



Technische Universität München  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

## **Modellierung von Transformationspfaden für einen optimierten Energieeinsatz im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen**

**Thomas Zipperle**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

**Vorsitzender:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Erwin Biebl

**Prüfer der Dissertation:**

1. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Prof. Dr. rer. pol. Valentin Bertsch

Die Dissertation wurde am 29.10.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 17.03.2020 angenommen.



## Zusammenfassung

Die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf unter 1,5 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit stellt eine der größten globalen Herausforderungen der Weltgemeinschaft im 21. Jahrhundert dar. Die Erreichung dieses Ziels erfordert ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in allen Bereichen. In dieser Arbeit werden mögliche technologische Transformationspfade des deutschen Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen hin zu einer klimafreundlichen Energieversorgung bis 2050 untersucht. Die Modellierung des heterogenen Sektors erfolgt für sieben Anwendungsbereiche und 13 Branchen mithilfe des eigens entwickelten linearen Optimierungsmodells *MESSAGEix-GHD*.

Die Ergebnisse der Szenario-, Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse zeigen, dass unter den aktuellen politischen und technologischen Rahmenbedingungen das 95 %-Klimaziel der Bundesregierung nicht erreicht wird. Zeitgleich deckt die Modellierung jedoch eine Vielzahl von möglichen Stellhebeln zur Dekarbonisierung des Sektors auf. So ist für einen maximalen positiven Beitrag zum Klimaschutz der Umsetzungszeitpunkt einer Dekarbonisierungsmaßnahme von entscheidender Bedeutung. Denn der Zeitpunkt wirkt sich direkt auf die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen und somit auf das Klima aus. Die Ergebnisse legen zudem nahe, dass für eine nachhaltige Implementierung der Dekarbonisierungsmaßnahmen eine gesamthafte sektorale Betrachtung und Abstimmung notwendig ist – speziell im Bereich der Wärmebereitstellung, die derzeit der Hauptemittent und damit das größte Dekarbonisierungspotenzial im Sektor GHD darstellt.

## Abstract

Limiting the rise in temperature to below 1.5 °C compared to pre-industrial times is one of the greatest global challenges facing the global community in the 21st century. Achieving this goal requires ambitious measures to reduce greenhouse gas emissions in all areas. This dissertation examines potential technological transformation pathways of the German business and services sector towards a more climate friendly energy supply by 2050. The modelling of the heterogeneous sector is carried out for 7 application areas and 13 branches using the linear optimisation model *MESSAGEix-GHD*, which I developed for this purpose.

The results of the scenario, sensitivity and uncertainty analysis show that under the current political and technological conditions the Federal Government 95 percentage climate target will not be achieved. At the same time, however, the modelling shows a large number of options for decarbonising the sector. However, for a maximum positive contribution to climate protection the timing is crucial of implementation of a decarbonisation measure because the implementation time has a direct impact on accumulated CO<sub>2</sub>-emissions and thus reducing the climate change. The results further show that for a sustainable implementation of the decarbonisation measures an overall sectoral consideration and coordination is necessary – especially in the area of heat supply, which currently represents the main emitter and thus the greatest decarbonisation potential in the business and services sector.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner für das hervorragende und persönliche Betreuungsverhältnis, die wertvollen Diskussionen und die große Freiheit in der Umsetzung meiner eigenen Ideen. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. rer. pol. Valentin Bertsch von der Ruhr-Universität Bochum für die Erstellung des Zweitgutachtens sowie die wertvollen inhaltlichen Impulse. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Erwin Biebl danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich während meiner Zeit an der Technischen Universität München an Projekten zusammenarbeiten durfte. Ich habe den Austausch sehr genossen und durfte viele Erfahrungen sammeln. Vielen Dank für die große Unterstützung in allen Belangen sowie die zahlreichen Diskussionen und konstruktiven Gespräche.

Mein besonderer Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie. Ich bedanke mich bei meinen Eltern für die Möglichkeiten, die sie mir eröffnet haben und die fortwährende Unterstützung in allen Lebenssituationen. Meiner Frau gebührt ein besonderer Dank für ihr großes Verständnis, ihren Rückhalt und ihre Geduld, mit der sie mich während der gesamten Dauer meines Promotionsvorhabens unterstützt hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1 Motivation . . . . .	9
1.2 Energie- und Klimaziele . . . . .	10
1.3 Energiewirtschaftliche Einordnung . . . . .	11
1.4 Ziel der Arbeit . . . . .	12
1.5 Struktur der Arbeit . . . . .	12
<b>2 Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen</b>	<b>15</b>
2.1 Definition . . . . .	15
2.2 Energiewirtschaftliche Bedeutung . . . . .	17
2.2.1 Definition Energieformen und Anwendungsbereiche . . . . .	17
2.2.2 Energiebedarf nach Anwendungsbereichen . . . . .	17
2.2.3 Historische sektorale Kennzahlen . . . . .	19
2.2.4 Historische CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	24
2.3 Historische Bestandserhebung und Aktivitäten . . . . .	26
2.3.1 Wärme . . . . .	28
2.3.2 Prozesswärme . . . . .	32
2.3.3 Prozess- und Klimakälte . . . . .	32
2.3.4 Beleuchtung . . . . .	33
2.3.5 Mechanische Energie . . . . .	34
2.3.6 Information und Kommunikation . . . . .	35
<b>3 Nutzenergieprojektion</b>	<b>37</b>
3.1 Modellierung des zukünftigen Energiebedarfs . . . . .	37
3.1.1 Ökonometrischer Ansatz . . . . .	38
3.1.2 Endverbraucher-Ansatz . . . . .	39
3.1.3 Gängige Ansätze für den Sektor GHD . . . . .	40
3.2 Methodik . . . . .	41

3.2.1	Temperaturdaten . . . . .	41
3.2.2	Temperaturkorrektur . . . . .	44
3.2.3	Bezugseinheiten . . . . .	47
3.2.4	Spezifischer Nutzenergiebedarf . . . . .	47
3.2.5	Berechnungsmethodik . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Modellierung des Sektors</b>	<b>51</b>
4.1	Modellierung von Energiesystemen . . . . .	51
4.2	Modellierungsframework MESSAGEix . . . . .	53
4.2.1	Ursprung . . . . .	53
4.2.2	Modellierungsplattform . . . . .	54
4.2.3	Methodik . . . . .	54
4.3	Modellarchitektur Sektor GHD . . . . .	55
4.3.1	Grundlegendes Konzept . . . . .	56
4.3.2	Softwarearchitektur . . . . .	57
4.3.3	Testprozess . . . . .	60
4.4	Struktur und Aufbau des Modells MESSAGEix-GHD . . . . .	63
4.4.1	Modellstruktur . . . . .	63
4.4.2	Modellaufbau . . . . .	64
4.5	Eingangsdaten für MESSAGEix-GHD . . . . .	65
4.5.1	Allgemeine Annahmen . . . . .	65
4.5.2	Nutzenergiebedarf . . . . .	67
4.5.3	Technologische und ökonomische Parameter . . . . .	67
4.5.4	Technologiebestand . . . . .	68
4.5.5	Potenzial erneuerbarer Energien . . . . .	68
4.5.6	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren . . . . .	70
4.5.7	Kapazitäts- und Aktivitätsgrenzen . . . . .	70
4.6	Grenzen des Modells MESSAGEix-GHD . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Szenarioanalyse</b>	<b>75</b>
5.1	Entwicklung des Basisszenarios – Referenzszenario . . . . .	75
5.1.1	Szenarioannahmen . . . . .	75
5.1.2	Nutzenergieprojektion . . . . .	76
5.1.3	Auswertung der Modellergebnisse . . . . .	78
5.2	Veränderter Wärme- und Kältebedarf – Klimaszenarien . . . . .	81
5.2.1	Szenarienannahmen . . . . .	81
5.2.2	Nutzenergieprojektion . . . . .	81
5.2.3	Auswertung der Modellergebnisse . . . . .	82
5.3	Einfluss der Emissionsfaktoren – CO <sub>2</sub> -Emissionsszenarien . . . . .	85
5.3.1	Szenarienannahmen . . . . .	85
5.3.2	Auswertung der Modellergebnisse . . . . .	85
5.4	Strukturelle Veränderungen des Sektors – GHD-Szenarien . . . . .	86
5.4.1	Szenarienannahmen . . . . .	87
5.4.2	Nutzenergieprojektion . . . . .	87
5.4.3	Auswertung der Modellergebnisse . . . . .	87

5.5	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse</b>	<b>93</b>
6.1	Sensitivitätsanalyse . . . . .	93
6.1.1	One-at-a-Time-Methode . . . . .	94
6.1.2	Morris-Methode . . . . .	95
6.2	Unsicherheitsanalyse . . . . .	97
6.3	Integration in MESSAGEix-GHD . . . . .	99
6.3.1	Modell-Outputs . . . . .	99
6.3.2	Sensitivitätsanalyse mittels der Morris-Methode . . . . .	100
6.3.3	Unsicherheitsanalyse mittels des Quasi-Monte-Carlo-Ansatzes . . . . .	102
6.4	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse . . . . .	103
6.5	Ergebnisse Unsicherheitsanalyse . . . . .	111
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>115</b>
<b>A</b>	<b>Ergebnisse der Nutzenergieprojektion</b>	<b>119</b>
<b>B</b>	<b>Eingangsdaten MESSAGEix-GHD</b>	<b>121</b>
<b>C</b>	<b>Parameter für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse</b>	<b>123</b>
<b>D</b>	<b>Akronyme</b>	<b>127</b>
	<b>Literatur</b>	<b>129</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Endenergiebedarf der Endverbrauchssektoren nach Anwendungsbereichen . . . .	11
1.2	Struktur der vorliegenden Arbeit . . . . .	13
2.1	Historische Entwicklung der End- und Nutzenergie . . . . .	18
2.2	Historischer Anteil des Sektors GHD am Endenergiebedarf sowie an der Endenergieproduktivität . . . . .	20
2.3	Historische Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts des Dienstleistungsbereichs . .	21
2.4	Historische Entwicklung von Nutzungsgrad und Bruttoinlandsprodukt des Dienstleistungsbereichs . . . . .	22
2.5	Pair-Plot historischer sektoraler Kennzahlen . . . . .	23
2.6	Historische Entwicklung der direkten und indirekten energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Energieträgern . . . . .	24
2.7	Historische Veränderung der sektoralen CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	25
2.8	Mapping-Verfahren zur Technologiedefinition und zur Bestandserhebung . . . . .	26
2.9	Installierte Leistung zur Bereitstellung von Wärme . . . . .	29
2.10	Installierte Leistung zur Bereitstellung von Prozesswärme . . . . .	32
2.11	Installierte Leistung zur Bereitstellung von Prozess- und Klimakälte . . . . .	33
2.12	Installierte Leistung zur Bereitstellung von Beleuchtung . . . . .	34
2.13	Installierte Leistung zur Bereitstellung von mechanischer Energie . . . . .	35
3.1	Schematische Darstellung des Endverbraucher-Ansatzes . . . . .	39
3.2	Schematische Darstellung der Methodik zur Nutzenergieprojektion . . . . .	41
3.3	Mittlere Tagestemperaturen für Deutschland für ausgewählte Tage in den Jahren 2015 und 2050 . . . . .	42
3.4	Mittlere Jahrestemperaturen Deutschlands im Zeitraum von 2006 bis 2050. . . .	43
3.5	Entwicklung des Korrekturfaktors für den Anwendungsbereich Raumwärme . . . .	46
3.6	Entwicklung des Korrekturfaktors für den Anwendungsbereich Klimakälte . . . . .	46
4.1	Entscheidungsbaum zur Identifikation des Modellierungsframeworks . . . . .	53
4.2	Beispielhaftes Referenzenergiesystem . . . . .	55
4.3	Schematische Architektur zur Modellierung des Sektors GHD . . . . .	56
4.4	Schematische Softwarearchitektur zur Modellierung des Sektors GHD . . . . .	59
4.5	Testprozess zur kontinuierlichen und automatischen Überprüfung des Modells <i>MESSAGEix-GHD</i> . . . . .	61
4.6	Struktur des Optimierungsmodells <i>MESSAGEix-GHD</i> . . . . .	63

4.7	Zusammenhang der Branchen des Sektors GHD in Form eines Graphen . . . . .	64
4.8	Auszug des Referenzenergiesystems einer Branche von <i>MESSAGEix-GHD</i> . . . . .	66
4.9	Abschreibung der installierten Leistung der Technologien zur Wärmebereitstellung . . . . .	69
5.1	Entwicklung des Nutzenergiebedarfs je Anwendungsbereich . . . . .	78
5.2	Entwicklung des sektoralen Endenergiebedarfs des Referenzszenarios . . . . .	79
5.3	Entwicklung der sektoralen Deckung des Wärmebedarfs für das Referenzszenario . . . . .	80
5.4	Entwicklung der sektoralen CO <sub>2</sub> -Emissionen für das Referenzszenario . . . . .	80
5.5	Nutzenergieprojektion für das Referenzszenario und die Klimaszenarien . . . . .	82
5.6	Entwicklung des Endenergiebedarfs für die Klimaszenarien und das Referenzszenario . . . . .	83
5.7	Endenergiebedarf nach Energieträgern der Klimaszenarien und des Referenzszenarios im Jahr 2050 . . . . .	84
5.8	Pfade zur Dekarbonisierung des Sektors GHD der Klimaszenarien und des Referenzszenarios . . . . .	84
5.9	Entwicklung der Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen der Emissionsszenarien im Vergleich zum Referenzszenario . . . . .	86
5.10	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Vergleich zum Referenzszenario nach Energieträgern im Jahr 2050 . . . . .	87
5.11	Entwicklung der Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen der GHD-Szenarien im Vergleich zum Referenzszenario . . . . .	88
5.12	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen der GHD-Szenarien im Vergleich zum Referenzszenario nach Energieträgern im Jahr 2050 . . . . .	89
5.13	Vergleich der direkten und indirekten CO <sub>2</sub> -Einsparung der untersuchten Transformationspfade im Jahr 2050 . . . . .	90
5.14	Vergleich der kumulierten CO <sub>2</sub> -Emissionen und der CO <sub>2</sub> -Reduktion gegenüber 1990 im Jahr 2050 . . . . .	91
6.1	Screening-Raster zur Bestimmung des elementaren Effekts . . . . .	96
6.2	Schematische Darstellung eines deterministischen Modellierungsansatzes . . . . .	98
6.3	Schematische Darstellung eines stochastischen Modellierungsansatzes . . . . .	99
6.4	Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber den Kosten im Jahr 2050 . . . . .	105
6.5	Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber den CO <sub>2</sub> -Emissionen im Jahr 2050 . . . . .	107
6.6	Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber dem Endenergiebedarf im Jahr 2050 . . . . .	108
6.7	Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber der Elektrifizierung im Jahr 2050 . . . . .	109
6.8	Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation der Kosten . . . . .	111
6.9	Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation der CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	112
6.10	Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation des Endenergiebedarfs . . . . .	113
6.11	Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation der sektoralen Elektrifizierung . . . . .	113

