonzept gemacht wurde, ist auch eine Steigerung der Benutzerfreundlichkeit messbar. Dadurch kann der Nutzen eines Konzeptes gemessen und dessen Umsetzung priorisiert werden. Auch als Diskussionsgrundlage in der Auseinandersetzung mit der Benutzerfreundlichkeit des Tools ist das Verfahren gut geeignet, da es schnell und einfach Defizite aufzeigt und den schwer greifbaren Begriff der Benutzerfreundlichkeit quantitativ darstellt.

6 Diskussion

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell zu Energiesystemanalyse der Industrie ist nachweislich funktionsfähig und liefert realitätsnahe Ergebnisse. Besonders die Betrachtung und korrekte Definition der Systemgrenzen hat sich dabei als wichtiges Merkmal für die Güte des Modells erwiesen. Systemelemente, die in den Referenzquellen uneinheitliche Systemgrenzen aufweisen, wurden deshalb in diesem Modell separat modelliert, um eine flexible Modellgestaltung zu ermöglichen und auch in der nachgelagerten Ergebnisauswertung noch Anpassungen vornehmen zu können. Eine kritische Auseinandersetzung mit den Systemgrenzen ist daher stets unabdingbar und steht immer mit der Zielsetzung des zu entwickelnden Szenarios in Verbindung. Die hier definierten Systemgrenzen schließen beispielsweise vorgelagerte Umwandlungsprozesse und Transportenergien vollständig aus, weshalb Energiebedarfe und dazugehörige Emissionen zwingend in der Betrachtung des Gesamtsystems berücksichtigt werden müssen.

Die hier verwendeten Daten stammen zu einem großen Teil aus vorherigen Arbeiten und Projekten und wurden an die Gegebenheiten des entwickelten Modells angepasst. Fehlende Daten wurden durch entsprechende Quellen oder treffende Annahmen ersetzt. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Fokus dieser Arbeit auf der Entwicklung des Modells und der damit verbundenen Rahmenstruktur für die Parametrisierung lag. Dementsprechend sind manche Annahmen eher als Anhaltswerte zu betrachten, die im Nachgang genauer untersucht werden sollten. Grundsätzlich ist das reine Austauschen der Daten allerdings mit wenig Aufwand verbunden, da das zugrundeliegende Modell lauffähig ist.

Nach jeder großen Änderung oder Neuerstellung eines Subsektors ändert sich der Energiebedarf des entsprechenden Subsektors und damit gleichzeitig der Endenergiebedarf des Subsektors *Rest der Industrie*. Zumal dieser über die benötigte Nutzenergie modelliert ist und daher die Daten in *Rest der Industrie* nach jeder Änderung der Subsektoren neu kalibriert werden müssen. Dieser Prozess ist aufwändig, kann aber durch die

individuellen Eigenschaften der Subsektoren nur schwer automatisiert werden. Außerdem wurde für die Kalibrierung nur ein Stützjahr gewählt, das zur Beschreibung des generellen Vorgehens diente. Für die Verbesserung der Datenlage sollten an dieser Stelle weitere Stützjahre eingeführt werden.

Aktuell ist nur ein Subsektor der Stahlindustrie aus der Gesamtindustrie herausgelöst und separat modelliert. Die Ergebnisse dieses Modelles werden durch die weitere Modellierung von Subsektoren, wie dem der Chemie- oder Zementindustrie, deutlich aussagekräftiger und gewinnen an Dynamik. Der Bereich *Rest der Industrie* verliert damit gleichzeitig an Bedeutung, da dessen Anteil am Gesamtergebnis sinkt.

Eine entscheidende Neuerung gegenüber der bisher (in der Arbeitsgruppe) etablierten Modellentwicklung stellt die Untersuchung der Benutzerfreundlichkeit dar. Der hier angewandte Fragenbogen SUS für die systematische Evaluierung der Benutzerfreundlichkeit eines Systems ist entwickelt für Endanwender Software, die für eine breite Masse Endanwender konzipiert ist. Das hier betrachtete System ist allerdings sehr spezifisch für eine kleine Gruppe von Nutzern, die zudem viel Grundlagenwissen mit sich bringen müssen. Außerdem befindet sich LENS aktuell noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Das alles mündet in einer sehr erschwerten Anwendung des SUS in diesem spezifischen Fall und begrenzt die Aussagekraft des Absolutwertes stark. Jedoch ist das System gut geeignet als Diskussionsgrundlage im Entwicklungsprozess und verdeutlicht Schwachstellen in der Benutzerfreundlichkeit, woraus wiederum Arbeitspakete abgeleitet werden können. Als Hilfestellung in der Entwicklung kann dieses Verfahren somit gut angewandt werden, als absolute Bewertung der Benutzerfreundlichkeit hingegen weniger, wobei aktuell auch kein Vergleichswert existiert, der eine Einordnung ermöglichen würde.

7 Fazit und Ausblick

Ergebnis dieser Arbeit ist ein neuartiges Modell zur Systemanalyse des Industriesektors. Dabei können einzelne Industriezweige separat modelliert und mit der übrigen Industrie zu einem Gesamtsektor verknüpft werden. Dadurch ist es möglich, innerhalb der Industrie gegenwärtige Technologien und deren Ablösung durch neuartige Technologien zu modellieren und diese Substitutionsprozesse in den Kontext der Gesamtindustrie zu stellen. Die resultierenden Ergebnisse bilden die Industrie deutlich genauer ab als die bisherigen Trendangaben, wie sie häufig in etablierten Modellen wie z.B. Mengis et al. (2022) [16] oder Simon et al. (2022) [17] genutzt werden. Das Modell eignet sich daher als Erweiterungsmodul für die übergeordnete Betrachtung des Gesamtsystems. Es ermöglicht auch eine Erweiterung durch weitere Subsektoren. In Folge dessen gewinnt das Modell nach und nach deutlich an Detailtiefe und Aussagekraft. Für den Industriesektor ist damit das Fundament für eine hochaufgelöste Szenarienerstellung gelegt.

Die erstellten Szenarien können sowohl explorativer als auch normativer Natur sein, da die Parametrisierung des Modells beide Szenarientypen zulässt. Dadurch ist das Modell flexibel anwendbar und kann in einer Vielzahl industrierelevanter Fragestellungen genutzt werden.

Das Modell wurde in Verbindung mit dem Framework LENS erstellt, das innerhalb des DLR entwickelt wurde und im Rahmen dieser Arbeit erstmals Anwendung fand. Daraus ging neben dem Industriemodell auch eine Studie zur Benutzerfreundlichkeit des Systems hervor. Ergebnis dessen ist ein Konzept, bestehend aus einer *Enduser-Guideline* und einem *User-Interface*, das für eine Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit in der Anwendung von LENS sorgen soll.

In einem nächsten Arbeitsschritt sollten die Ergebnisdaten des Jahres 2020 mit den statistischen Daten abgeglichen werden, wodurch ein neues Stützjahr für die Szenarien geschaffen wird. Dadurch gewinnt das Modell an Stabilität in der Parametrisierung. Darüber hinaus sollten getroffene Annahmen im Rahmen dieser Arbeit kritisch

hinterfragt und auf dessen Richtigkeit überprüft werden, zumal die Erweiterung des Modells durch weitere Industriezweige anzustreben ist.