# Tabellenverzeichnis

1.1	Energie- und Klimaziele Deutschlands . . . . .	10
2.1	Strukturierung des Sektors GHD nach Branchen . . . . .	16
2.2	Definition der Anwendungsbereiche . . . . .	17
2.3	Endenergiebedarf nach Energieträgern und Anwendungsbereichen des Sektors GHD . . . . .	18
2.4	Entwicklung der Erwerbstätigen des Sektors GHD . . . . .	19
2.5	Nomenklatur der Bestandserhebung . . . . .	27
3.1	Nomenklatur zur Berechnung der Heizgradtags- und Kühlgradtagszahlen . . . . .	44
3.2	Referenz Heizgradtags- und Kühlgradtagszahlen . . . . .	45
3.3	Nomenklatur zur Berechnung der Nutzenergie . . . . .	48
4.1	Entwicklung des sektoralen Nutzenergiebedarfs des Sektors GHD des Referenzszenarios . . . . .	67
4.2	Entwicklung der Endenergiepreise . . . . .	68
4.3	Potenzial erneuerbarer Energien im Sektor GHD . . . . .	69
4.4	Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren . . . . .	70
5.1	Entwicklung der Bezugseinheiten des Referenzszenarios . . . . .	77
6.1	Charakterisierung ausgewählter Methoden der Sensitivitätsanalyse . . . . .	94
6.2	Parameterranking der globalen Sensitivitätsanalyse . . . . .	110
A.1	Nutzenergiebedarf nach Anwendungsbereichen und Branchen des Sektors GHD . . . . .	119
B.1	Inputs und Outputs sowie Levels ausgewählter Technologien . . . . .	121
B.2	Technologische und ökonomische Parameter ausgewählter Technologien . . . . .	122
C.1	Parameter der Energiebereitstellung und Beleuchtung für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse . . . . .	123
C.2	Parameter der Wärmebereitstellung für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse . . . . .	124
C.3	Parameter der Klima- und Prozesskälte, mechanischen Energie und Prozesswärme für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse . . . . .	125

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Im Jahr 2015 hat sich ein Großteil der Weltgemeinschaft im Rahmen der UN-Klimakonferenz in Paris dazu verpflichtet, aktiv gegen die globale Klimaerwärmung vorzugehen. Zur Untermauerung dieses Vorhabens wurde für die Nationalstaaten ein völkerrechtlich verbindliches Abkommen verabschiedet. Ziel dieses Abkommens ist die Begrenzung der anthropogen verursachten globalen Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit. Nach Möglichkeit sollen zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, um diesen Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen [1].

Im November 2016 verabschiedete die Bundesregierung Deutschlands im Einklang mit dem Pariser Klimaabkommen den Klimaschutzplan 2050 [2]. Dieser Plan beschreibt das langfristige Ziel Deutschlands, den Energiebedarf weitestgehend treibhausgasneutral zu decken. Der zentrale Eckpfeiler zur Erreichung dieses Ziels ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands bis zum Jahr 2050 auf 80 bis 95 % im Vergleich zum Basisjahr 1990.

Diese ambitionierte Herausforderung verlangt nach drastischen Maßnahmen in allen Bereichen der Energiewirtschaft und der Endverbrauchssektoren, um eine globale Klimakatastrophe zu vermeiden. Daher ist es auch von großer Bedeutung, dass der energetisch kleinste Endverbrauchssektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung Deutschlands leistet. Dieser Sektor verursachte mit 138 Mt CO<sub>2</sub> rund 19 % der direkten und indirekten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands im Jahr 2015 [3, 4]. Die wissenschaftliche Begleitstudie, die im Rahmen der Erstellung des Klimaschutzplans 2050 durchgeführt wurde, identifiziert folgende Wissenslücke für den Sektor GHD:

*Die Heterogenität und unterschiedliche Abgrenzung des Sektors führt auch dazu, dass es für Deutschland keine Studien gibt, in denen ausschließlich die zukünftige Energienachfrage dieses Sektors betrachtet wird. Er ist jeweils nur Bestandteil von übergreifenden Studien und Szenarien.*

Wohlfarth, 2016 [5, S. 7]

Daraus sowie angesichts der großen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bedeutung ergibt sich die Notwendigkeit weiterer Forschung bezüglich der energiewirtschaftlichen Entwicklung des Sektors GHD. Die heterogene Zusammensetzung erfordert eine detaillierte Modellierung des sektoralen End- und Nutzenergiebedarfs für die Analyse und Bewertung der Erreichung der ambitionierten Klimaziele bis zum Jahr 2050. Die Modellierung soll auf Basis moderner Standards der Softwareentwicklung und Energiesystemmodellierung erfolgen [6]. Zum einen soll eine kontinuierliche automatisierte Überprüfung des Modells in Form eines Testprozesses zur Qualitätssteigerung der Ergebnisse und zur Reduktion möglicher Fehler im Quellcode entwickelt werden. Zum anderen soll der Einfluss der mit Unsicherheit behafteten Modellparametrisierung anhand einer globalen Sensitivitätsanalyse und einer Quasi-Monte-Carlo-Simulation für die Ergebnisse der Szenarien, die die zukünftige Energienachfrage abbilden, quantifiziert werden.

## 1.2 Energie- und Klimaziele

Eine Auswahl der quantitativen Ziele der Energiewende Deutschlands, die den GHD-Sektor betreffen, sind in Tabelle 1.1 dargestellt. Mit diesen und weiteren beschlossenen Zielen will die deutsche Bundesregierung, im Einklang mit den übergeordneten Klimaschutzzielen der Europäischen Union, den Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung bis zum Jahr 2050 schaffen. Basierend auf dem Zeithorizont von 2020 bis 2050 wurden die beschlossenen Ziele in Zehn-Jahres-Schritte unterteilt, die innerhalb der Bundesrepublik Deutschland erfüllt werden sollen. Die Basisjahre, auf die sich die jeweiligen Ziele beziehen, unterscheiden sich jedoch teilweise für die Emissionsreduktion, die Produktivitätssteigerung und den Energiebedarf. [7]

*Tabelle 1.1: Auszug der quantitativen Energie- und Klimaziele Deutschlands bezüglich der Reduktion der THG-Emissionen, Energiebedarf sowie Steigerung der Endenergieproduktivität [7].*

Zieljahr	THG-Emissionen	Endenergieproduktivität	Energiebedarf			
			Primärenergiebedarf	Wärmebedarf Gebäude	Primärenergie Gebäude	Bruttostrombedarf
2020	min. -40 %	2,1 % p.a. <sup>†</sup>	-20 %	-20 %	-	-10 %
2030	min. -55 %		-	-	-	-
2040	min. -70 %		-	-	-	-
2050	-80 % bis -95 %		-50 %	-	-80 %	-25 %
Basisjahr	1990		2008	2008	2008	2008

<sup>†</sup> Die Endenergieproduktivität bezieht sich auf das reale Bruttoinlandsprodukt pro Einheit Endenergiebedarf.

Ziele, die im Speziellen nur für den Sektor GHD definiert sind, wurden von der Bundesregierung nicht beschlossen, vielmehr wurden die Ziele für mehrere Sektoren (z. B. Gebäude) gemeinsam bzw. für alle Bereiche der Energiewirtschaft ausgegeben. Neben dem Einsparungsziel der THG-Emissionen wird auch die Reduktion des Einsatzes von Primärenergie im Gebäudebereich um 80 % (gegenüber 2008) eine große Herausforderung für den GHD-Sektor bis zum Jahr 2050 darstellen. Die Schwierigkeit der Reduktion der Primärenergie ergibt sich aus dem hohen sektoralen Energiebedarf im Gebäudebereich, der überwiegend aus fossilen Energieträgern bereitgestellt wird (vgl. Tabelle 2.3).

Im Rahmen des im Jahr 2016 veröffentlichten Klimaschutzplans 2050 verabschiedete die Bundesregierung ihre langfristige Strategie zum Schutz des Klimas, die im Abkommen der Pariser Klimaschutzkonferenz 2015 gefordert wurde. Im Zuge dieses Plans wurde eine weitere Detaillierung der Energie- und Klimaziele vorgenommen. Allerdings wurden auch in diesem Plan keine Energie- und Klimaziele, die ausschließlich den GHD-Sektor betreffen, beschlossen. [2]

Der Klimaschutzbericht 2018 liefert eine Aktualisierung der geschätzten Treibhausgasemissionen Deutschlands und gibt einen Ausblick zur Zielerreichung im Jahr 2020. Das Treibhausminderungsziel für Deutschland wird unter Berücksichtigung der bis zum Jahr 2020 umgesetzten Maßnahmen mit einer erwarteten Reduktion von  $-32\%$  gegenüber 1990 verfehlt. Der Sektor GHD hingegen könnte das Emissionsreduktionsziel von  $-40\%$  im Jahr 2020 erreichen. Hierbei ist jedoch eine ehrgeizige Umsetzung der im „Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz“ beschlossenen Maßnahmen notwendig. [8]

### 1.3 Energiewirtschaftliche Einordnung

Der gesamte Endenergiebedarf Deutschlands lag im Jahr 2017 bei 2.558 TWh [9]. Dabei hat sich dieser Bedarf seit dem Jahr 1990 kaum verändert. Es wurden zwar Maßnahmen zur effizienteren Nutzung der Energie eingeführt, doch aufgrund des parallelen Wirtschaftswachstums sowie der Konsumsteigerung Deutschlands stieg dieser zeitgleich an [10].

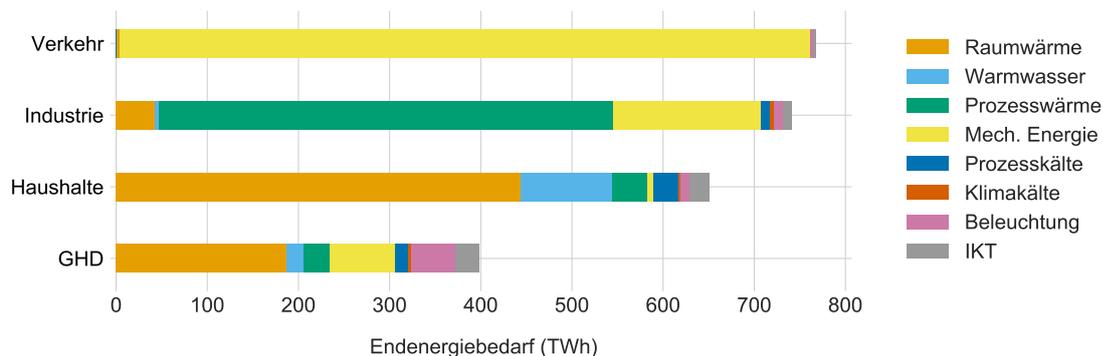


Abbildung 1.1: Endenergiebedarf der Endverbrauchssektoren Deutschlands nach Anwendungsbereichen im Jahr 2017 in TWh. Eigene Darstellung der nach [9] aufbereiteten Daten.

Für eine detaillierte Bilanzierung des Bedarfs Deutschlands wird dieser auf die Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte und GHD aufgeteilt. Der Endenergiebedarf nach Anwendungsbereichen dieser Sektoren ist in Abbildung 1.1 für das Jahr 2017 dargestellt. Der größte Endenergiebedarf wird dem Verkehrssektor mit 768 TWh zugeschrieben. Dieser Bedarf wird fast ausschließlich durch die Bereitstellung von mechanischer Energie verursacht. An zweiter Stelle liegt die Industrie mit einem Bedarf von 741 TWh. Der größte Anwendungsbereich ist hierbei die Prozesswärme, die rund zwei Drittel des Bedarfs verursacht. Darauf folgt der Endverbrauchssektor Haushalte mit einem Endenergiebedarf von 651 TWh. Der Bedarf im Bereich der Haushalte wird überwiegend durch Wärmeanwendungen wie der Raumwärme und Warmwasser verursacht. Bezogen auf den Endenergiebedarf stellt der Sektor GHD mit einem jährlichen Bedarf von 398 TWh den kleinsten Verbrauchssektor Deutschlands dar.

Die Zusammensetzung der relevanten Anwendungsbereiche ist in diesem Sektor ausgeglichener. Jedoch ist auch hier, wie in den privaten Haushalten, die Bereitstellung von Wärme für die Zusammenstellung des Endenergiebedarfs von zentraler Bedeutung. [9]

## 1.4 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit untersucht verschiedene technologische Transformationspfade hin zu einer klimaneutralen Bereitstellung der Nutzenergie im Sektor GHD. Das Ziel der Untersuchung besteht in der Identifikation einer optimalen Zusammensetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der jährlichen Bedarfsdeckung bis zum Jahr 2050. Die Maßnahmen beziehen sich dabei auf Technologien zur Deckung der Bedarfe der Endnutzer des Sektors wie z. B. Wärme und Beleuchtung sowie auf die mögliche Bepreisung der eingesetzten Energieträger (z. B. Strom- und Gaspreis). Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit leitet sich aus den von der Bundesregierung verabschiedeten Klimaschutzzielen ab. Sie lautet wie folgt: Gibt es einen technologisch kostenoptimalen Transformationspfad für den Sektor GHD, in dem, unter den aktuellen politischen Rahmenbedingungen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95 % gegenüber dem Basisjahr 1990 bis zum Jahr 2050 reduziert werden können?

Im Rahmen dieser Arbeit werden sieben Bedarfe in Form von Anwendungsbereichen wie z. B. Wärme, Kälte und Beleuchtung modelliert. Die mögliche Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen wird basierend auf den potenziellen technologischen, strukturellen und gesellschaftlichen Entwicklungen sowie dem Aspekt der Klimaveränderung für den Sektor GHD erforscht. Für eine detaillierte Betrachtung des Potenzials zur Dekarbonisierung des Sektors wird dieser in 13 Branchen (z. B. Bürobetriebe, Handel und Gastgewerbe) abgebildet.

Die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors stellen eine bedeutsame Kennzahl dar, die den sektoralen Einfluss auf das Klima beschreibt. Daher wird untersucht, wie sich die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Transformationspfade des Sektors GHD im Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050 verändern. Mittels einer Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse werden für den Sektor robuste Maßnahmen identifiziert und abgeleitet. Diese Maßnahmen liefern einen positiven Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele unabhängig von den äußeren Entwicklungen.

## 1.5 Struktur der Arbeit

Der strukturelle Aufbau und der grundlegende Zusammenhang dieser Arbeit sind in Abbildung 1.2 dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht außerdem die inhaltlichen Verweise auf die nachfolgenden Kapitel.

In Kapitel 2 wird der heterogene Sektor GHD definiert. Die energiewirtschaftliche Bedeutung des Endverbrauchssektors GHD wird anhand von historischen sektoralen Kennzahlen erörtert. Ferner wird die Aufbereitung der historischen Daten des Technologiebestands und deren Aktivitäten für die energiewirtschaftliche Modellierung des Sektors beschrieben.

Kapitel 3 beinhaltet die für diese Arbeit entwickelte Methodik zur Modellierung des zukünftigen Energiebedarfs. Die Projektion des zukünftigen Energiebedarfs erfolgt auf der Nutzenergie-

ebene, die es erlaubt, strukturelle Veränderungen des Sektors sowie Klimaeinflüsse unabhängig von technologischen Entwicklungen zu betrachten.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Modellierung des Sektors GHD. Die entwickelte Architektur und die Struktur des linearen Optimierungsmodells *MESSAGEix-GHD* zur Modellierung des Sektors fundieren auf dem Modellierungsframework *MESSAGEix*. Im Anschluss an den konzeptionellen Teil werden die grundlegenden Eingangsdaten und Annahmen des Modells beschrieben. Abschließend werden die Grenzen und Anwendungen von *MESSAGEix-GHD* erörtert.

In Kapitel 5 werden unterschiedliche Transformationspfade des GHD-Sektors in Form einer Szenarioanalyse untersucht. Diese werden in einer abschließenden Gegenüberstellung für die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen und die CO<sub>2</sub>-Reduktion gegenüber 1990 diskutiert.

Der Einfluss der mit Unsicherheit behafteten Eingangsdaten auf die Modellergebnisse wird in Kapitel 6 in Form einer Sensitivitäts- und einer Unsicherheitsanalyse untersucht. Die Sensitivitätsanalyse erfolgt anhand der globalen Methode nach Morris und die Unsicherheitsanalyse auf Basis einer Quasi-Monte-Carlo-Simulation.

Abgeschlossen wird die Arbeit mit dem Fazit in Kapitel 7. Dieses Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung und Erörterung der zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit. Darauf aufbauend folgen ein Ausblick und die Beschreibung der Grenzen des entwickelten Frameworks für die Modellierung des GHD-Sektors Deutschlands.

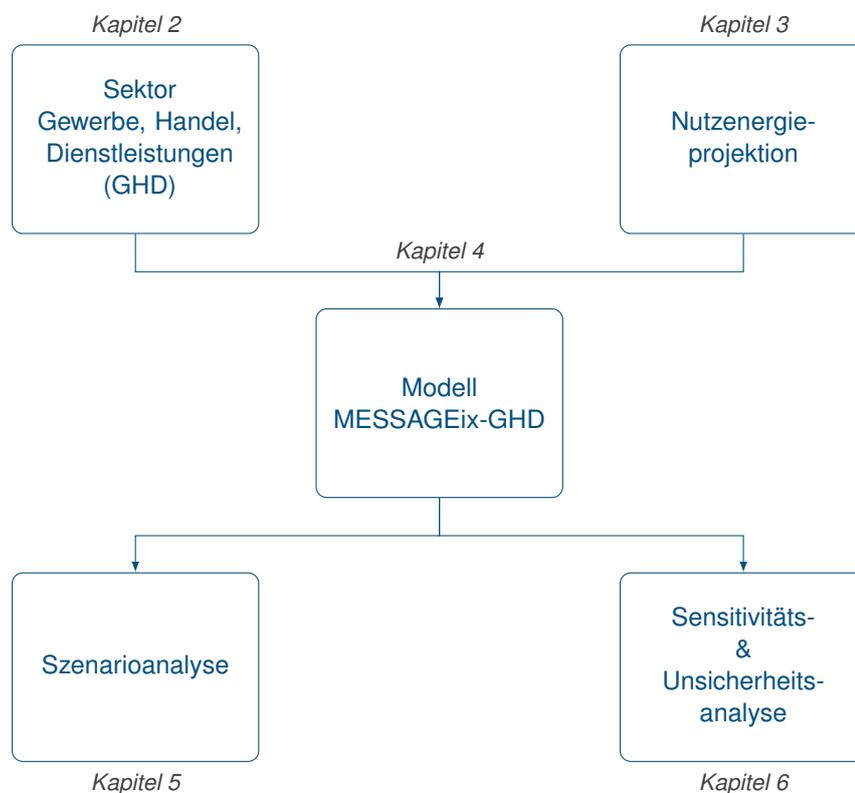


Abbildung 1.2: Struktur der vorliegenden Arbeit mit Verweisen auf die Kapitel.



## Kapitel 2

# Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

In diesem Kapitel wird der heterogene Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) Deutschlands für eine energetische Betrachtung vorgestellt. Dazu werden im Folgenden der Sektor GHD und seine Branchen definiert und gegenüber den verbleibenden Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr und private Haushalte abgegrenzt. Darauf folgt eine Erörterung der Energieformen und Anwendungsbereiche, die in dieser Arbeit betrachtet werden. Die aktuelle energiewirtschaftliche Bedeutung des Sektors für Deutschland wird anhand von historischen Kennzahlen wie z. B. Energiebedarf, CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Erwerbstätige sowie deren Entwicklung aufgezeigt. Abschließend wird die Bestandserhebung der für die energiewirtschaftliche Modellierung des Sektors relevanten Daten beschrieben.

### 2.1 Definition

Im Rahmen dieser Arbeit werden für den Verbrauchssektor GHD die Definition des Sektors sowie die Abgrenzung zur Industrie nach [11] verwendet. Die Differenzierung des GHD-Sektors gegenüber den Sektoren Industrie und Verkehr entspricht der Aufteilung der Branchen, die in der Energiebilanz Deutschlands aus dem Jahr 2014 von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) definiert wurde. Die Branchen des produzierenden und verarbeitenden Gewerbes, alle Handwerksbetriebe sowie industrielle Kleinbetriebe mit einer Beschäftigtenzahl bis 19 Personen werden dem Sektor GHD zugerechnet. Hinzu kommen Betriebe, die im Handel- und Dienstleistungsbereich ihre unternehmerische Tätigkeit haben. Die Bereiche der Land- und Forstwirtschaft, die auch den Gartenbau umfassen, sowie militärische Dienststellen werden analog der Energiebilanz im Sektor GHD bilanziert. Die Aufteilung des Bedarfs bei der Deutschen Bahn und den Flughäfen erfolgt nach dem mobilen und stationären Bedarf. Der gesamte Endenergiebedarf, der im stationären Anwendungsfall auftritt, wird im Sektor GHD verortet. Der mobile Bedarf hingegen wird dem Sektor Verkehr zugeordnet. [11]

Die Einteilung des GHD-Sektors in 13 Branchen erfolgt auf Basis der Gruppen- und der Split-Zuordnung nach [11]. Die Grundlage zur Strukturierung des Sektors liefert die Klassifikation der Wirtschaftszweige [12] aus dem Jahr 2008 (WZ 2008).

Das Ergebnis der Aufgliederung des Sektors in Branchen ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Der Grund für die gewählte Einteilung liegt einerseits darin, dass die Ergebnisse (z. B. Energiebedarfe, installierte Leistungen und Wirkungsgrade) aus [11] das Fundament der energetischen Modellierung des GHD-Sektors bilden (vgl. Kapitel 4). Andererseits ist diese Einteilung notwendig, um die Vergleichbarkeit der sektoralen Entwicklungen dieser Arbeit zu gewährleisten.

Ferner stellen die Energiebedarfsstrukturen einen wesentlichen Aspekt für die Zusammenfassung strukturell ähnlicher Branchen dar. Kleinere und wirtschaftlich weniger bedeutende Branchen wie z. B. Wäschereien oder Flughäfen werden aufgrund ihrer eigenständigen Charakteristik des Energiebedarfs getrennt dargestellt. Diese Einteilung der Branchen unterscheidet sich in Statistiken mit einem wirtschaftlichen Fokus. Dort werden Branchen wie z. B. Bürobetriebe feingliedriger ausgewiesen. [11]

Die Verteilung des historischen Nutzenergiebedarfs ist im Anhang in Tabelle A.1 für das Jahr 2015 sowie für die zukünftigen Jahre bis zum Jahr 2050 dargestellt. Den größten Nutzenergiebedarf weisen Bürobetriebe aus. Dieser Branche folgen das Gastgewerbe und der Handel.

*Tabelle 2.1: Strukturierung des GHD-Sektors nach Branchen. Die Zuordnung der Branchen basiert weitestgehend auf der Klassifikation der Wirtschaftszweige der Ausgabe 2008 [12, 13]. Die gewählte Einteilung der Branchen gilt auch für das entwickelte Modell MESSAGEix-GHD sowie für die Projektion des zukünftigen Nutzenergiebedarfs.*

Branchen	Aufgliederung der Branchen
Bäder	Bäder
Baugewerbe	Baugewerbe
Bürobetriebe	Kreditinstitute und Versicherungen, Verlagsgewerbe, sonstige betriebliche Dienstleistungen, Gebietskörperschaften und Sozialversicherungen, Deutsche Bundespost und Postdienst, Telekom, Deutsche Bahn AG
Gartenbau	Gartenbau
Gastgewerbe	Beherbergungsgewerbe, Gaststättengewerbe, Organisationen ohne Erwerbszweck und Heime
Handel	Einzelhandel, Großhandel, Handelsvermittlungen
Herstellungsbetriebe	Metallgewerbe, KFZ-Gewerbe, Holzgewerbe, Papier- und Druckgewerbe
Krankenhäuser	Krankenhäuser
Landwirtschaft	Landwirtschaft
Nahrungsmittelgewerbe	Backgewerbe, Fleischereien und Metzgereien, restliches Nahrungsmittelgewerbe
Schulen	Schulen
Sonstige	Flughäfen, Bekleidung, Leder und Textil, Spedition, Lagerei und Verkehrsvermittlung, Straßenbeleuchtung, Militär, Rechenzentren, Kühlhäuser, Marktstände, NE-Metalle, Kunststoffe und Gummi, Wasserversorgung und Abwasserentsorgung
Wäschereien	Wäschereien

## 2.2 Energiewirtschaftliche Bedeutung

In diesem Kapitel werden die Energieformen und Anwendungsbereiche für diese Arbeit definiert und es wird der aktuelle Energiebedarf des GHD-Sektors dargestellt. Die historischen sektoralen Entwicklungen von relevanten Kennzahlen sowie die Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen schließen dieses Kapitel ab.

### 2.2.1 Definition Energieformen und Anwendungsbereiche

Die Definitionen für die Energieformen Primärenergie, Endenergie, Nutzenergie sowie die der Anwendungsbereiche werden in der vorliegenden Arbeit analog der Definitionen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) verwendet. Als Primärenergie werden Energieträger in ihrer Urform bezeichnet, die von der Natur bereitgestellt und anhand von technologischen Umwandlungsprozessen nutzbar gemacht werden. Die Nutzenergie beschreibt die Energie, die direkt aus der Endenergie gewonnen wird, um die Bedürfnisse des Endnutzers zu decken. Diese Bedarfe können in neun verschiedene Anwendungsbereiche unterteilt werden (vgl. Tabelle 2.2). [14]

*Tabelle 2.2: Definition der unterschiedlichen Anwendungsbereiche sowie deren Haupteinsatzgebiet im Sektor GHD [13, 14].*

Anwendungsbereich	Einsatzgebiet
Wärme	Raum- und Warmwasserbereitstellung für Gebäude und Arbeitsstätten
Raumwärme	Bereitstellung von Raumwärme für Gebäude und Arbeitsstätten
Warmwasser	Bereitstellung von Warmwasser für Arbeitsstätten
Prozesswärme	Prozesstechniken
Klimakälte	Klimatisierung von Gebäuden
Prozesskälte	Bereitstellung für Kälte von Kühlhäusern, Gefrier- und Kühlräume
Mechanische Energie	Elektrische- und Verbrennungsantriebe für Maschinen und Geräte
Beleuchtung	Beleuchtung von Gebäuden und Freiflächen
Information und Kommunikation	Elektronische Geräte zur Bereitstellung von Informations- und Kommunikationstechnologien

### 2.2.2 Energiebedarf nach Anwendungsbereichen

Die historische Entwicklung des End- und Nutzenergiebedarfs im Zeitraum von 1994 bis 2016 ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Im Jahr 2005 erfolgte ein Wechsel der Bilanzierungsmethode. Dies zeigt sich im Vergleich der Bedarfe vor diesem Jahr, die einen deutlich geglätteten Verlauf aufweisen. Für den Anwendungsbereich der Raumwärme wurde für die End- und Nutzenergie eine Temperaturbereinigung durchgeführt. Durch diese Anpassung konnten witterungsbedingte Effekte entfernt werden.

Diese Bereinigung ermöglicht eine Aussage bezüglich der Effizienzänderung und der möglichen Trends des GHD-Sektors. Im dargestellten Zeitraum von 22 Jahren ist ein Rückgang sowohl des Endenergiebedarfs als auch des Nutzenergiebedarfs ersichtlich. Im Vergleich zu den anderen Sektoren veränderte sich der Bedarf des Sektors am stärksten [3]. Dies wird zu

einem großen Teil durch die Steigerung der Effizienz der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser erreicht. [9, 11, 13, 15, 16, 34]

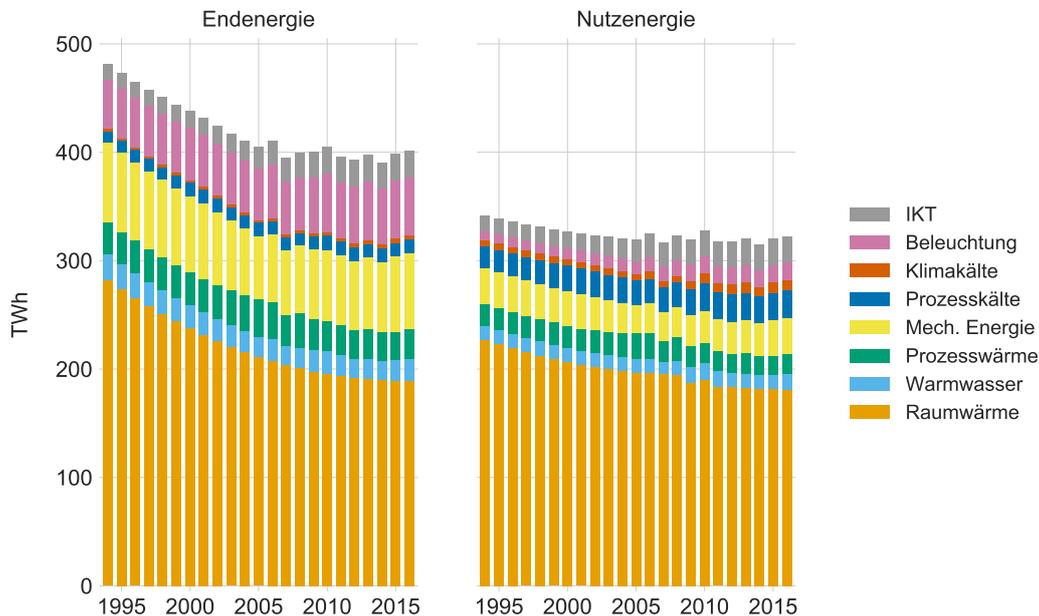


Abbildung 2.1: Historische Entwicklung der End- und Nutzenergie in TWh im Zeitraum von 1994 bis 2016. Eigene Darstellung der vom Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik berechneten Daten auf Basis von [9, 11, 13, 15, 16, 34].

Der Endenergiebedarf des Sektors GHD lag im Jahr 1994 bei 481 TWh und konnte in den darauffolgenden Jahren bis zum Jahr 2005 um 16 % auf 405 TWh gesenkt werden. In den verbleibenden Jahren blieb der Bedarf annähernd konstant bei ca. 400 TWh. Ein ähnlicher Trend ist auch bei der historischen Entwicklung des Bedarfs der Nutzenergie ersichtlich. Der Bedarf reduzierte sich im genannten Zeitrahmen um knapp 6 % von 341 TWh auf 322 TWh. [9, 11, 13, 15, 16, 34]

Tabelle 2.3: Endenergiebedarf nach Energieträgern und Anwendungsbereichen für den Sektor GHD im Jahr 2017 in TWh. Eigene Darstellung nach [16].