Ebenfalls geht aus den Untersuchungen dieser Arbeit hervor, dass Wasserstoff mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit von zentraler Bedeutung für die zukünftige Energieversorgung der Industrie sein wird. Dieser Energieträger ist in der Bereitstellung energie- und kostenintensiv, da kaum bis keine natürlichen Vorkommen vorhanden sind. Aber, wie Sharan Burrow in einem Side Event der COP 26 sagte:

“Hydrogen is not cheap, but it’s too costly not to use it and stay with coal” - [15]

In Zuge dessen soll neben dem Modell auch LENS in Zukunft weiterentwickelt und durch ein Kostenmodell erweitert werden, sodass ebenfalls monetäre Untersuchungen durchführbar sind. Auch weitere Ergänzungen wie Alterungsmodelle sind hierbei denkbar.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Spiegel Wissenschaft, „Gericht zählt Fehler in Gores Klimafilm auf“, 11. Okt. 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/streit-um-unterrichtsmaterial-gericht-zaehlt-fehler-in-gores-klimafilm-auf-a-510794.html>. Zugriff am: 14.03.22.
- [2] IPCC, „Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“, Masson-Delmotte, V. *et al.*, Cambridge University Press, 2021.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV), „Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021“, 7. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_3_bf.pdf. Zugriff am: 5. März 2022.
- [4] Umweltbundesamt, „Vorjahreschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020“, Dessau, 15. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#nationale-und-europaische-klimaziele>. Zugriff am: 15.03.22.
- [5] G. Kobiela *et al.*, „CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze; Diskussionsbeitrag für Fridays for Future Deutschland“, Wuppertal Institut, Wuppertal, 2020.
- [6] Agora Energiewende und Wuppertal Institut, „Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement“, Berlin, Nov. 2019.
- [7] AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: Daten für die Jahre von 1990 bis 2020“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/>. Zugriff am: 27.01.22.

- [8] C. Harpprecht, T. Naegler, B. Steubing, A. Tukker und S. Simon, „Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study“, *Energies (paper submitted)*, 2022.
- [9] Agora Industry, Wuppertal Institut und Lund University, „Global Steel at a Crossroads: Why the global steel sector needs to invest in climate-neutral technologies in the 2020s“ 236/15-I-2021/EN, 2021.
- [10] C. Bataille, S. Stiebert und F. Li, „Global facility level net-zero steel pathways: technical report on the first scenarios of the Net-zero Steel Project“, IDDRI, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://netzerosteel.org>. Zugriff am: 10. Januar 2021.
- [11] E. Karakaya, C. Nuur und L. Assbring, „Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: Towards a hydrogen-based future?“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 195, S. 651–663, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.142.
- [12] C. Lutz, B. Meyer, C. Nathani und J. Schleich, „Endogenous Innovation, the Economy and the Environment: Impacts of a Technology-Based Modelling Approach for Energy-Intensive Industries in Germany“, *Energy Studies Review*, Jg. 15, Nr. 1, 2014, doi: 10.15173/esr.v15i1.502.
- [13] T. Fleiter, D. Fehrenbach, E. Worrell und W. Eichhammer, „Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials“, *Energy*, Jg. 40, Nr. 1, S. 84–99, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.02.025.
- [14] T. Fleiter, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Vertiefungswebinar Industrie“, 29.06.21. [Online]. Verfügbar unter: <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/>
- [15] J. Flasbarth, B. Osburg, S. Burrow, A.-C. Howard und A. Purvis, „Targeting Net-Zero: Leveraging a Just Transformation of the Global Steel Sector: Official UN-FCCC COP26 Side Event“. Glasgow, 3. Nov. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://unfccc-cop26.streamworld.de/webcast/targeting-net-zero-leveraging-a-just-transformat-2>
- [16] N. Mengis *et al.*, „Net-zero CO₂ Germany - A retrospect from the year 2050“, *E-arth's Future*, 2022, doi: 10.1029/2021EF002324.

- [17] S. Simon, M. Xiao, C. Harpprecht, S. Sasanpour, H. Gardian und T. Pregger, „A Pathway for the German Energy Sector Compatible with a 1.5 °C Carbon Budget“, *Sustainability*, Jg. 14, Nr. 2, S. 1025, 2022, doi: 10.3390/su14021025.
- [18] United Nations, „Paris Agreement“, United Nations Treaty Collection, Chapter XXVII 7. d, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en. Zugriff am: 5. März 2022.
- [19] European Commission, „Communication from the commission to the european parliament, the european council, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions: The European Green Deal“, Brüssel, 11. Dez. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_en.pdf. Zugriff am: 5. März 2022.
- [20] M. Fishedick, K. Görner und M. Thomeczek, *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [21] EnArgus, „Energienachfragemodell“, Forschungszentrum Jülich GmbH, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3226-2/*/*/Energienachfragemodell.html?op=Wiki.gewiki#:~:text=Top%2DDown%2DModelle%20basieren,Input%2DOutput%2DModelle. Zugriff am: 22.03.22.
- [22] A. B. Schwarzkopf, R. J. Tersine und J. S. Morris, „Top-down versus bottom-up forecasting strategies“, *International Journal of Production Research*, Jg. 26, Nr. 11, S. 1833–1843, 1988, doi: 10.1080/00207548808947995.
- [23] Fraunhofer ISI, „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD“, Karlsruhe, 3. Sep. 2021.
- [24] A. Kemmler *et al.*, „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050, Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030“, Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, IINAS, 2020.
- [25] M. Fette *et al.*, „Multi-Sektor-Kopplung - Modellbasierte Analyse der Integration erneuerbarer Stromerzeugung durch die Kopplung der Stromversorgung mit dem Wärme-, Gas- und Verkehrssektor“, 2020.

- [26] H. Schlink, *Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [27] B. Ilschner und R. F. Singer, *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*, 6. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [28] V. Vogl, M. Åhman und L. J. Nilsson, „Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 203, S. 736–745, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279.
- [29] Vereinte Nationen, *International Recommendations for Energy Statistics*. New York: United Nations; UN, 2018.
- [30] Vereinte Nationen, *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC)*, 4. Aufl. New York, NY: United Nations, 2008.
- [31] Statistisches Bundesamt, *Klassifikation der Wirtschaftszweige (WG 2008)*. Wiesbaden: destatis, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/klassifikation-wz-2008.html>
- [32] International Energy Agency IEA, „World Energy Balances (2005 edition)“, IEA energy statistics (Beyond 20/20), Paris, 2005.
- [33] International Energy Agency IEA, „World Energy Balances (2010 edition)“, IEA energy statistics (Beyond 20/20), Paris, 2010.
- [34] International Energy Agency IEA, „World Energy Balances (2015 edition)“, IEA energy statistics (Beyond 20/20), Paris, 2015.
- [35] International Energy Agency IEA, „World Energy Balances (2017 edition)“, IEA energy statistics (Beyond 20/20), Paris, 2017.
- [36] International Energy Agency IEA, „World Energy Balances (2018 edition)“, IEA energy statistics (Beyond 20/20), Paris, 2018.
- [37] International Energy Agency IEA, „World Energy Balances (2019 edition)“, IEA energy statistics (Beyond 20/20), Paris, 2019.
- [38] AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), „Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2018: Datenstand 29. April 2021“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://ag->

- energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2019/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020. Zugriff am: 27. Januar 2022.
- [39] M. Kaltschmitt, W. Streicher und A. Wiese, *Erneuerbare Energien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [40] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Zahlen und Fakten: Energiedaten: Nationale und internationale Entwicklung“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>. Zugriff am: 08.02.22.
- [41] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan (NECP)“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/necp.html>. Zugriff am: 08.02.22.
- [42] J. Nitsch *et al.*, „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Stuttgart, Kassel, Teltow, 2012.
- [43] Statista, „Rohstahlerzeugung in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2020“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28355/umfrage/stahlproduktion-von-rohstahl-in-deutschland-seit-1980/>. Zugriff am: 06.02.22.
- [44] World Steel Association, „Steel Statistical Yearbook 2020“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook/>. Zugriff am: 6. Februar 2022.
- [45] Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Informationen zur Stahlkonjunktur in Deutschland“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stahl-online.de/startseite/stahl-in-deutschland/konjunkturinformationen/>. Zugriff am: 6. Februar 2022.
- [46] R. Remus, M. A. Aguado Monsonet, S. Roudier und L. Delgado Sancho, „Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: Industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control“, Europäische Kommission, Luxembourg, Scientific and technical research series JRC 69967, 2013. [Online]. Verfügbar unter:

- <http://bookshop.europa.eu/en/best-available-techniques-bat-reference-document-for-iron-and-steel-production-pbLFNA25521/>.
- [47] M. Arens, E. Worrell, W. Eichhammer, A. Hasanbeigi und Q. Zhang, „Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 163, S. 84–98, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.097.
- [48] International gas Union, „Natural Gas Conversion Guide“, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2012/wgc-2012-proceedings/publications/igu-publications/natural-gas-conversion-guide>.
- [49] C. Murray, *Energy conservation in the mechanical forest industries*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/3/T0269e/t0269e0c.htm>
- [50] D.-A. Chisalita, L. Petrescu, P. Cobden, H. van Dijk, A.-M. Cormos und C.-C. Cormos, „Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 211, S. 1015–1025, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.256.
- [51] IEAGHG, „Iron and Steel CCS Study (Techno-Economic Integrated Steel Mill)“, 2013/04, 2013.
- [52] B. Bender und D. Göhlich, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 1: Grundlagen und Tabellen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [53] A. Bhaskar, M. Assadi und H. Nikpey Somehsaraei, „Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen“, *Energies*, Jg. 13, Nr. 3, S. 758, 2020, doi: 10.3390/en13030758.
- [54] E. Worrell, L. Price, M. Neelis, C. Galitsky und Z. Nan, „World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors“, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://escholarship.org/uc/item/77n9d4sp>. Zugriff am: 2. November 2021.
- [55] M. Fishedick, J. Marzinkowski, P. Winzer und M. Weigel, „Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 84, S. 563–580, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.063.

- [56] Verein deutscher Zementwerke, „Zementindustrie im Überblick 2020/2021“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2021-2022>. Zugriff am: 06.02.22.
- [57] Statista, „Deutsche Zementindustrie - Produktion bis 2020“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161717/umfrage/zementproduktion-in-deutschland-seit-2000/>. Zugriff am: 6. Februar 2022.
- [58] Verein Deutscher Papierfabriken, „Papier Kompass 2020“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.papierindustrie.de/publikationen/angebot>. Zugriff am: 06.02.22.
- [59] Statista, „Produktionsmenge von Papier, Karton und Pappe der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie in den Jahren 2010 bis 2020“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5938/umfrage/produktionsmenge-von-papier-karton-pappe-seit-2006/>. Zugriff am: 06.02.22.
- [60] Verband der Chemischen Industrie, „Chemiewirtschaft in Zahlen 2021“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>. Zugriff am: 06.02.22.
- [61] A. Otto, M. Robinius, T. Grube, S. Schiebahn, A. Praktiknjo und D. Stolten, „Power-to-Steel: Reducing CO₂ through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry“, *Energies*, Jg. 10, Nr. 4, S. 451, 2017, doi: 10.3390/en10040451.
- [62] Umweltbundesamt, „Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen: 1990 - 2018“, Dessau, 15. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>. Zugriff am: 23. November 2021.
- [63] T. Naegler *et al.*, „Integrated Multidimensional Sustainability Assessment of Energy System Transformation Pathways“, *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 9, S. 5217, 2021, doi: 10.3390/su13095217.
- [64] P. Icha, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020“, Dessau-Roßlau, 2021. [Online]. Verfügbar

- unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7>. Zugriff am: 3. November 2021.
- [65] IPCC, „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“, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.), 2018.
- [66] C. Schneider und S. Lechtenböhmer, „Concepts and pathways towards a carbon-neutral heavy industry in the German federal state of North Rhine-Westphalia“ in *Leading the low-carbon transition : ECEEE Industrial Summer Study ; 11-13 June 2018, Berlin, Germany ; proceedings*, 2018, S. 443–453.
- [67] C. Bataille *et al.*, „A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 187, S. 960–973, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.107.
- [68] A. Varone und M. Ferrari, „Power to liquid and power to gas: An option for the German Energiewende“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 45, S. 207–218, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.049.
- [69] T. Hübner, A. Guminski, S. Von Roon und S. Pichlmaier, „Modellgestützte Analyse synthetischer Brennstoffe in der Industrie bei ambitioniertem Klimaschutz“, TU Wien, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://iewt2019.eeg.tuwien.ac.at/download/contribution/fullpaper/237/237_fullpaper_20190220_154723.pdf. Zugriff am: 06.12.21.
- [70] Umweltmagazin, „Thyssenkrupp: erster CO₂-armer Stahl“, *Umweltmagazin*, Jg. 51, 11-12, 2021.

- [71] J. Wittenberg, „Spatial Disaggregation of Future Industrial Hydrogen Demand: Projections for Germany and Europe“. Masterarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), University of Copenhagen, Kopenhagen, 2021.
- [72] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte: Deutsche Fassung*, EN ISO 9241-11:2018, DIN EN ISO.
- [73] M. Speicher, „What is Usability?: A Characterization based on ISO 9241-11 and ISO/IEC 25010“, Fakultät für Informatik, Technische Universität Chemnitz, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://core.ac.uk/download/pdf/153229645.pdf>
- [74] J. Robier, *Das einfache und emotionale Käuferlebnis: Mit Usability, User Experience und Customer Experience anspruchsvolle Kunden gewinnen*. Wiesbaden: Springer-Gabler, 2016.
- [75] C. Linnhoff-Popien, M. Zaddach und A. Grahl, *Marktplätze im Umbruch*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [76] C. Moser, *User Experience Design*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [77] J. Brooke, „SUS-A quick and dirty usability scale“, *Usability evaluation in industry*, Jg. 189, Nr. 194, S. 4–7, 1996.
- [78] J. R. Lewis, „The System Usability Scale: Past, Present, and Future“, *International Journal of Human–Computer Interaction*, Jg. 34, Nr. 7, S. 577–590, 2018, doi: 10.1080/10447318.2018.1455307.
- [79] J. R. Lewis und S. Jeff, Hg., *The factor structure of the system usability scale*. Berlin, Heidelberg: Springer: Springer, 2009.
- [80] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Interaktionsprinzipien: Deutsche Fassung*, EN ISO 9241-11:2018, DIN EN ISO.
- [81] International Energy Agency IEA, „Database documentation World Energy Balances (2021 edition)“, International Energy Agency, Paris, 2021.
- [82] K.-R. Hegemann und R. Guder, *Roheisenerzeugung: Hüttenwerks- und Gasreini-gungsanlagen*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.
- [83] P. Eyerer *et al.*, „Stoffbilanzen als Grundlage für die technische, ökonomische und ökologische Beurteilung von Produktionsprozessen und Produkten“ in *Handbuch*

- des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik*, H. Brauer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996, S. 1–78, doi: 10.1007/978-3-642-60943-5_1.
- [84] J. Götze und M. Göbbels, *Einführung in die Angewandte Mineralogie*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2017.
- [85] Sormak Mining Company, *The Analysis of Hematite Iron Ore: Bild Eisenerz*. [Online]. Verfügbar unter: <http://sormakmine.com/de/products/137> (Zugriff am: 25. Oktober 2021).
- [86] Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stahl-online.de/publikationen/fakten-zur-stahlindustrie/>. Zugriff am: 1. November 2021.
- [87] R. Geiss, *Die Verwandlung der Stoffe*, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2017.
- [88] L. Bogdandy und H. J. Engell, *Die Reduktion der Eisenerze: Wissenschaftliche Grundlagen und technische Durchführung*. Springer Berlin Heidelberg, 1967.
- [89] E. Bäck, J. Schenk, K. Badr, A. Sormann und J. F. Plaul, „Wasserstoff als Reduktionsmittel für die Eisen- und Rohstahlerzeugung – Ist-Situation, Potentiale und Herausforderungen“, *Berg Huettenmaenn Monatsh*, Jg. 160, Nr. 3, S. 96–102, 2015, doi: 10.1007/s00501-015-0346-5.
- [90] S. Li, H. Zhang, J. Nie, R. Dewil, J. Baeyens und Y. Deng, „The Direct Reduction of Iron Ore with Hydrogen“, *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 16, S. 8866, 2021, doi: 10.3390/su13168866.
- [91] K. Rechberger, A. Spanlang, A. Sasiain Conde, H. Wolfmeir und C. Harris, „Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking“, *steel research int.*, Jg. 91, Nr. 11, S. 2000110, 2020, doi: 10.1002/srin.202000110.
- [92] C. Schneider, S. Samadi, G. Holtz, G. Kobiela, S. Lechtenböhmer und W. Witecka, „Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement: Analyse im Auftrag von Agora Energiewende“, Berlin, 2019.