Anwendung	Energieträger									Summe	Prozent (%)
	Strom	Gas	Öl	Kraftstoffe	Holz	Fernwärme	Umweltwärme	Solarthermie	Kohle		
Raumwärme	5,9	108,3	45,9	0,1	21,7	10,0	0,4	0,1	0,3	192,7	48,1
Mechanische Energie	38,7	0,3	-	32,7	-	-	-	-	-	71,7	17,9
Beleuchtung	47,5	-	-	-	-	-	-	-	-	47,5	11,9
Prozesswärme	7,5	12,5	3,7	-	2,6	1,9	-	-	-	28,2	7,0
IKT	24,7	-	-	-	-	-	-	-	-	24,7	6,2
Warmwasser	6,0	6,2	3,6	-	1,7	0,7	0,2	0,3	-	18,7	4,7
Prozesskälte	13,3	0,1	-	-	-	-	-	-	-	13,4	3,3
Klimakälte	3,1	0,8	-	-	-	-	-	-	-	3,9	1,0
Summe	146,7	128,2	53,2	32,8	26,0	12,6	0,6	0,4	0,3	400,8	100,0
Prozent (%)	36,6	32,0	13,3	8,2	6,5	3,1	0,1	0,1	0,1	100,0	

Die Aufteilung des Endenergiebedarfs im Jahr 2017 in Energieträger und Anwendungsbereichen ist in Tabelle 2.3 dargestellt. Den größten Anteil mit 48,1 % (192,7 TWh) des Energiebedarfs verursacht die Bereitstellung der Raumwärme. Zusammen mit den Anwendungsbereichen der mechanischen Energie (17,9 %) und der Beleuchtung (11,9 %) führen diese drei Bereiche zu 77,9 % des gesamten Endenergiebedarfs des Sektors. [16]

Bei Betrachtung der Energieträger zeigt sich, dass 53,6 % (214,8 TWh) des Bedarfs mit Energieträgern fossilen Ursprungs, vor allem mit Gas und Öl, gedeckt wird. Diese werden vorwiegend eingesetzt, um den Wärmebedarf des Sektors zu decken. Der Anteil an erneuerbaren Energien wie Biomasse, Solarthermie und Umweltwärme liegt im Jahr 2017 bei 6,7 % (26,9 TWh). Der verbleibende sektorale Bedarf wird überwiegend mit dem Energieträger Strom gedeckt. Dieser liefert, gefolgt von Gas (32,0 %), den größten Anteil am gesamten Bedarf mit 36,6 %. [16]

### 2.2.3 Historische sektorale Kennzahlen

Die gesellschaftliche und individuelle Bedeutung der Erwerbsarbeit zur Sicherung der Lebenserhaltung nimmt in Deutschland eine zentrale Rolle ein. Im Jahr 2017 gingen 44,2 Millionen Menschen einer Erwerbstätigkeit nach [17]. Davon waren 34,3 Millionen im Sektor GHD beschäftigt. Der hohe Anteil des Sektors an der Erwerbsarbeit in Deutschland mit rund 78 % unterstreicht dessen öffentliche Bedeutung in der Gesellschaft.

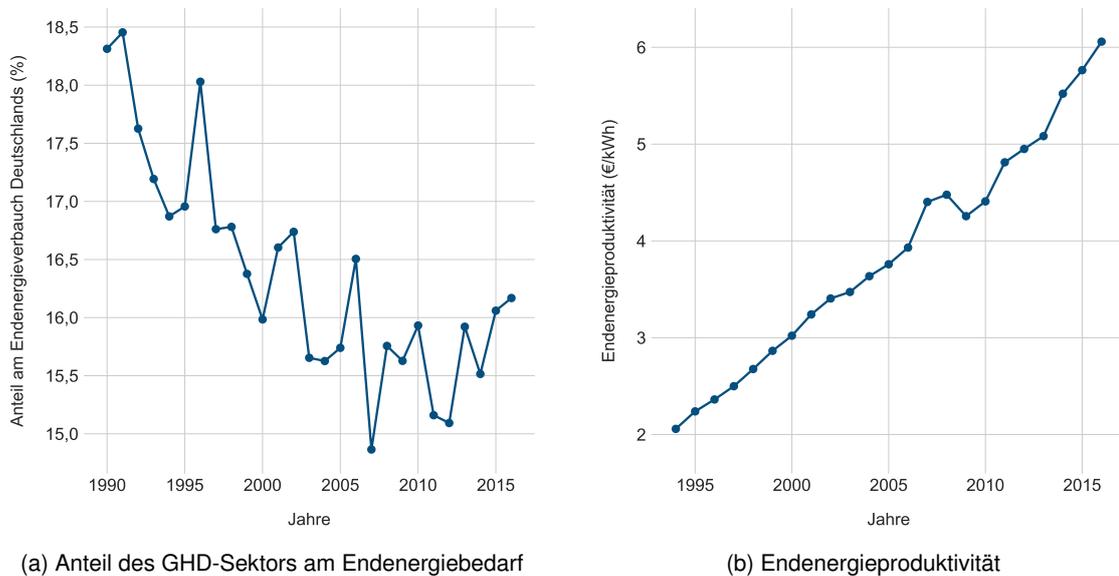
Die Entwicklung der Erwerbstätigenzahl für den Sektor GHD im Zeitraum von 2005 bis 2017 ist in Tabelle 2.4 abgebildet. Die jährliche Wachstumsrate war in diesem Zeitraum, mit Ausnahme des Jahres 2015, stets positiv. Das absolute Wachstum der Erwerbsarbeit des Sektors liegt ausgehend von 31,1 Millionen Erwerbstätigen in 2005 bei rund 11 %, was zu 34,3 Millionen im Jahr 2017 führt. Die Zusammensetzung dieser Zahlen basiert für den Sektor GHD auf Daten des Statistischen Bundesamtes, des Unternehmensregisters sowie der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung Deutschlands. [16]

*Tabelle 2.4: Historische Entwicklung der Erwerbstätigenzahl des Sektors GHD in Millionen im Zeitraum von 2005 bis 2017. Eigene Darstellung nach [16].*

		Jahre												
Einheit		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Erwerbstätige	Millionen	31,1	30,9	31,4	31,8	31,8	32,3	32,9	33,3	33,4	34,2	33,4	34,1	34,3

Abbildung 2.2 zeigt in (a) die historische Entwicklung des GHD-Anteils am jährlichen Endenergiebedarf Deutschlands und in (b) die Endenergieproduktivität des Sektors. Der Anteil des GHD-Sektors am Endenergiebedarf lässt einen rückläufigen Trend über den Betrachtungszeitraum von 1990 bis 2016 erkennen. In den Jahren ab 2008 pendelte sich der Anteil im Mittelwert von 15,7 % ein. Über den gesamten Zeitraum lag der Median des Anteils bei rund 16,2 %. [11, 13, 15, 18, 19]

In Abbildung 2.2 (b) ist die historische Entwicklung der Endenergieproduktivität des Sektors im Zeitraum von 1994 bis 2016 dargestellt. Die Kennzahl der Endenergieproduktivität beschreibt die erbrachte wirtschaftliche Leistung in Geldeinheiten pro eingesetzter Energie.



(a) Anteil des GHD-Sektors am Endenergiebedarf

(b) Endenergieproduktivität

Abbildung 2.2: Historischer Anteil des GHD-Sektors am Endenergiebedarf und der Endenergieproduktivität. (a) Darstellung des Verlaufs des sektoralen Endenergiebedarfs am Gesamtbedarf Deutschlands im Zeitraum von 1990 bis 2016. (b) Endenergieproduktivität des Sektors basierend auf Zahlen des Bruttoinlandsprodukts (BIP) des Dienstleistungsbereichs im Zeitraum von 1995 bis 2016. Eigene Berechnungen nach [11, 13, 15, 18].

Die Berechnung erfolgt aus dem Quotienten des realen Bruttoinlandsprodukts (BIP) und dem Endenergiebedarf. Der Indikator kann zur Beurteilung der Effizienzsteigerung eingesetzt werden. Eine Steigerung der Endenergieproduktivität kann zu einer Reduktion von Ressourcen und somit der Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. [11, 13, 15, 18, 19]

Die sektorale Endenergieproduktivität hat sich zwischen 1994 und 2016 um den Faktor 2,9 erhöht. Dies entspricht einem jährlichen Wachstum von 5 %. Grund für diesen Anstieg war vor allem das Wachstum der Wirtschaftsleistung des Dienstleistungsbereichs von 80,2 % durch die Zunahme des Bruttoinlandsprodukts in diesem Zeitraum. Im selben Zeitraum sank der Energieeinsatz um 16,6 %. Diese Entkopplung der Entwicklung von Endenergiebedarf und Wirtschaftswachstum weist zum einen auf eine Steigerung der Energieeffizienz hin. Zum anderen deutet dies auf einen Strukturwandel in Richtung eines nachhaltigen und energieschonenden Einsatzes von Ressourcen zur Steigerung des Wirtschaftswachstums hin. [11, 13, 15, 18, 19]

Das Bruttoinlandsprodukt ist eine zentrale Kennzahl zur Bewertung der erbrachten wirtschaftlichen Leistung einer Volkswirtschaft in einem definierten Zeitraum [17]. Die Entwicklung der erbrachten gesamtwirtschaftlichen Leistung des Sektors GHD ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Abbildung 2.3 (a) zeigt die Entwicklung des nominalen BIP des Dienstleistungsbereichs. Die Wachstumsrate des BIP lag im Zeitraum von 1994 bis 2016 im Mittelwert bei 2,7 % pro Jahr. Im Betrachtungszeitraum wuchs dieser Bereich um ca. 80 % von 1.198 Mrd. € im Jahr 1994 auf 2.158 Mrd. € im Jahr 2016. Das jährliche Wachstum des Sektors war mit Ausnahme der Rezession im Jahre 2009 (-0,6 %) aufgrund der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise [20] stets positiv. In diesem Jahr lag der Anteil des Dienstleistungsbereichs bei über 71 %.

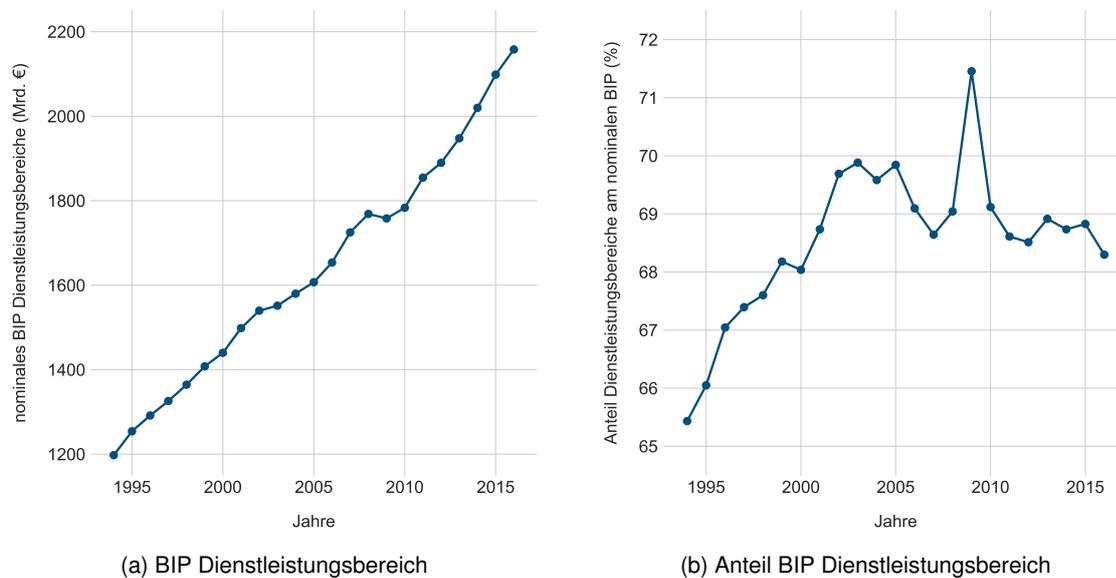
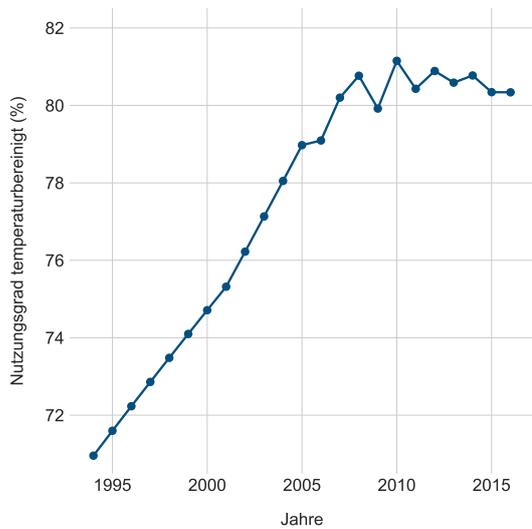


Abbildung 2.3: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts des Dienstleistungsbereichs im Zeitraum von 1994 bis 2016: (a) zeigt die absolute Entwicklung des Wirtschaftsbereichs Dienstleistungen und (b) den prozentualen Anteil am gesamten BIP Deutschlands. Eigene Berechnungen nach [18].

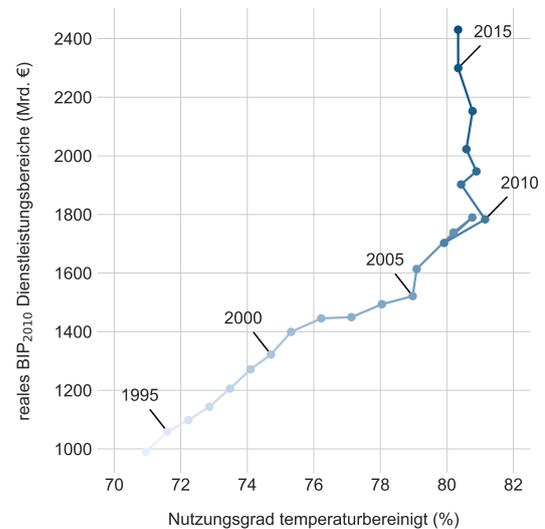
Bei diesem hohen Wert handelt es sich um einen Ausreißer, da das BIP des Industriesektors im Vergleich zu den restlichen Jahren deutlich niedriger war. Der weitere historische Verlauf des Anteils des Dienstleistungsbereichs am BIP ist in Abbildung 2.3 (b) aufgezeigt. In den darauffolgenden sieben Jahren ab dem Jahr 2009 bis 2016 lag der Mittelwert des prozentualen Anteils des BIP bei 68 %. In den Jahren vor der Finanzkrise stieg der Anteil des Dienstleistungsbereichs im Zeitraum von 1994 bis 2008 um 5 % auf einen Wert von 68 %. [17, 18]

Dieser hohe Anteil des Wirtschaftsbereichs der Dienstleistungen über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren verdeutlicht die strukturelle Veränderung Deutschlands und zeigt den Wandel von der Industrialisierung hin zu einer Dienstleistungsgesellschaft. Der tertiäre Wirtschaftsbereich deckt nicht exakt die Definition des GHD-Sektors, der in dieser Arbeit bedingt durch die Energiebedarfsstruktur verwendet wird (vgl. Unterkapitel 2.1). Aufgrund der überwiegenden Zusammensetzung des GHD-Sektors aus den Branchen des Dienstleistungsbereichs wird der Einfachheit halber das BIP des Tertiärssektors als Indikator der Wertschöpfungsveränderung und des Wirtschaftswachstums verwendet. [17, 18]

Der Wirkungsgrad eines Prozesses ist definiert als Quotient der nutzbaren zur zugeführten Leistung. Werden für einen bestimmten Zeitraum, z. B. für ein Jahr, die nutzbaren zu zugeführten Energiemengen bilanziert, wird dies als Nutzungsgrad bezeichnet [14]. Der historische temperaturbereinigte Nutzungsgrad, der die Umwandlung der zugeführten Endenergie hin zur Nutzenergie beschreibt, ist für den gesamten Sektor GHD in Abbildung 2.4 (a) aufgezeigt. Die mittlere jährliche Effizienzsteigerung lag in den Jahren 1994 bis 2008 bei 0,9 %. In den darauffolgenden Jahren bis 2016 stagnierten die Effizienzgewinne auf einem hohen mittleren Wert von 80,6 %. [11, 13, 15]



(a) Entwicklung des Nutzungsgrads



(b) Entwicklung reales BIP über Nutzungsgrad

Abbildung 2.4: Historische Entwicklung von Nutzungsgrad und BIP des Dienstleistungsbereichs im Zeitraum von 1994 bis 2016. (a) Historische Entwicklung des temperaturbereinigten Nutzungsgrads des gesamten GHD-Sektors zur Bereitstellung der Nutzenergie aus den Endenergieträgern Strom, Fernwärme und Brenn- und Kraftstoffe sowie aus den erneuerbaren Energieträgern. (b) Darstellung des historischen Zusammenhangs des sektoralen Nutzungsgrads und des BIP für Dienstleistungsbereiche. Eigene Berechnungen nach [11, 13, 15, 18].

In Abbildung 2.4 (b) ist für den gleichen Zeitraum der Zusammenhang des Nutzungsgrads zum realen BIP des Dienstleistungsbereichs dargestellt. Das reale BIP, das preisbereinigt ist, beschreibt im Gegensatz zum nominalen BIP die reale preisunabhängige Veränderungsrate der Wirtschaftsleistung [18]. Diese Abbildung lässt einen linearen Zusammenhang zwischen dem realen BIP und dem Nutzungsgrad im Zeitraum bis 2008 erkennen. Ab dem Jahr 2009 ist eine Entkoppelung der beiden sektoralen Kennzahlen ersichtlich. Das reale BIP steigt bis zum Jahr 2016 auf einen Wert von 2.430 Mrd. € bei einem annähernd gleichbleibenden Nutzungsgrad von 80,6%. Diese Entkopplung weist darauf hin, dass zwischen dem realen BIP des Dienstleistungsbereichs und dem temperaturbereinigten Nutzungsgrad kein Kausalzusammenhang vorliegt. [11, 13, 15, 18]

In Abbildung 2.5 ist eine Auswahl der in diesem Kapitel beschriebenen Kennzahlen in einem „Pair-Plot“ zusammengefasst dargestellt. Diese Art der Darstellung eignet sich zur Identifikation von Mustern, Beziehungen oder Anomalien. Der Aufbau dieser Abbildung fundiert auf zwei Diagrammformen: dem Histogramm (engl. histogram plot) auf der Hauptdiagonalen und dem Streudiagramm (engl. scatter plot) auf den Nebendiagonalen. Die Histogramme zeigen die Verteilung von einer einzelnen Kennzahl und die Streudiagramme den Zusammenhang von zwei Kennzahlen. Zusätzlich ist das Ergebnis der linearen Regression dieser Kennzahlen ebenso wie das resultierende 95 %-Konfidenzintervall hellblau aufgetragen. [21, 22]

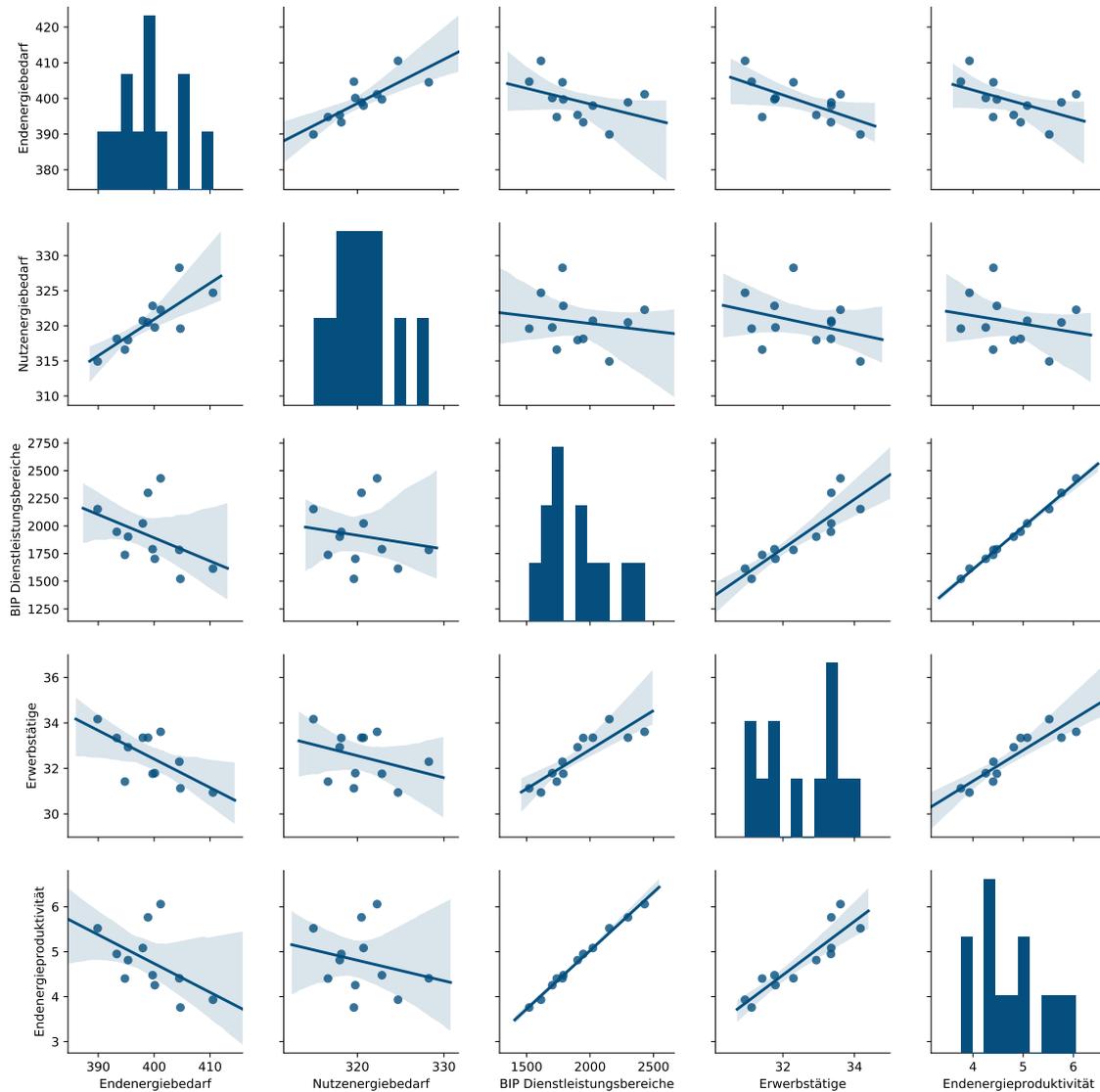


Abbildung 2.5: Darstellung der historischen sektoralen Kennzahlen End- und Nutzenergiebedarf (TWh), BIP Dienstleistungsbereiche (Mrd. €), Erwerbstätige (Millionen) und Endenergieproduktivität (€/kWh) in Form eines Pair-Plots. Darstellung der Häufigkeitsverteilung einzelner Kennzahlen sowie die Beziehung zwischen zwei Kennzahlen als Streudiagramm im Zeitraum von 2005 und 2016. Eigene Berechnungen nach [11, 13, 15, 18].

Für die Analyse wurden die temperaturbereinigten Bedarfe der End- und Nutzenergie in TWh, das reale BIP der Dienstleistungsbereiche in Mrd. €, die Erwerbstätigen des GHD-Sektors in Millionen und die Endenergieproduktivität in €/kWh ausgewählt. Die Gegenüberstellung des Nutzenergiebedarfs mit dem BIP des Dienstleistungsbereichs (Zeile 2 und Spalte 3) sowie mit der Erwerbstätigenzahl (Zeile 2 und Spalte 4) zeigt für diesen kurzen Betrachtungshorizont ein niedriges Bestimmtheitsmaß der Güte der linearen Regression aufgrund der hohen Streuung (Darstellung in hellblau). Somit ist es nicht möglich, basierend auf diesen Kennzahlen eine Aussage zur Entwicklung des Nutzenergiebedarfs zur tätigen. Diese Gegebenheiten untermauern den in dieser Arbeit gewählten Bottom-Up-Ansatz der Projektion des zukünftigen Nutzenergiebedarfs des GHD-Sektors (vgl. Kapitel 3).

### 2.2.4 Historische CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen können in direkte und indirekte Emissionen eingeteilt werden. Die direkten entstehen bei der Verbrennung von Energieträgern im Sektor GHD. Diese können reduziert werden, indem effizientere Technologien oder Technologien, die einen klimafreundlicheren Energieträger nutzen, eingesetzt werden. Die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden durch die Nutzung der Energieträger Strom und Fernwärme verursacht, da die Verbrennung im Umwandlungssektor stattfindet.

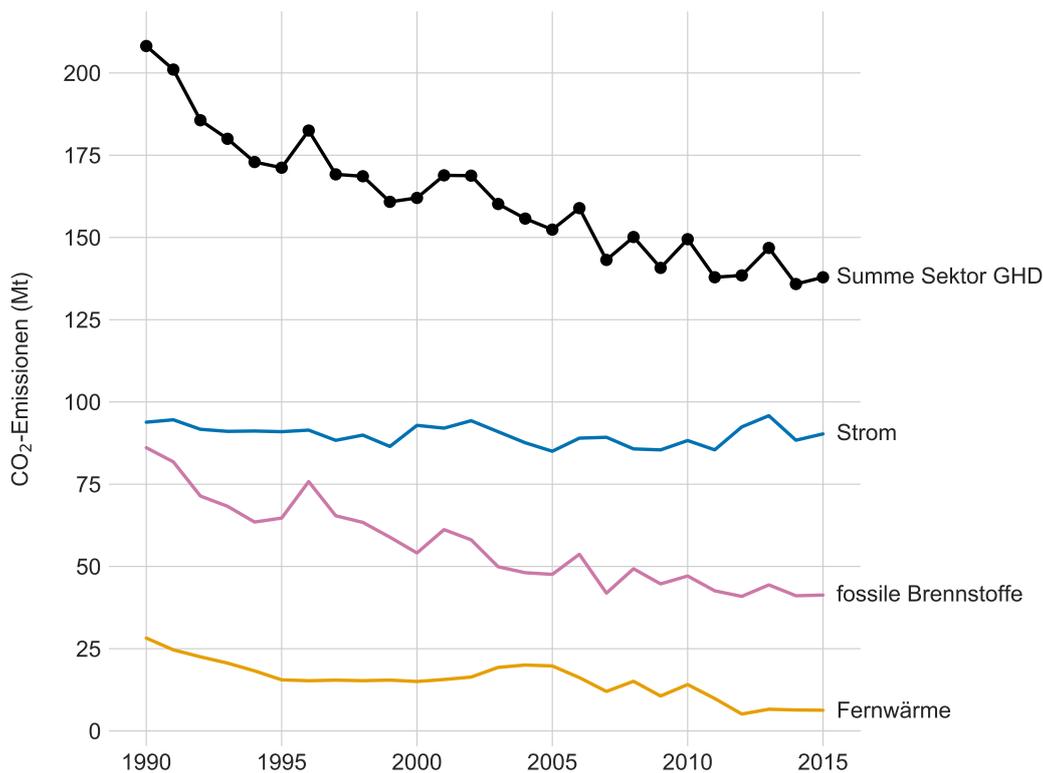


Abbildung 2.6: Historische Entwicklung der direkten und indirekten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträgern im Zeitraum von 1990 bis 2015. Darstellung der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Mt CO<sub>2</sub> des GHD-Sektors sowie nach Energieträgern. Eigene Berechnungen nach [3, 4].