- [93] K. West, „Low-temperature electrowinning for steelmaking (ulcowin): Technology Factsheet“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://energy.nl/en/data/low-temperature-electrowinning-for-steelmaking-ulcowin>. Zugriff am: 13.03.22.
- [94] Y. Junjie, „Progress and Future of Breakthrough Low-carbon Steelmaking Technology (ULCOS) of EU“, *IJMPEM*, Jg. 3, Nr. 2, S. 15, 2018, doi: 10.11648/j.ijmpem.20180302.11.
- [95] H. Lavelaine de Maubeuge *et al.*, „Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high CO₂ mitigation (IERO): Final report“, Europäische Kommission, Luxembourg EUR-28065-EN, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://bookshop.europa.eu/en/iron-production-by-electrochemical-reduction-of-its-oxide-for-high-co2-mitigation-iero--pbKINA28065/>.
- [96] W. Lohse, J. Laumann und C. Wolf, *Stahlbau: Bemessung von Stahlbauten nach Eurocode mit zahlreichen Beispielen*, 25. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [97] V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Klimaschutz*, 10. Aufl. München: Hanser, 2019.
- [98] P. Fragkos, „Assessing the Role of Carbon Capture and Storage in Mitigation Pathways of Developing Economies“, *Energies*, Jg. 14, Nr. 7, S. 1879, 2021, doi: 10.3390/en14071879.
- [99] M. Neuwirth, T. Fleiter, P. Manz und R. Hofmann, „The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany“, *Energy Conversion and Management*, Jg. 252, S. 115052, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.115052.
- [100] S. Lechtenböhmer, S. Samadi, A. Leipprand und C. Schneider, „Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende?“, *Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt*, Jg. 69, Nr. 10, S. 10–13, 2019, Art. no. 18028.
- [101] G. Luderer, C. Kost und Dominika, „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich“, 2021, doi: 10.48485/pik.2021.006.
- [102] P. Horng und M. Kalis, „Kurzstudie Wasserstoff - Farbenlehre“, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Berlin Brandenburg, 2020.

- [103] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Berlin, 2020.
- [104] M. Sterner, M. Jentsch und U. Holzhammer, „Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes“, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel, 2011.
- [105] J. Töpler und J. Lehmann, *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [106] S. Schiebahn, T. Grube, M. Robinius, V. Tietze, B. Kumar und D. Stolten, „Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 40, Nr. 12, S. 4285–4294, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.123.
- [107] T. Dreier und U. Wagner, „Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft“, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V, München, Vortragsreihe Naturwissenschaften, 2007.
- [108] Universität Stuttgart IER, *Skript KWK*. Stuttgart, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ier.uni-stuttgart.de/lehre/praktika/unterlagen/Skript-KWK.pdf>
- [109] G. Schaumann und K. W. Schmitz, *Kraft-Wärme-Kopplung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

9 Anhang

Dieser Arbeit liegen verschiedene modellrelevante Dateien zugrunde, welche relevante Ergebnisse beinhalten und das Beschriebene untermauern:

Dateiname	Beschreibung	Anhang Nr.
model.xlsx	: Das Modell	1
input_data_industry_DE.xlsx	: Die Daten des Modells	2
Results_Mean_All.xlsx	: Die Ergebnisse des Szenarios <i>All Technologies</i> mit gemitteltem Emissionsfaktor für den Strom	3
Results_Mean_Ref.xlsx	: Die Ergebnisse des Szenarios <i>Reference</i> mit gemitteltem Emissionsfaktor für den Strom	4
Results_Mean_El.xlsx	: Die Ergebnisse des Szenarios <i>Electrification</i> mit gemitteltem Emissionsfaktor für den Strom	5
Results_Mean_CE.xlsx	: Die Ergebnisse des Szenarios <i>Coal-Exit</i> mit gemitteltem Emissionsfaktor für den Strom	6
Results_Mean_CC.xlsx	: Die Ergebnisse des Szenarios <i>Carbon-Capture</i> mit gemitteltem Emissionsfaktor für den Strom	7
Results_Min_All.xlsx	: Die Ergebnisse des Szenarios <i>All Technologies</i> mit Minimum Emissionsfaktor für den Strom	8
Results_Max_All.xlsx	: Die Ergebnisse des Szenarios <i>All Technologies</i> mit Maximum Emissionsfaktor für den Strom	9
Enduser_Guideline.pdf	: Guideline für die Nutzung von LENS	10

Anhang 11: Technische Systemgrenzen der Statistiken

► *Systemgrenzen der internationalen Statistik der IEA*

Für diese Arbeit sind alle Definitionen von Bedeutung, die den Industriesektor teilweise oder vollständig betreffen. Dabei wird der Industriesektor eingeteilt in die vier Hauptsubsektoren *Mining and Quarrying*, *Construction*, *Industry not elsewhere specified* und *Manufacturing*. Letzterer wird noch einer weiteren Untergruppierung unterzogen und so befinden sich im Subsektor *Manufacturing* die zehn Untersektoren *Iron and Steel*, *Chemical and Petrochemical*, *Non-ferrous Metals*, *Non-metallic Minerals*, *Transport Equipment*, *Machinery*, *Food and Tobacco*, *Paper, Pulp and Print*, *Wood and Wood Products* und *Textile and Leather*. Da der Subsektor *Manufacturing* also nur die Summe seiner Untersektoren darstellt und auch in der Statistik keine zusätzlichen Informationen liefert, wird dieser hier entfernt und seine Subsektoren als zusätzliche Hauptsubsektoren geführt. Dadurch ergeben sich 13 Subsektoren, die in Summe den Industriesektor abbilden [81].

Für die Einordnung der Prozesse in die Sektoren nutzt die IEA die Klassifizierung der *International Recommendations for Energy Statistics (IRES)* [29], welche sich im Wesentlichen auf die *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC)* der UN [30] beruft. Diese Klassifikation untergliedert alle industriellen Prozesse mittels einer *Top-Down* Methode in 21 Sektionen, darunter 99 Bereiche und weitere Gruppen und Klassen [30]. Die detaillierten Zuordnungen sowie die Zusammenfassung aller Subsektoren sind in Abbildung 9.1 zu sehen.

Industry	
Mining and Quarrying	Bereich 07 und 08 und Gruppe 099
Construction	Bereich 41 - 43
Iron and Steel	Gruppe 241 und Klasse 2431
Chemical and Petrochemical	Bereich 20 und 21
Non-ferrous Metals	Gruppe 242 und Klasse 2432
Non-metallic Minerals	Bereich 23
Transport Equipment	Bereich 29 und 30
Machinery	Bereich 25 - 28
Food and Tobacco	Bereich 10 - 12
Paper, Pulp and Printing	Bereich 17 und 18
Wood and Wood Products	Bereich 16
Textile and Leather	Bereich 13 - 15
Industry not elsewhere specified	Bereich 22, 31 und 32 ¹

Abbildung 9.1: Aufteilung des Industriesektors in seine Subsektoren und der jeweiligen Prozesszuordnung nach ISIC

¹ Der Subsektor „Industry not elsewhere specified“ enthält neben den genannten Bereichen auch alle weiteren nicht explizit zugeordneten Bereiche der Industrie.

Besonderes Augenmerk wird auf den Subsektor *Iron and Steel* gelegt, welcher deshalb nachfolgend auch beispielhaft beschrieben wird. Tiefergehende Informationen zu den übrigen Subsektoren können der ISIC entnommen werden.