Die historischen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2015 sind in Abbildung 2.6 dargestellt. Die direkten und indirekten Emissionen des gesamten Sektors lagen im Jahr 1990 bei 208 Mt CO<sub>2</sub> und reduzierten sich bis zum Jahr 2015 um 33,8 % auf 138 Mt CO<sub>2</sub> (vgl. Abbildung 2.7). Den größten Anteil mit 90 Mt CO<sub>2</sub> verursachten im Jahr 2015 strombasierte Anwendungen. Die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Strom haben sich in ihrer absoluten Menge über den Betrachtungszeitraum kaum verändert. Diesem Verlauf unterliegen zwei gegenläufige Entwicklungen im Sektor GHD und im Umwandlungssektor. Die Bereitstellung des Stroms veränderte sich in diesem Zeitraum in Richtung einer CO<sub>2</sub>-neutraleren Erzeugung, die in Form eines sinkenden Emissionsfaktors ersichtlich ist. Dieser lag im Jahr 1990 bei rund 807 g CO<sub>2</sub>/kWh und sank bis zum Jahr 2015 um 25,4 % auf 602 g CO<sub>2</sub>/kWh. Gegenläufig entwickelte sich in derselben Zeit der Bedarf am Energieträger Strom. Durch die zunehmende Elektrifizierung des GHD-Sektors stieg der Bedarf um 29,3 % (116,4 TWh) im Jahr 2015 gegenüber dem Jahr 1990. Die verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionen lagen im Jahr 2015 bei 47 Mt CO<sub>2</sub>, wobei der Anteil der fossilen Brennstoffe bei 41 Mt CO<sub>2</sub> und der Anteil der Fernwärme bei 6 Mt CO<sub>2</sub> lagen. Die historische Entwicklung weist für diese Energieträger eine rückläufige Tendenz auf. [3, 4]

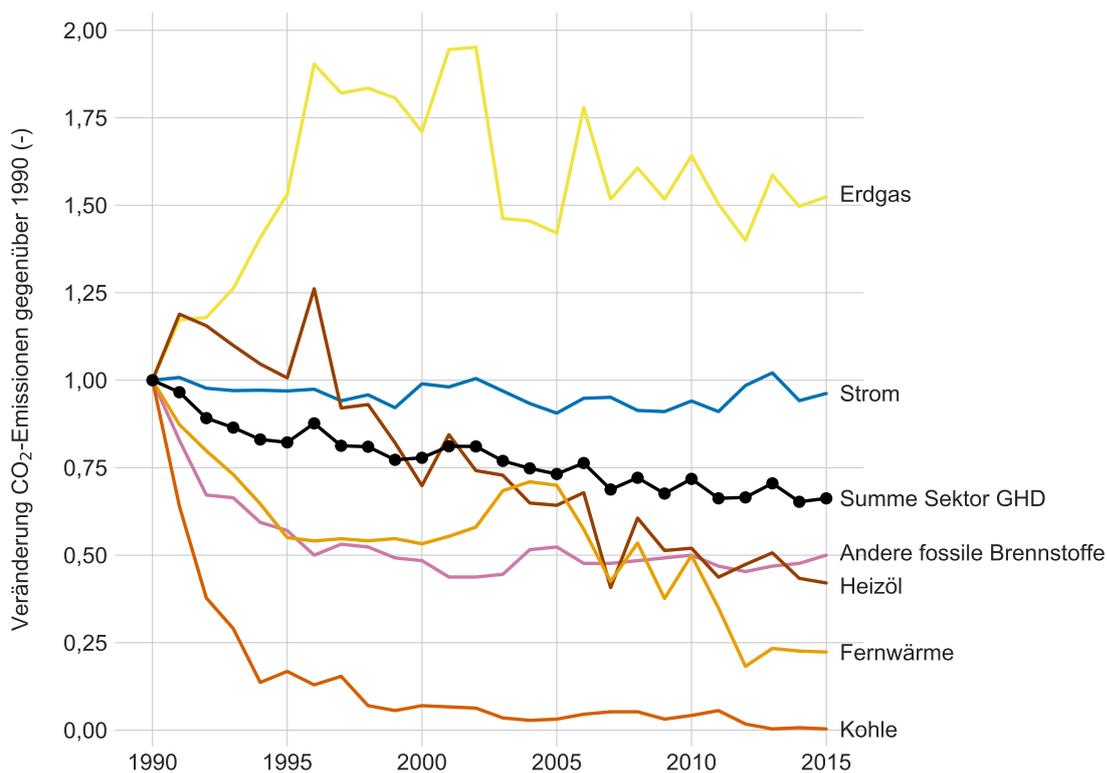


Abbildung 2.7: Historische Entwicklung der Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen je Energieträger gegenüber dem Basisjahr 1990 für den Sektor GHD. Eigene Berechnungen nach [3, 4].

Die Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Basisjahr 1990, die durch den Einsatz der Energieträger im GHD-Sektor verursacht werden, sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Die Abbildung zeigt den historischen Verlauf der steigenden Dekarbonisierung des Sektors.

In der Zeitspanne zwischen 1990 und 2015 erfolgte, zusätzlich zur beschriebenen Elektrifizierung, eine Brennstoffsubstitution zwischen den fossilen Energieträgern. Öl- und kohlebasierte Anwendungen wurden durch Technologien ersetzt, die den Brennstoff Erdgas nutzen. Die Substitution bedingt in vielen Fällen eine Steigerung der Energieeffizienz des Energieeinsatzes im Sektor, die durch den verbesserten Wirkungsgrad der neuen Technologien hervorgerufen wird. [3, 4]

### 2.3 Historische Bestandserhebung und Aktivitäten

Der historische Technologiebestand sowie dessen Aktivitäten in Form des Energiebedarfs bilden eine wesentliche Grundlage für die energiewirtschaftliche Modellierung des GHD-Sektors (vgl. Kapitel 4). Aus den historischen Entwicklungen lassen sich zudem die Diffusionsgeschwindigkeiten der jeweiligen Technologien ableiten. Diese Wachstumsgeschwindigkeiten werden für die Modellierung des zukünftigen GHD-Sektors als Eingangsparameter verwendet.

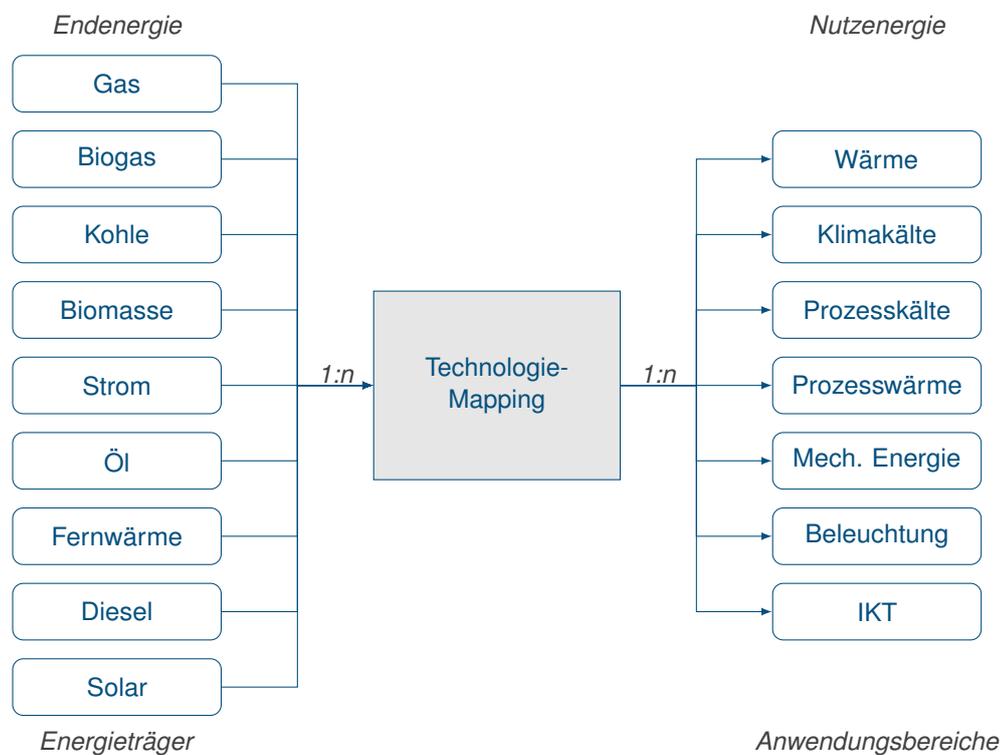


Abbildung 2.8: Mapping-Verfahren zur Technologiedefinition und Bestandserhebung. Darstellung der Beziehungen von End- und Nutzenergie sowie deren Energieträger bzw. Anwendungsbereiche. Dieses Verfahren wird für jede Branche angewendet.

Die Methodik zur Erhebung relevanter Technologien und der Bestandserhebung für die Branchen des GHD-Sektors (vgl. Tabelle 2.1) ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Im ersten Schritt wird mittels einer Literaturrecherche [11, 13, 15, 23] eine Vorauswahl von Technologien erstellt, die zur Bereitstellung der Nutzenergie im Sektor GHD eingesetzt werden können (vgl. Unterkapitel 4.5).

Anhand eines manuellen Mapping-Verfahrens werden darauf aufbauend Technologien zur Umwandlung der Endenergie auf Nutzenergie definiert. Dabei können mehrere Technologien den gleichen Energieträger als Eingang haben, es muss jedoch mindestens eine Technologie je Energieträger vorhanden sein (1:n-Beziehung). Analog gilt diese 1:n-Beziehung für die Energiebereitstellung der Anwendungsbereiche auf der Ebene der Nutzenergie für die jeweiligen Technologien. Somit ist am Ende des Mapping-Verfahrens gewährleistet, dass die unterschiedlichen Bedarfe der Endverbraucher im Sektor anhand von mindestens einer definierten Technologie bereitgestellt werden können.

### Zubau und Aktivitäten

Bedingt durch die nominelle Lebensdauer der eingesetzten Technologien wird die Bestandserhebung für das entwickelte *MESSAGEix-GHD* im Zeitraum von 1986 bis zum Jahr 2015 durchgeführt. Der Betrachtungshorizont wird dabei in Stützjahre  $S$  unterteilt, wobei sich ein Stützjahr aus einer Periode von fünf Jahren zusammensetzt. Die Bestandserhebung liefert die notwendigen historischen Eingangsparameter des linearen Optimierungsmodells *MESSAGEix* [24]. Die Erhebung umfasst die mittleren jährlich neu installierten Leistungen  $CAP\_NEW$ :

$$CAP\_NEW_{t,b}^s = \frac{\hat{P}_{t,b}^{s-4} + \hat{P}_{t,b}^{s-3} + \hat{P}_{t,b}^{s-2} + \hat{P}_{t,b}^{s-1} + \hat{P}_{t,b}^s}{5} \quad (2.1)$$

sowie deren mittlere jährlich Aktivität  $ACT$ :

$$ACT_{t,b}^s = \frac{CAP_{t,b}^s \cdot fh_{t,b}^s}{5} \quad (2.2)$$

je Technologie  $t$  und Branche  $b$  für die definierten Stützjahre  $S$ . Die Aktivität beschreibt den Output einer Technologie bezogen auf die gesamte installierte Leistung  $CAP$  und die Volllaststunden je Stützjahr (vgl. Gleichung 2.2). Dabei berechnet sich die installierte Leistung je Stützjahr aus dem Zubau der letzten Periode sowie dem Bestand abzüglich der Technologien mit einem Baujahr, die aufgrund ihrer Lebenszeit stillgelegt werden.

*Tabelle 2.5: Nomenklatur der Bestandserhebung. Beschreibung der Symbole für die Berechnung des historischen Zubaus und der Aktivitäten.*

Symbol	Einheit	Beschreibung
$s \in S$	a	Stützjahre $S = \{1990, 1995 \dots 2010, 2015\}$
$b \in B$		Branche(n)
$t \in T$		Technologie(n)
$\hat{P}$	GW	jährliche Zubauleistung
$CAP\_NEW$	GW	mittlere neu installierte Leistung (Zubau)
$fh$	h	Volllaststunden
$CAP$	GW	installierte Leistung
$ACT$	GWh	mittlere Output Aktivität

### **Fortschreibung und Rückrechnung**

Die Datenbasis für den GHD-Sektor unterscheidet sich für die verschiedenen Anwendungsbereiche und Branchen deutlich in ihrer Qualität und Verfügbarkeit. Die Datenverfügbarkeit variiert auch im zeitlichen Verlauf des Betrachtungszeitraums. Dies führt zu dem, dass für jeden Anwendungsbereich ein eigenes Aufbereitungsverfahren angewandt wird. Zum anderen folgt daraus, dass für Stützjahre mit Datenlücken historische Entwicklungen für diese Jahre fortgeschrieben oder zurückgerechnet werden. Dieses Verfahren wird für Datenpunkte durchgeführt, die den gesamten GHD-Sektor, Branchen oder einzelne Technologie betreffen.

### **Downscaling-Ansatz**

Der Downscaling-Ansatz beschreibt das Verfahren, mit dem Informationen, die in einer höheren Auflösung vorliegen, auf eine niedrigere umgewandelt werden. Dieser Ansatz findet z. B. bei der Regionalisierung der Ergebnisse von Klimamodellen eine breite Anwendung. [25]

Für die Aufbereitung des historischen Bestands wird dieser Ansatz des Downscalings (Skalierung) angewandt, wenn die notwendigen Daten nicht für die gewünschten Zielgrößen wie z. B. Sektor, Branche oder Technologie vorliegen. Die Skalierung der Daten für den GHD-Sektor erfolgt mittels des jeweiligen Quotienten der niedrigen (z. B. Branche) zur höheren (z. B. Sektor) Informationsebene.

### **Aufbereitung**

In Unterstützung mit [26] erfolgte die Aufbereitung des historischen Zubaus der vorab in dieser Arbeit definierten Technologien (vgl. Unterkapitel 4.4) sowie deren Aktivitäten. In den nachfolgenden Unterkapiteln 2.3.1 bis 2.3.5 wird die grundlegende Vorgehensweise der Datenaufbereitung für die jeweiligen Anwendungsbereiche sowie die dafür notwendige Datengrundlage beschrieben. Die abschließende Bestandserhebung der Technologien zur Bereitstellung des Bedarfs von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) weicht aufgrund der mangelnden Datengrundlage ab.

#### **2.3.1 Wärme**

Der Anwendungsbereich Wärme umfasst die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser für Gebäude und Arbeitsstätten. Aufgrund der ähnlichen Technologiestruktur werden diese Anwendungsbereiche zu Wärme zusammengefasst (vgl. Tabelle 2.3). Mit einem Anteil von 52,8 % (221,4 TWh) am gesamten Endenergiebedarf, der sich im Jahr 2017 aus 48,1 % Raumwärme und 4,7 % Warmwasser zusammensetzt, verursacht der Anwendungsbereich Wärme den größten Bedarf auf der Ebene der Endenergie im Sektor GHD. Daher erfolgt für diesen Anwendungsbereich eine detaillierte Aufbereitung des historischen Bestandes.

Abbildung 2.9 zeigt die überwiegende fossile Wärmebereitstellung des Sektors GHD, die auf die hohe installierte Leistung von fossilen Erzeugungstechnologien zurückzuführen ist. Die installierte Leistung bezieht sich, mit Ausnahme der Blockheizkraftwerke (elektrische Leistung), auf die thermische Leistung im Jahr 2015.

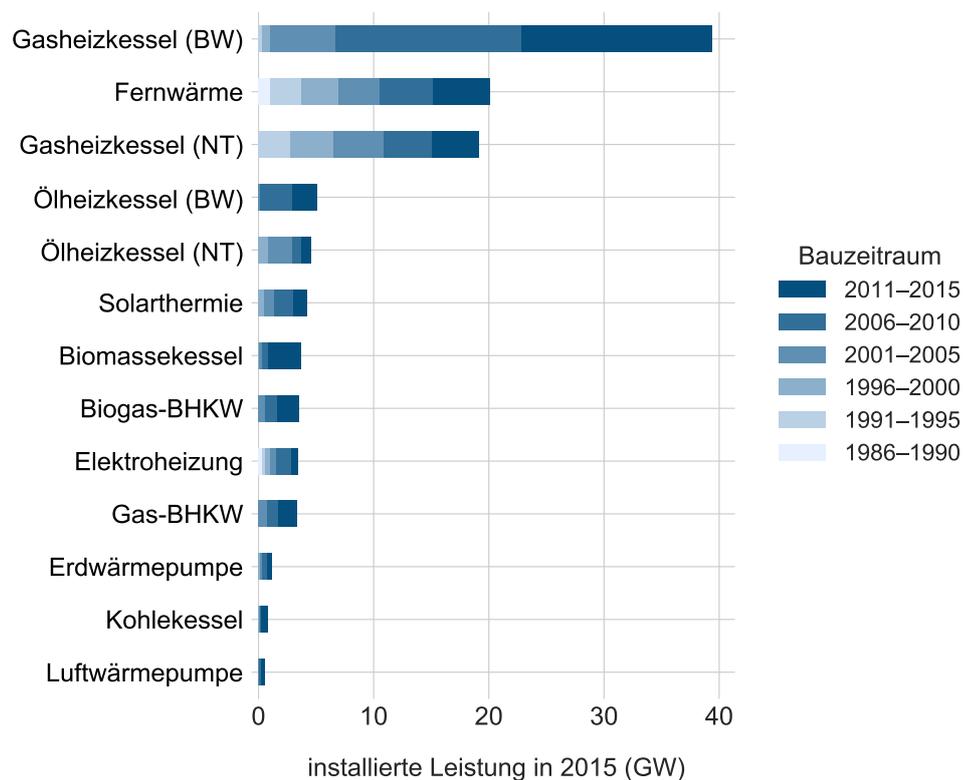


Abbildung 2.9: Installierte thermische Leistung zur Bereitstellung von Wärme in GW im Jahr 2015 in Abhängigkeit des Stützjahrs, in dem die Technologie erbaut wurde. Eigene Darstellung der Ergebnisse der in Unterkapitel 2.3.1 beschriebenen Bestandserhebung.