Die in Abbildung 9.1 zum Stahlsektor zugeordneten Prozesse entsprechen:

→ Gruppe 241 – *Manufacture of basic iron and steel*

Diese Gruppe beinhaltet den Betrieb von Hochöfen, Sauerstoffblaskonvertern, Direktreduktionsanlagen, Elektrolichtbogenöfen, Eisenelektrolyse, Stahlrecycling und einigen Rohstahlverarbeitungs- und Veredelungsprozessen. [30]

→ Gruppe 243 – Klasse 2431 – *Casting of iron and steel*

Diese Klasse beinhaltet alle dem Urformverfahren *Gießen* zugehörigen Erzeugnisse wie Halbzeuge und endkonturnahen Stahlprodukte. [30]

Hingegen die Produktion von Koks, Eisenerzsinter und Eisenerzpellets sind ausdrücklich nicht in dieser Gruppe bzw. Klasse enthalten, obwohl sie auch für die Stahlerzeugung benötigt werden. Sinter und Pelletieranlagen werden dem Bereich 07 und damit dem Sektor *Mining and quarrying* zugeordnet. Der Betrieb von Koksöfen und die damit verbundene Koksherstellung wird der Klasse 1910 zugeordnet und gehört damit eigentlich dem Sektor *Industry not elsewhere specified* an. Jedoch setzt die IEA hier die Systemgrenzen ungleich. Koksöfen sind explizit im Energiesektor aufgelistet und werden deshalb nicht im Industriesektor abgebildet. Ähnlich verhält es sich mit KWK Anlagen. Aufgrund historischer Gegebenheiten hat das IEA Sekretariat zudem Anfang der 90er Jahre entschieden, die komplexen Hochofen-Prozesse für die Statistik zwei unterschiedlichen Sektoren zuzuweisen. Zum einen die Abbildung als Transformationsprozess von Eingangsenergie in Wärme und andere Prozessenergien, welche alle auch dem Energiesektor und damit nicht dem Industriesektor zugeordnet werden. Zum anderen die Stoffumwandlung für die Bilanzierung von Ein- und Ausgangsmaterialien, welche im Subsektor *Iron and Steel* aufgeführt wird. Darüber hinaus werden im gesamten Industriesektor jegliche Energiebedarfe für Transporte mittels Straßen, Schienen, Pipelines oder andere Transportwege ausgeschlossen. Diese werden separat im Transportsektor aufgeführt [81][30].

► ***Systemgrenzen der nationalen Statistik der AGEB***

Gegenüber der internationalen Statistik definiert die nationale Statistik teilweise abweichende Systemgrenzen. Die deutsche Statistik der AGEB klassifiziert die Industrieprozesse nach der *Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008)*. Diese bezieht sich auf die internationalen systematischen Standards und bildet damit die in der ISIC definierten Klassen weitestgehend für Deutschland ab [31]. Durch die Übertragung der internalen ISIC auf die nationalen Gegebenheiten entstehen abweichende Klassifizierungen in der WZ 2008. So gibt es hier beispielsweise keine explizite Klasse für die Gießereiprozesse der Eisenmetalle und auch die Energiebedarfe der dargestellten Subsektoren stimmen nicht zwingend überein. Außerdem werden die Prozessklassen den Subsektoren abweichend derer der IEA zugeordnet. Eine Gegenüberstellung der

Subsektoren der Stahl-, Chemie-, Zement-, sowie Bergbauindustrie findet sich in Abbildung 9.2.

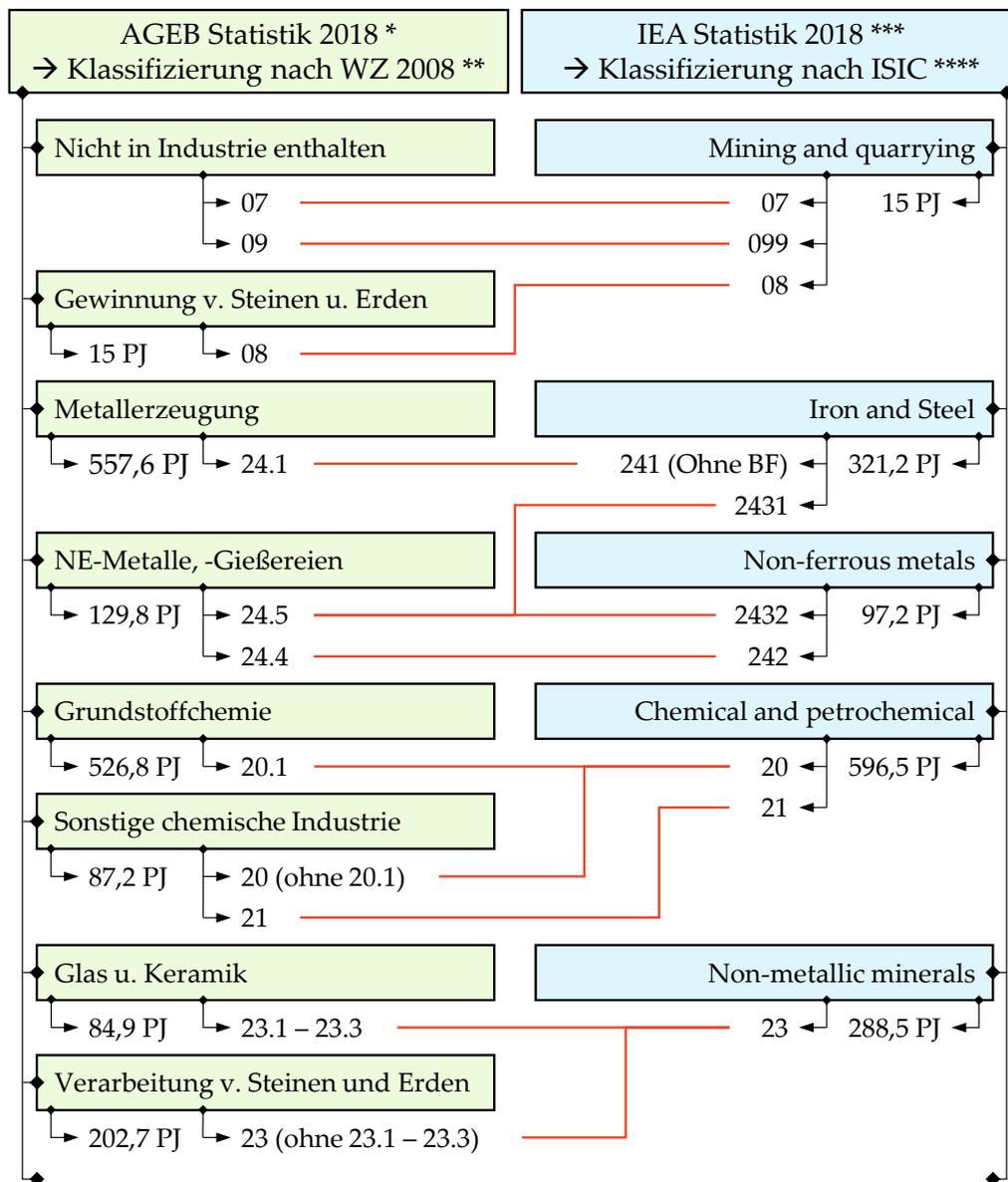


Abbildung 9.2: Systemgrenzen im Stahlsektor in unterschiedlichen Quellen
(* [38], ** [31], *** [36], **** [30])

Bei den Subsektoren der Chemie- und Zementindustrie ist in der AGEB Statistik lediglich eine zusätzliche Unterteilung vorgenommen worden. Ein Vergleich zwischen AGEB und IEA kann an dieser Stelle durch einfache Addition der Sektoren erfolgen. Nach der Addition der dargestellten sektorspezifischen FED ergeben sich folgende Abweichungen:

- Differenz in der Chemieindustrie: 17,5 PJ (2,8 %)
- Differenz in der Zementindustrie: 0,9 PJ (0,3 %)

Die Fehler liegen deutlich unter 5 % und sind damit akzeptabel. Auffällig ist allerdings, dass der absolute Fehler der Chemieindustrie bereits über dem FED der Bergbauindustrie liegt. Damit wird deutlich, welchen verschwindend kleinen Einfluss die Sektoren mit niedrigem FED in Relation zu den großen Subsektoren haben. Bei Letzteren führt bereits die Wahl der statistischen Daten zu größeren Unsicherheiten, als die kleinen Subsektoren jeweils zum FED beitragen.

Schwieriger hingegen ist es bei den Subsektoren der Stahl- und Bergbauindustrie. Hier werden Prozessklassen anderen Sektoren zugeordnet und sogar die Klassifizierungen unterscheiden sich hier teilweise zwischen ISIC und WZ 2008. Die Gießereiprozesse 2431 und 2432, die in der IEA Statistik nach Metallen und NE-Metallen getrennt sind, werden in der AGEB Statistik aggregiert betrachtet. In der Bergbauindustrie dagegen werden die Prozesse 07 und 099, darunter zählen auch die Sinter- und Pelletierprozesse, komplett aus den Systemgrenzen der Industrie ausgeschlossen.

Anhang 12: Beschreibungen der relevanten Prozesse

► *Herstellung von Koks in Kokereien*

Für die Stahlherstellung ist die Verkokung von Kohle essenziell, da dies im Hochofen als Brennstoff, Reduktions- und Aufkohlungsmittel verwendet wird. Oft erfolgt die Kokserzeugung direkt im Hüttenwerk, aber auch im Bergbau werden Kokereien betrieben. Dabei wird Kohle in einem Pyrolyseprozess, also unter Sauerstoffausschluss auf etwa 1000 °C erhitzt, um so Verunreinigungen aus der Kohle zu entfernen. Als Nebenprodukt entsteht dabei Kokereigas (Englisch *Coke Oven Gas*, kurz CO Gas) [82][83].

► *Aufbereitung des Eisenerzes*

Das Rohmaterial für die Stahlherstellung ist Eisen, das in der Natur nicht elementar, sondern nur in Form chemischer Verbindungen, z.B. als Oxid, Sulfid oder Karbonat, vorkommt. Der Eisengehalt in diesen Bindungen kann bis zu 70 Masse-% erreichen, liegt aber üblicherweise bei rund 30 – 60 Masse-%. Die hauptsächlich verwendeten Eisenerze sind Magnetit (Fe_3O_4), Hämatit (Fe_2O_3) und Limonit ($2 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$) [84][82][27].

Das Eisenerz durchläuft vor der Zufuhr in die Stahlherstellung einen Aufbereitungsprozess. Dieser hat verschiedene Ziele. Zum einen soll das Eisenerz angereichert werden, d.h. der Eisengehalt soll durch die Trennung von Eisen und Gangart (unverwertbare Mineralstoffe) erhöht werden. Zum anderen müssen Eisensulfide und Eisenkarbonate durch Röstprozesse in Eisenoxide überführt werden, da nur letztere für die Roheisenherstellung geeignet sind. Außerdem müssen die Erze auf eine geeignete Größe gebracht werden, um der Roheisenherstellung zugeführt werden zu können. Große Stücke des Erzes, sogenannte Groberze, werden durch Brecher und Mühlen zerkleinert, bis die Zielgröße erreicht ist und Stückerze hergestellt wurden. Dabei werden die gebrochenen Stücke durch Magnetscheider und Flotationszellen in eisenhaltige und nichteisenhaltige Stücke getrennt. So wird das Erz angereichert. Feinerze mit einer Korngröße von 0,1 – 6 mm werden, zusammen mit Zusätzen wie Koks, Kalk, etc., gesintert und anschließend gebrochen. Feinsterze mit einer Korngröße $<0,1$ mm werden zu Pellets verarbeitet, indem sie mit Bindemittel geformt und gebrannt werden. An dieser Stelle wird

das Eisenerz in seinen verschiedenen Formen der Stahlherstellung zugeführt. Die Wege der Vorverarbeitung des Eisenerzes sind in Abbildung 9.3 dargestellt [82][27].

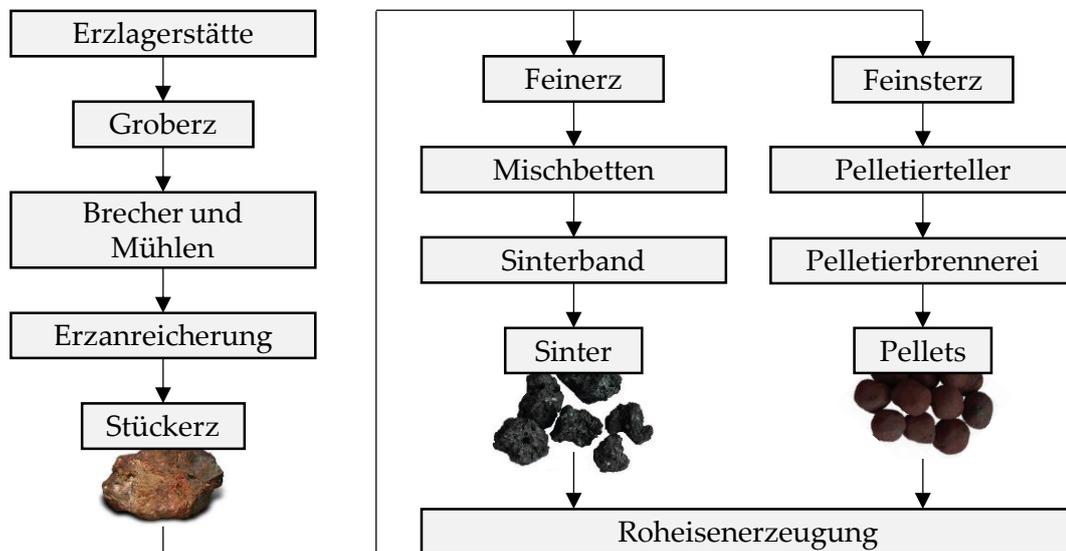


Abbildung 9.3: Aufbereitungsverfahren von Eisenerz
Bildquellen: [82][85]

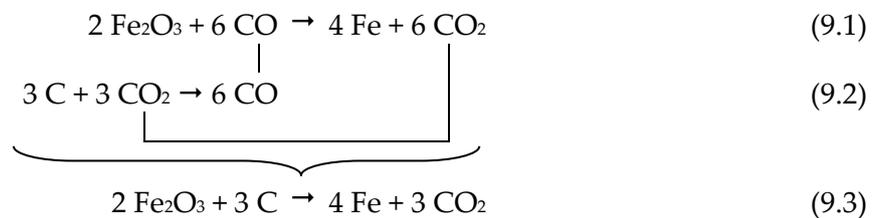
► Roheisenherstellung durch den Hochofenprozess

Für die Herstellung von Stahl müssen die Ausgangsmaterialien, bzw. die Erze zum eigentlichen Metall reduziert werden. Dieser Prozess heißt auch Verhüttungsprozess oder verhütten, was aus dem traditionellen Begriff der Hütte für ein Werk, welches Erz zu Metall reduziert, entspringt. Ziel dessen ist die Erzeugung zweier nicht mischbarer Schmelzen, genauer der Schlackenschmelze, die alle unerwünschten Verunreinigungen enthält, und der nutzbaren Metallschmelze [84].

Der Hochofen (Englisch *Blast Furnace*, kurz BF) ist die klassische Art der Roheisenherstellung und besitzt mit 70% Marktanteil auch heute noch den größten Anteil in der deutschen Stahlindustrie [86]. Für die Herstellung von Roheisen werden hier aufbereitete Eisenerze zusammen mit Koks (wärmebehandelter Kohlenstoff) und weiteren Zusatzstoffen dem Hochofen zugeführt. Durch das Einströmen von Heißwind kommt es zu Reaktionen im Hochofen und die Einsatzstoffe sinken reagierend und reduzierend nach unten, während der Heißwind aufsteigt und zu Gichtgas wird. Durch die Zufuhr des Kohlenstoffs wird dem Eisenoxid der Sauerstoff entzogen und es entstehen reines Eisen und Kohlenstoffdioxid [84][82].

Neben dem CO₂ als Abfallprodukt der Eisenreduktion entsteht auch die Schlackenschmelze. Diese wird bereits vollständig in anderen Industriebereichen, wie Zement, Beton oder Düngemittel, wiederverwendet [82].