### Blockheizkraftwerk

Die Technologie des Blockheizkraftwerks (BHKW) beruht auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung, das die gleichzeitige Gewinnung von Strom und Wärme beschreibt [27]. Für den GHD-Sektor werden Daten für die Gas-, Öl- und Biogas-Blockheizkraftwerke für den Zeitraum ab 1990 ermittelt.

Die Absatzzahlen, Altersverteilungen und Volllaststunden stammen aus [28, 29, 30, 31], die Verteilung der BHKW-Technologien stammt aus [28, 31] für die Berechnung des Zubaus der BHKWs. Für Stützjahre mit fehlenden Zubauzahlen wird eine Skalierung der Blockheizkraftwerk-Absatzzahlen Deutschlands basierend auf dem historisch bekannten Verhältnis des GHD-Sektors am Gesamtabsatz durchgeführt und fortgeschrieben. Die abschließende Berechnung der Verteilung des Zubaus der Technologien pro Branche erfolgt mittels einer Skalierung des gesamten Zubaus in Abhängigkeit des korrespondierenden Endenergiebedarfs, der Volllaststunden sowie des Wirkungsgrades.

Die installierte elektrische Leistung je Stützjahr berechnet sich aus der Skalierung der installierten Leistung Deutschlands im Jahr 1990 [29] und dem berechneten Zubau je Branche und Technologie. Die Multiplikation dieser Leistungen mit dem Quotienten der Volllaststunden und Wirkungsgrade ergibt die historische Aktivität.

### **Gas- und Ölheizkessel**

Die Gas- und die Ölheizkesseltechnologie lieferten für die historische Bereitstellung des Wärmebedarfs des GHD-Sektors einen wesentlichen Beitrag (vgl. Abbildung 2.9). Für die Bestandserfassung werden die Heizkessel jeweils in Brennwertkessel (BW) und Niedertemperaturkessel (NT) unterteilt. Daraus resultieren vier unterschiedliche Heizkesseltechnologien, die für die Aufbereitung ab dem Stützjahr 1990 betrachtet werden.

Für die Stützjahre 1990, 1995, 2000 und 2005 stammt die Grundlage der historischen Zusammensetzung der installierten Heizleistung und des Zubaus aus [32]. Diese Heizkesselstruktur wird mittels des Brennstoffbedarfs des eingesetzten Energieträgers auf die Branchen aufgeteilt. Die Endenergie je Energieträger und Branche zur Bereitstellung der Wärme stammt für die Berechnung aus [11, 13, 16, 33, 34]. Der thermische, installierte Zubau für die Stützjahre 2010 und 2015 wird mittels des temperaturbereinigten Brennstoffeinsatzes abzüglich des Bedarfs der BHKW und der verbleibenden Lebensdauer [16] hochgerechnet. Der Anteil des Gas- bzw. Ölbedarfs zur Erzeugung der Wärme aus einem BHKW erfolgt mittels der finnischen Methode (vgl. Unterkapitel 4.6). Die Verteilung der einzelnen Kesseltechnologien wird auf Grundlage von [32, 35] berechnet.

Abschließend wird der spezifische Brennstoffbedarf für die Deckung des Wärmebedarfs je Technologiegruppe (z. B. Gasheizkesseltechnologien) berechnet. Die historischen Aktivitäten der einzelnen Technologien aus einer Technologiegruppe werden, basierend auf dem ermittelten Brennstoffbedarf (z. B. Gas), proportional anhand der zugehörigen Quotienten aus Volllaststunden und Wirkungsgrad skaliert.

### **Fernwärme**

Ein Fernwärmeheizsystem besteht hauptsächlich aus einem Wärmetauscher zur Auskopplung der Wärme für den Endverbraucher aus dem Fernwärmenetz [36]. Die Grundlage der Auswertung der sektoralen Fernwärmenutzung stammt für den historischen Betrachtungshorizont ab 1990 bedingt durch die lange Lebensdauer aus [32]. Die thermische, neu installierte Leistung pro Stützjahr sowie die Aktivität werden für die Fernwärme analog der Berechnungsmethodik für Gas- und Ölheizkessel berechnet.

### **Elektroheizung**

Der Begriff Elektroheizung ist die allgemeine Beschreibung von Technologien, die den Wärmebedarf mittels eines elektrischen Widerstands bereitstellen [36]. Die Aufbereitung des Bestands für die Stützjahre von 1990 bis 2015 erfolgt analog der Berechnungsmethodik für Gas- und Ölheizkessel basierend auf den Daten von [32].

### **Kohlekessel**

Der Einsatz von Heizkohle zur Bereitstellung von Wärme weist im Vergleich zu den fossilen Energieträgern Gas und Öl eine deutlich geringere Bedeutung auf (vgl. Abbildung 2.9). Im Jahrzehnt zwischen 2005 bis 2015 verringerte sich die Wärmebereitstellung aus Kohle um 42,9% [13]. Die historische Heizstruktur der Kohlekessel für den GHD-Sektor stammt aus [32].

Die Aufbereitung des Zubaus und der Aktivität ab 1990 erfolgt analog der Berechnungsmethodik für Gas- und Ölheizkessel.

### **Biomassekessel**

Die erneuerbare Wärmebereitstellung mittels Biomasse-Heizkessel wird für den GHD-Sektor ab dem Stützjahr 1995 aufbereitet. Die installierte Zubauleistung wird anhand der Absatzzahlen [35, 37] Deutschlands und der mittleren installierten thermischen Leistung [28] der Heizkessel berechnet. Der sektorale Anteil am gesamten Absatz wird mittels des Einsatzes der Biomasse im GHD-Sektor aus der Satellitenbilanz für Erneuerbare Energien [15] skaliert. Abschließend wird der Zubau auf die Branchen des Sektors nach [11] verteilt und für das fehlende Stützjahr 1995 zurückgerechnet. Die historische Aktivität wird basierend auf dem Brennstoffeinsatz der Biomasse im Sektor GHD nach [13] analog dem Berechnungsverfahren der Gas- und Ölheizkessel ab dem Stützjahr 2010 berechnet.

### **Wärmepumpe**

Wärmepumpen stellen eine etablierte Technologie zur Bereitstellung von Wärme im Temperaturniveau der Raumwärme dar. Das zugrundeliegende Prinzip der Wärmepumpe ist der thermodynamische Kreisprozess, bei dem der Umgebung Wärme eines niedrigeren Temperaturniveaus entzogen und auf ein höheres Niveau angehoben wird. Die Umgebungsluft und das Erdreich dienen vor allem Niedertemperaturquellen der Wärmepumpe. [23]

Die Auswertung wird für das Stützjahr ab 1995 für elektrisch betriebene Wärmepumpen durchgeführt. Die Absatzzahlen Deutschlands von Wärmepumpen stammen aus [38, 39, 40]. Diese werden auf die installierte thermische Leistung im Jahr 2015 aus [38] umgerechnet. Der Zubau wird für den GHD-Sektor basierend auf dem sektoralen Anteil der Wärmebereitstellung aus Wärmepumpen in Deutschland skaliert. Die Erzeugungsdaten der installierten Wärmepumpen nach Sektoren werden aus der Satellitenbilanz für Erneuerbare Energien [15] für die Skalierung entnommen. Die Aufteilung in Erd- und Luftwärmepumpe erfolgt mittels der Aufteilung aus [41]. Die abschließende Aufteilung des Zubaus nach Branchen erfolgt nach [16]. Die Methodik zur Berechnung der historischen Aktivität ist analog der Methodik für Gas- und Ölheizkessel. Der notwendige Brennstoffbedarf der Wärmepumpen stammt aus [15].

### **Solarthermie**

Die Zubauleistung und die resultierende installierte thermische Leistung der Solarthermie in Deutschland werden basierend auf den statistischen Zahlen der Zubaupläche und der mittleren Leistung aus [42] ermittelt. Die Berechnung der Branchenverteilung erfolgt ab dem Stützjahr 1990 mittels einer Skalierung. Diese basiert auf der Energieerzeugung der Solarthermie Deutschlands differenziert nach Sektoren aus der Satellitenbilanz für Erneuerbare Energien [15]. Der jeweilige Anteil einer Branche des Zubaus wird nach der Verteilung aus [16] berechnet. Mithilfe der erzeugten Wärme aus der Solarthermie aus [15] erfolgt die Berechnung der historischen Aktivität analog dem Verfahren der Gas- und Ölheizkessel.

### 2.3.2 Prozesswärme

Die Prozesswärme ist für den GHD-Sektor im Gegensatz zur Industrie von geringerer Relevanz [13]. Der Anteil der Prozesswärme am Endenergiebedarf im Jahr 2017 ist in Tabelle 2.3 dargestellt, der bei 7 % (28,2 TWh) lag. Dieser Bedarf wird hauptsächlich mit den fossilen Brennstoffen Gas und Öl (57,4 %) sowie Strom (26,6 %) gedeckt.

Für den GHD-Sektor wird jeweils eine Technologie je Energieträger für die Umwandlung der Endenergie in Nutzenergie definiert. Die installierte thermische Leistung dieser Technologien ist in Abbildung 2.10 ersichtlich.

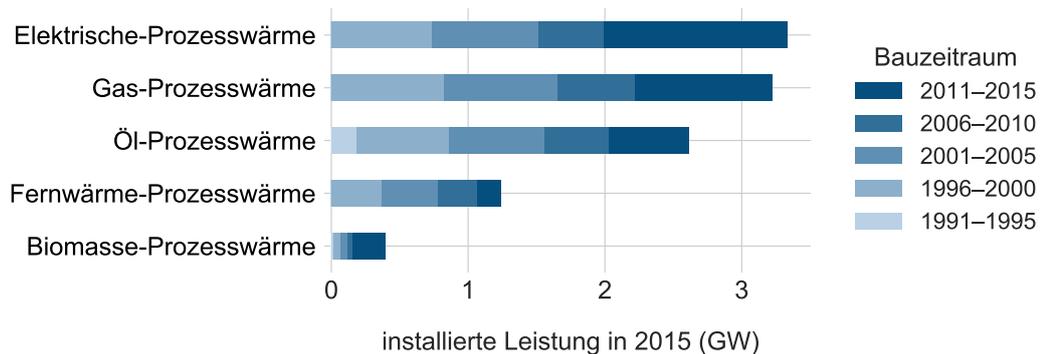


Abbildung 2.10: Installierte thermische Leistung zur Bereitstellung von Prozesswärme in GW im Jahr 2015 in Abhängigkeit des Stützjahrs, in dem die Technologie erbaut wurde. Eigene Darstellung der Ergebnisse der in Unterkapitel 2.3.2 beschriebenen Bestandserhebung.

### Aufbereitung

Die Aufbereitung des Zubaus und der Aktivität erfolgt für die folgenden fünf Technologien: Elektrische-, Gas-, Öl-, Fernwärme- und Biomasse-Prozesswärme. Die angewandte Berechnungsmethodik ist für diese Technologien identisch. Der Strom- und der Brennstoffbedarf der Prozesswärme werden für die Stützjahre ab 1995 aus den Daten [13, 16, 34, 43] pro Branche berechnet. Mithilfe der berechneten Bedarfe, Volllaststunden [11, 44] und Nutzungsgrade [13] wird die installierte thermische Leistung ermittelt. Aufgrund fehlender Informationen bezüglich der Verteilung des Baualters vor dem Stützjahr 1990 wird der historische Zubau vor diesem Zeitraum als konstant angenommen. Die Zubauleistung ab dem Stützjahr 1990 wird mittels des konstanten Zubaus und der installierten Leistung berechnet. Die Aktivitäten werden abschließend auf Basis des Strom- und Brennstoffbedarfs, der Volllaststunden und des Nutzungsgrades berechnet.

### 2.3.3 Prozess- und Klimakälte

Bemessen am Endenergiebedarf mit einem Anteil von 4,3 % hat die Kälte den geringsten Stellenwert unter den in Tabelle 2.3 dargestellten Anwendungsbereichen. Der Kältebedarf setzt sich aus der Prozesskälte (z. B. Kühlhäuser) und der Klimakälte zur Klimatisierung von Gebäuden zusammen. Im Sektor GHD wird dieser Bedarf überwiegend aus Technologien erzeugt, die den Energieträger Strom in Kälte umwandeln.

Die installierte thermische Leistung dieser Technologien zur Bereitstellung von Prozess- und Klimakälte für das Jahr 2015 ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

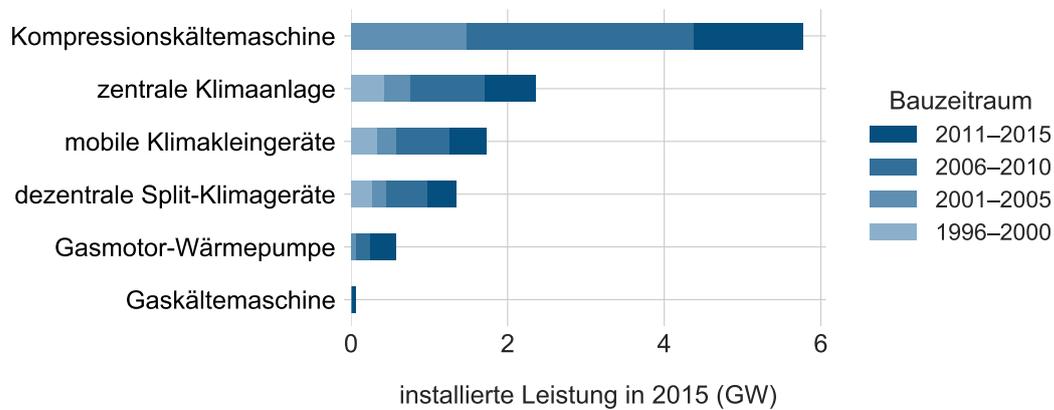


Abbildung 2.11: Installierte thermische Leistung zur Bereitstellung von Prozesskälte in GW im Jahr 2015 in Abhängigkeit des Stützjahrs, in dem die Technologie erbaut wurde. Eigene Darstellung der Ergebnisse der in Unterkapitel 2.3.3 beschriebenen Bestandserhebung.