Durch die hohen Temperaturen laufen im Inneren des Hochofens sehr viele komplexe Reaktionen ab. Eine detaillierte Beschreibung dieser chemischen Prozesse kann z.B. in [87] nachgelesen werden. Die Reaktionsgleichung, die die Reduktion des Eisenerzes mit Koks beschreibt, wird durch Gleichung (9.1) ausgedrückt. Die Kohlevergasung, also die Erzeugung des CO für die Reduktionsreaktion beschreibt Gleichung (9.2). Die Summe beider Reaktionen ergibt die Bruttoreaktion des Reduktionsprozesses im Hochofen, Gleichung (9.3) [84][27][88].



► *Direktreduktion*

Unter Direktreduktion (Englisch *Direct Reduction*, kurz DRI) wird allgemein ein Verfahren verstanden, das Eisenerze mit Gas oder Kohle zu einem porigen Eisenschwamm (Englisch *Hot Briquetted Iron*, kurz HBI) nach Gleichung (9.4) reduziert. Der Eisenschwamm stellt dabei die Alternative zum Roheisen des Hochofenprozesses dar und kann entsprechend in einem nachfolgenden Prozessschritt zu Stahl weiterverarbeitet werden. In Deutschland gibt es aktuell eine Direktreduktionsanlage, die etwa 1% der Stahlproduktion ausmacht [6][27][89][90][91].



Das aktuell am weitesten verbreitete Verfahren ist das Midrex-Verfahren, das die Eisenerze in einem Schachtofen unter gegenstromartiger Zufuhr des Gasgemisches reduziert. Die Reduktion zum Eisenschwamm stellt eine endotherme Reaktion dar, weshalb das Gasgemisch auf etwa 800 °C erhitzt wird, um die Reduktionsreaktionen in Gang zu setzen. Als Reduktionsgas wird hierfür Wasserstoff oder Erdgas (CH₄) verwendet. Als Nebenprodukt entsteht reines Wasser und zusätzlich, im Fall des Betriebs mit Erdgas, eine gewisse Menge prozessbedingtes CO₂ [6][27][28].

Durch den Umstieg auf Wasserstoff als Reduktionsmittel verschiebt sich der Energiebedarf für die Primärstahlherstellung stark auf den Strombedarf, welcher auf die Wasserstoffherstellung zurückzuführen ist [92].

Als Eingangsstoff für die Direktreduktion muss das Eisenerz in pelletierter Form vorliegen, da die Abtrennung der Gangart in dem Prozess nicht möglich ist und daher ein hoher Reinheitsgrad des Erzes vorliegen muss [27].

► **Eisenelektrolyse**

Die Eisenelektrolyse (Englisch *Electrowinning*, kurz EW) ist ein Verfahren zur Herstellung von Roheisen ohne den Einsatz eines Reduktionsmittels. Es beruht auf dem Elektrolyseprinzip, bei dem zwei Elektroden in einer Lösung (Elektrolyt) mit Strom beaufschlagt werden. Im Falle von Eisen soll das Hämatit Fe_2O_3 in Natronlauge bei einer Prozesstemperatur von etwa 100 °C elektrolytisch gespalten werden. Die negativ geladenen Sauerstoffionen werden von der Anode angezogen und an der Oberfläche des Elektrolyten freigesetzt. Das elementare Eisen mit positiver Ladung setzt sich auf der Kathode in kristalliner Form ab. So entsteht nach und nach reines Roheisen ohne ein Reduktionsmittel [6][67][93][94][95]. Für Kupfer beispielsweise wird dies bereits durchgeführt [27].

Dieser Prozess befindet sich noch im Forschungsstadium und es ist erst gegen Mitte des Jahrhunderts mit einer Marktreife zu rechnen [6].

► **Schmelzreduktion**

Das Verfahren der Schmelzreduktion reduziert Eisenerz in einem speziellen Reaktor, der das Eisenerz unter Energiezufuhr stark erhitzt und zum Schmelzen bringt. Dabei entsteht ein nahezu reiner CO_2 -Abgasstrom. Auf die Eisenerzaufbereitung kann bei diesem Verfahren komplett verzichtet werden. Aktuell gibt es einen Prototypen dieser Anlagen, der unter dem Namen HISARNA bekannt ist [6]. Im Rahmen dieser Arbeit sollen nur neuartige Technologien betrachtet werden, die ein Übergang in eine klimaneutrale Industrie ermöglichen. Das heißt, die Emissionen sollen nahezu oder vollständig auf Null reduziert werden. Aus diesem Grund wird das Schmelzreduktionsverfahren hier nicht weiter betrachtet.

► **Sauerstoffblaskonverter**

In der Rohstahlherstellung, auch Primärmetallurgie genannt, wird einfachster unlegierter Stahl produziert. Das Roheisen aus der Roheisenherstellung weist einen sehr hohen Kohlenstoffanteil mit bis zu 4,8 % auf und ist dadurch sehr spröde und nicht schmiedbar. Ein weiterer Prozessschritt ist daher notwendig, um aus dem Roheisen ein Rohstahl mit den gewünschten Eigenschaften zu erzeugen. Dabei werden der Kohlenstoffgehalt reduziert, unerwünschte Verunreinigungen entfernt und Legierungselemente hinzugefügt [84].

Im Sauerstoffblaskonverter (Englisch *Basic Oxygen Furnace*, kurz BOF) findet die Primärmetallurgie im Anschluss an die Roheisenherstellung im Hochofen statt. Dabei wird in das flüssige Roheisen im Konverter durch eine Sauerstofflanze Sauerstoff geblasen, was zu einer starken exothermen Reaktion mit dem Kohlenstoff im Roheisen führt. Aus diesem Grund wird der Stahl, der mit diesem Verfahren hergestellt wird, auch Sauerstoffstahl genannt. Das entstehende Kohlenstoffmonoxid entweicht und senkt so den Kohlenstoffgehalt im Roheisen. Dieser Prozess wird auch „Frischen“ genannt und durch Gleichung (9.5) beschrieben [84][27].



Diese exotherme Reaktion der Entkohlung heizt das Roheisen im Konverter stark auf. Für die Regulierung der Temperatur wird deshalb Stahlschrott mit definierter Zusammensetzung zugegeben [84][27].

Neben der Entkohlung wird dem Roheisen im Konverter auch Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel entzogen. Die dadurch entstehenden Nebenprodukte sind für diese Arbeit allerdings nicht relevant und werden keiner weiteren Betrachtung unterzogen [84].

► **Elektrolichtbogenofen**

Der Elektrolichtbogenofen (Englisch *Electric Arc Furnace*, kurz EAF) setzt im Gegensatz zum BOF kein flüssiges Roheisen voraus. Hier wird festes Roheisen in Form von Stahlschrott oder Eisenschwamm durch einen Lichtbogen aufgeschmolzen, wobei weiterhin das Ziel der Reduktion des Kohlenstoffgehaltes und der Verunreinigungen im

Roheisen verfolgt wird. Der Lichtbogen, der die Energie für die Überführung des Roh-eisens vom festen in den flüssigen Zustand liefert, brennt zwischen den Kohleelektroden durch Stromzufuhr. Der benötigte Sauerstoff für den Frischungsprozess wird, wie im Sauerstoffblaskonverter, durch Aufblasen zugeführt. Der hierbei erzeugte Stahl heißt, bedingt durch den hohen Stromeinsatz, Elektrostahl [27].

► ***Stahlherstellung (Finishing)***

Im Anschluss an die Rohstahlerzeugung folgen einige weitere Nachbehandlungen. In der Sekundärmetallurgie können durch die Zugabe von Legierungselementen die Stahleigenschaften gezielt eingestellt werden. Außerdem werden gelöste Gase entfernt, die sonst beim Abkühlen unerwünschte Reaktionen erzeugen [27]. Darauf folgen Verfahren des Urformens wie Stranggussanlagen. In weiteren Prozessschritten wird der Stahl durch verschiedene Umformungsprozesse in seine verkaufsfertige Form gebracht. Nach einer anschließende Oberflächenveredelungen wird der Stahl auf dem Stahlmarkt vertrieben [96]. Diese Prozesse, angefangen bei der Sekundärmetallurgie bis einschließlich der Oberflächenveredelung, werden als *Finishing* zusammengefasst.

► ***CO₂ Reduktion durch Abscheidung und Speicherung***

Als Alternative oder Ergänzung zur Substitution alter Technologien durch neue klimafreundlichere wird derzeit ebenso der Einsatz von CO₂-Abscheidung und Speicherung diskutiert. Entsprechend der hohen Präsenz dieser Technologie in Forschung und Entwicklung gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze und Kombinationsmöglichkeiten von Verfahren, die CO₂ innerhalb und/oder außerhalb eines Produktionsprozesses abscheiden. Tiefgehende Informationen können beispielsweise Fishedick et al. [20] entnommen werden. Nachfolgend wird auf die Kerneigenschaften des Prozesses eingegangen.

Prinzipiell ist die Technologie zweigeteilt zu betrachten. Der erste Teil umfasst die eigentliche Abscheidung des CO₂ durch verschiedene technische Verfahren (englisch *Carbon Capture*, kurz CC). Der anschließende Teil befasst sich mit dem weiteren Umgang mit der abgetrennten Menge CO₂. Hier gibt es unterschiedliche Ansätze. Wichtig für diese Arbeit ist die Speicherung des CO₂ in Endlagerstätten wie beispielsweise

stillgelegten Minen oder geeigneten geologischen Schichten (Englisch *Carbon Capture and Storage*, kurz CCS). Damit wird das Ziel verfolgt, das CO₂ gänzlich aus dem Gesamtsystem zu entfernen und so für eine Verbesserung der Klimabilanz zu sorgen [67][20][82][50][51][97][98].

Der eigentliche Abscheideprozess wird heute oft mit chemischer Abscheidung des CO₂ aus dem Abgas durch Abgaswäsche unter zusätzlichem Energieeinsatz betrieben, wozu eine geeignete Chemikalie als Waschmittel benötigt wird. Durch diesen Chemisorptionsprozess wird eine sehr hohe Reinheit des Abgases erreicht, weshalb dieser Prozess heute den größten Marktanteil in der CO₂-Abtrennung besitzt. Als Waschmittel werden *Monoethanolamin* (MEA), *Diethanolamin* (DEA) oder *Methyldiethanolamin* (MDEA) verwendet. CC-Prozesse werden spezifisch an den Produktionsprozess angepasst, um möglichst hohe Reinheiten und Wirkungsgrade zu erreichen. Neben der chemischen Abgaswäsche werden weitere Verfahren entwickelt, wie physikalische Absorptionsprozesse, Kryogenverfahren oder auch natürliche Einbindung mittels Algen [67][20][50][51][98].

► **Wasserstoffelektrolyse**

In vielen Energieszenarien spielt Wasserstoff als Energieträger für den Industriesektor besonders zu Beginn der Energiewende eine der wichtigsten Rollen. Hier werden bis 2030 bereits große Mengenbedarfe erwartet [71][99][100]. Neben der Stahl-Direktreduktion in dem Modell dieser Arbeit sollen auch andere Industrieprozesse, wie z.B. Ammoniakherstellung oder Raffinerien, für einen frühen Einsatz von Wasserstoff geeignet sein [101].

Wasserstoff muss durch technische Prozesse gewonnen werden, die Energie benötigen. Der für das Modell vollständig klimaneutrale Wasserstoff wird als grüner Wasserstoff bezeichnet. Die Energie für die Herstellung von grünem Wasserstoff muss zu 100% aus erneuerbaren Energien wie Wasser, Wind und Sonne stammen. Darüber hinaus gibt es weitere Wasserstoffarten, wie schwarzen oder blauen Wasserstoff, die alle gemeinsam haben, dass sie aus der Umwandlung fossiler Brennstoffe gewonnen werden und damit

CO₂-Emissionen entstehen [97][102][103]. Die Auseinandersetzung damit ist nicht Fokus dieser Arbeit.

Im Rahmen diese Arbeit wird nur der Elektrolyseprozess betrachtet, da dieser bereits technisch anwendbar ist und ausreichend Daten zur Verfügung stehen. Hierbei wird Wasser unter Einsatz von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Dabei sind Wirkungsgrade von bis zu 85 % möglich [97], liegen aber üblicherweise zwischen 64 % und 77 % [104]. Verschiedene Elektrolyseverfahren werden aktuell für die großtechnische Anwendung verfolgt, darunter die alkalische Elektrolyse, die PEM-Elektrolyse (PEM= *proton exchange membrane*) und die Hochtemperatur-Elektrolyse [97][105][106]. Neben dem energetischen Einsatz für die Produktion gibt es auch Energiebedarfe für die Speicherung und den Transport für Wasserstoff, die in einer Gesamtbilanz nicht unbeachtet bleiben dürfen [107].

► **Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung**

Als Kraft-Wärme-Kopplung (kurz KWK) werden Anlagen beschrieben, die gleichzeitig Strom und Wärme erzeugen. Mit KWK lassen sich höhere Wirkungsgrade erzielen und damit Brennstoffe effizienter nutzen als in den Einzelanwendungen für Strom und Wärme [20][108][109].

Besonders in der Industrie sind KWK Anlagen oft direkt an Produktionsprozesse gekoppelt und nutzen die Abgase für die Erzeugung von Strom und Wärme [20][108][109].

Physikalisch wird eine KWK Anlage typischerweise durch drei Kennzahlen beschrieben [108][109]:

Die Stromkennzahl s , welche das Verhältnis von erzeugter elektrischer Leistung zu abgeführter Nutzwärme angibt (Formel (9.6)).

$$s = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} \quad (9.6)$$

Der thermische Wirkungsgrad η_{th} , der das Verhältnis zwischen abgeführter Nutzwärme und zugeführter Brennstoffleistung angibt (Formel (9.7)).

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{W}_{Br}} \quad (9.7)$$

Der elektrische Wirkungsgrad η_{el} , der das Verhältnis zwischen erzeugter elektrischer Leistung und zugeführter Brennstoffleistung angibt (Formel (9.8)).

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{W}_{Br}} \quad (9.8)$$

Durch Einsetzen von Formel (9.7) und (9.8) in (9.6) ergibt sich der Zusammenhang zwischen den Wirkungsgraden und der Stromkennzahl einer KWK in Formel (9.9), sowie dessen Gesamtwirkungsgrad in Formel (9.10). Diese Gleichungen werden in Kapitel 3.3.2 in das Modell eingebunden und für die Berechnung der Energiebedarfe verwendet.

$$s = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (9.9)$$

$$\eta_{ges} = \frac{\dot{Q}_{Nutz} + P_{el}}{\dot{W}_{Br}} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (9.10)$$

► Grundlagen der Wärmepumpe

Mit einer Wärmepumpe kann Nutzwärme durch den Einsatz von Energie aus einem Temperaturreervoir, üblicherweise die Umgebungswärme, gewonnen werden. Die Nutzwärme kann für die Beheizung von Nieder- bis Mitteltemperaturprozessen oder Gebäuden verwendet werden.

Gekennzeichnet wird die Wärmepumpe durch die Leistungszahl und den Wirkungsgrad der Anlage, wobei zu beachten ist, dass unter dem Aspekt der allgemeinen Elektrifizierung in Zukunft hier nur elektrisch betriebene Wärmepumpen betrachtet werden.

Die Leistungszahl ε_i (Englisch *Coefficient of Performance*, kurz COP) berechnet sich aus dem Verhältnis von abgeführter Nutzwärme Q_{HP} zu zugeführter mechanischer Arbeit W des Motors. Letzteres lässt sich durch den Wirkungsgrad η auf den zugeführten Energieträger E zurückrechnen. Daraus ergeben sich die Formeln (9.11) und (9.12), welche in Kapitel 3.3.2 Anwendung finden [39].

$$\varepsilon_i = COP = \frac{Q_{HP}}{W} \quad (9.11)$$

$$\varepsilon_i = COP = \frac{Q_{HP}}{\eta \cdot E} \quad (9.12)$$