Der Anteil der Prozesskälte lag im Jahr 2017 bei 3,3 % (13,4 TWh) des gesamten Endenergiebedarfs. Die Bereitstellung erfolgt mithilfe der beiden Technologien Kompressionskältemaschine und Gaskältemaschine. Für die Klimakälte, mit einem Anteil von 1 % (3,9 TWh), werden aufgrund der verfügbaren Daten vier unterschiedliche Technologien betrachtet, die sich in zentrale und dezentrale Anwendungen aufteilen.

### Aufbereitung

Das Verfahren zur Aufbereitung des Zubaus und der Aktivitäten sind für die Anwendungsbereiche Prozess- und Klimakälte für den Sektor identisch dem der Prozesswärme. Die Bedarfsdaten für die Aufteilung der Kälteerzeugung nach Branche stammen aus [13] und die Informationen bezüglich der Volllaststunden aus [11, 44]. Die Anteile der Technologien zur Klimatisierung von Gebäuden entstammen für den Sektor GHD aus [11, 44].

### 2.3.4 Beleuchtung

Mit einem Anteil von 11,9 % (47,5 TWh) ist Beleuchtung der drittgrößte Anwendungsbereich nach Wärme und mechanischer Energie im Sektor GHD im Jahr 2017 (vgl. Tabelle 2.3). Der Bedarf an Beleuchtung wird ausschließlich mit elektrischer Energie gedeckt und verursacht 32,4 % des sektoralen Endenergiebedarfs der elektrischen Energie. Die installierte Lichtleistung des Sektors ist in Abbildung 2.12 in Form des abgegebenen Lichtstroms dargestellt.

### Aufbereitung

Die installierte elektrische Leistung, der Strombedarf, die Volllaststunden und die Nutzungsgrade der unterschiedlichen Beleuchtungsanlagen und Branchen stammen aus [13]. Die Daten sind ab dem Jahr 2000 verfügbar.

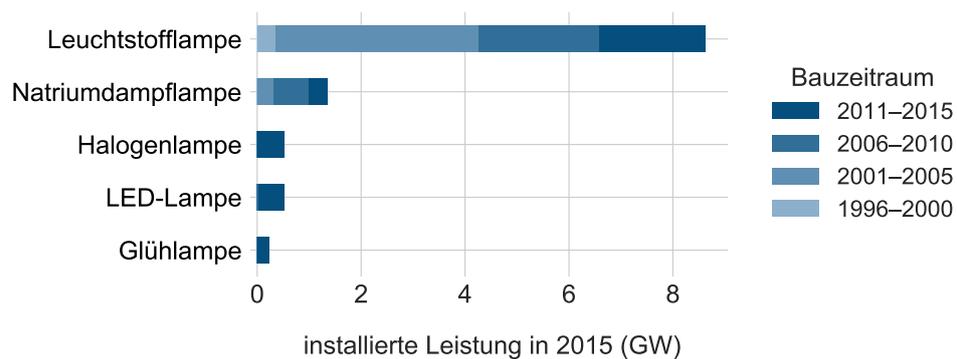


Abbildung 2.12: Installierter Lichtstrom zur Bereitstellung von Beleuchtung in GW im Jahr 2015 in Abhängigkeit des Stützjahrs, in dem die Technologie erbaut wurde. Eigene Darstellung der Ergebnisse der in Unterkapitel 2.3.4 beschriebenen Bestandserhebung.

Für die Berechnung des Zubaus für Beleuchtungstechnologien mit einer Lebensdauer größer als 15 Jahre wird vor dem Jahr 2000 ein gleichverteilter Zubau angenommen. Die Berechnung des Zubaus unterscheidet sich für die Glüh- und Halogenlampe, da diese aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer bereits innerhalb eines Stützjahrs vollständig ausgetauscht werden. Für die restlichen Technologien wird der Zubau basierend auf dem konstanten Zubau vor 2000 und der installierten Leistung berechnet. Die für die Berechnung des Zubaus notwendige Lebensdauer einer Beleuchtungsanlage wird aus [45] entnommen. Die Aktivität wird aus dem Strombedarf und den Nutzungsgraden für die jeweiligen Technologien und Branchen berechnet.

### 2.3.5 Mechanische Energie

Die mechanische Energie verursachte 17,9 % des sektoralen Endenergiebedarfs im Jahr 2017 (vgl. Tabelle 2.3). Dies entspricht einem Bedarf von 71,7 TWh und ist nach der Wärmebereitstellung der zweitgrößte Anwendungsbereich im Sektor GHD. Der Bedarf an mechanischer Energie wird im Wesentlichen anhand von zwei Energieträgern gedeckt: Strom mit 54,0 % und Kraftstoffe mit 45,6 %. Die installierte mechanische Leistung der Elektro- und Verbrennungsmotoren ist in Abbildung 2.13 aufgezeigt.

#### Aufbereitung

Der Bestand wird für vier Technologien zur Umwandlung von elektrischer zu mechanischer Energie sowie einer Technologie für die Umwandlung von Kraftstoffen ab dem Stützjahr 2000 erhoben. Die installierte elektrische Leistung, der Nutzungsgrad und der Strombedarf je Branche stammen aus [13], die Lebensdauer ist aus [46] entnommen. Der historische Strombedarf für die Bereitstellung von mechanischer Energie und die Branchenaufteilung stammen aus [13, 16]. Die Verteilung der einzelnen Technologien wird aus dem spezifischen Anteil des Bedarfs nach [13] berechnet. Der Zubau wird aus der Differenz der installierten Leistung sowie für Technologien mit einem Baujahr vor 2000 als konstanter historischer Zubau berechnet.

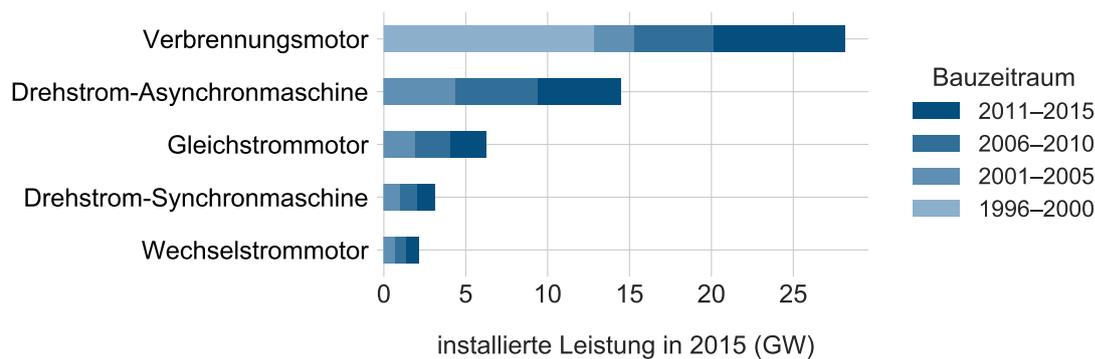


Abbildung 2.13: Installierte mechanische Leistung zur Bereitstellung von mechanischer Energie in GW im Jahr 2015 in Abhängigkeit des Stützjahrs, in dem die Technologie erbaut wurde. Eigene Darstellung der Ergebnisse der in Unterkapitel 2.3.5 beschriebenen Bestandserhebung.

Ein großer Teil des eingesetzten Kraftstoffs wird in der Landwirtschaft für die Bereitstellung von mechanischer Energie in Form von Traktoren und Erntemaschinen eingesetzt. Der notwendige Kraftstoffbedarf zur Deckung des Bedarfs pro Branche und der Nutzungsgrad stammen aus [13]. Die installierte Leistung wird anhand der Volllaststunden und der mittleren Motorenleistung berechnet. Die Volllaststunden berechnen sich aus den Betriebsstunden [11] sowie dem eingesetzten Kraftstoff [47, 48], in Abhängigkeit von der mittleren Motorenleistung [49, 50]. Der Zubau wird anschließend analog dem Zubau der elektrisch erzeugten mechanischen Energie ermittelt. Die Aktivität der Elektro- und Verbrennungsmotoren wird abschließend aus dem spezifischen Bedarf und den Nutzungsgraden für die jeweiligen Technologien und Branchen berechnet.

### 2.3.6 Information und Kommunikation

Im Jahr 2017 lag der Strombedarf zur Deckung des Bedarfs an Information und Kommunikation (IKT) bei 24,7 TWh. Dieser Bedarf entspricht 6,2 % des gesamten Endenergiebedarfs des GHD-Sektors. Für den Anwendungsbereich IKT werden aufgrund der unzureichenden Datenlage und des geringen Anteils am Endenergiebedarf des Sektors keine historische Zubauleistung und Aktivität für die definierte Technologie „IKT“ zur Bereitstellung von IKT-Nutzerenergie ermittelt. Der Nutzungsgrad dieser Technologie zur Umwandlung von Strom zu IKT wird nach [13] mit 100 % festgelegt. Der historische IKT-Bedarf pro Branche nach [13] wird ausschließlich für die Modellkalibrierung und Fortschreibung des Nutzenergiebedarfs für Information und Kommunikation verwendet.



## Kapitel 3

# Nutzenergieprojektion

Die Projektion des zukünftigen Energiebedarfs bildet das Fundament vieler Bottom-Up-Energiesystemmodelle. Die Modelle sind so konzipiert, dass sie die optimale Bereitstellung der Energie unter den gegebenen Nebenbedingungen berechnen. Somit hat die Größe des zukünftigen Energiebedarfs eine deutliche Auswirkung auf die Beantwortung der jeweils gestellten Forschungsfrage. In dieser Arbeit beinhaltet diese die optimale Zusammensetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen entlang des technologischen Transformationspfads für den Sektor GHD.

Dieses Kapitel beginnt mit einer kurzen grundlegenden Einführung in die Methoden der Projektion des zukünftigen Energiebedarfs und einer kurzen Übersicht der eingesetzten Verfahren für die Projektion des zukünftigen Energiebedarfs für den Sektor GHD. Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen wird die entwickelte Methodik dargestellt. Diese ermöglicht die Projektion des zukünftigen jährlichen Nutzenergiebedarfs der Branchen des GHD-Sektors basierend auf sektoralen Parametern und Temperaturdaten aus Klimamodellen.

### 3.1 Modellierung des zukünftigen Energiebedarfs

Die Modellierung und Projektion des Energiebedarfs nimmt eine zentrale Rolle bei der Planung von Energiesystemen und der Erstellung von zukünftigen Strategien bezüglich der Einsatzplanung und Treibhausgasemissionsreduzierung ein. Daher werden derartige Modelle auch zur Unterstützung der Energiepolitik eingesetzt. Die Erstellung einer Bedarfsprojektion erfolgt normalerweise mittels mathematischer Modelle auf Basis historischer und zukünftiger Parameter. Diese werden anhand des Einflusses auf das betrachtete Energiesystem ausgewählt [51]. Die Kenngrößen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der gewünschten räumlichen (z. B. nationalen oder sektoralen) und zeitlichen (z. B. jährlichen oder stündlichen) Auflösung der Bedarfsprojektion. Im Wesentlichen sind es Daten zu Lastverläufen, Produktionsdaten, Klimadaten, Maßzahlen der Wirtschaftsleistung und der Bevölkerungsentwicklung, die um Szenarioannahmen erweitert werden. [52]

Es existieren zahlreiche Möglichkeiten für die Klassifizierung der unterschiedlichen Ansätze der Projektion des zukünftigen Energiebedarfs [53]. Eine Möglichkeit ist die Einteilung nach den zugrunde liegenden Modellierungskonzepten. Nennenswerte Konzepte sind zum einen

ökonomische Modelle, die ökonomischen Grundlagen folgen. Zum anderen gibt es Ansätze basierend auf einer detaillierten Technologieabbildung: die sogenannten technoökonomischen Modelle. Die dritte Modellkategorie stellt eine Vereinigung der beiden Ansätze hin zu hybriden Modellen dar. [52]

Ferner können die Modellierungsansätze in Top-Down- und Bottom-Up-Modelle eingeteilt werden. Grundsätzlich versuchen Top-Down-Modelle die gesamte Wirtschaft abzubilden. Zur Vereinfachung werden die Sektoren der Erzeugung (Umwandlungssektor) und des Bedarfs (Endverbrauchssektoren) aggregiert betrachtet. Bei diesem Ansatz kommen vor allem ökonomische Modelle (engl. Computable General Equilibrium Models) zum Einsatz. Die Bottom-Up-Modelle bilden die Energiewirtschaft hingegen technologisch detailliert ab. Die eingesetzten Technologien werden in diesen Modellen zum einen auf Grundlage ihrer Eigenschaften, wie z. B. Wirkungsgrade und Lebensdauer, und zum anderen anhand ihrer variablen und fixen Kosten (ökonomische Eigenschaften) charakterisiert. Bei diesem Ansatz werden jedoch oft die Wechselwirkungen zwischen Energiesystem und Wirtschaft nicht hinreichend betrachtet. [54]

Für die Modellierung des zukünftigen Energiebedarfs haben sich vor allem die in den nachfolgenden Unterkapiteln dargestellten ökonomischen und Endverbraucher-Modelle durchgesetzt [52, 55, 56].

### 3.1.1 Ökonometrischer Ansatz

Der ökonometrische Ansatz ist eine etablierte Methode bei der ökonomischen Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Hierbei wird eine statistische Beziehung zwischen einer abhängigen Variable und ausgewählten unabhängigen Variablen für historische Daten hergestellt. Diese identifizierte Beziehung wird genutzt, um eine Projektion für die Zukunft zu erstellen. Die möglichen zukünftigen Veränderungen werden anhand der unabhängigen Variablen im Modell widergespiegelt. Die Auswirkung dieser auf die abhängige Variable ergibt die Projektion. [51, 52]

Ein Beispiel für diesen Ansatz ist die Modellierung des linearen Zusammenhangs zwischen dem Einkommen  $Y$  in Form des BIP und dem Energiebedarf  $E$  für eine ausgewählte Periode  $t$  nach:

$$E_t = a + bY_t. \quad (3.1)$$

Dieser Ansatz besitzt den theoretischen Charme der engen Koppelung mit der Konsum- und Produktionstheorie. Des Weiteren kann die Anzahl der relevanten Variablen basierend auf dieser Theorie abgeleitet werden. Der Einfluss auf das Modell dieser Variablen lässt sich zudem statistisch auswerten. [52]

Ein verbreitetes Verfahren basierend auf diesem Ansatz ist die Regressionsanalyse. Dies liegt daran, dass die Anwendungsgebiete der Modelle, die basierend auf diesem Grundsatz zum Einsatz kommen, sehr vielfältig sind. So wird z. B. in [57] der zukünftige Strombedarf auf nationaler Ebene modelliert und in [58] der Strom- und Gasbedarf für einen Supermarkt.

Für eine zufriedenstellende Güte der Projektion muss gewährleistet sein, dass die Eingangszeitreihen stationär sind. Als stationäre Zeitreihen werden jene bezeichnet, deren statistische

Eigenschaften wie z. B. Mittelwert und Varianz über die Zeit konstant sind. Sollten diese Anforderungen nicht zutreffen, sodass sich die statistischen Eigenschaften im Laufe der Zeit verändern und somit kein langfristiges Gleichgewicht zwischen den Zeitreihen vorliegt, kann das Konzept der Kointegration zur Projektion des Bedarfs angewendet werden. [52]

### 3.1.2 Endverbraucher-Ansatz

Endverbraucher-Modelle, oder auch Bottom-Up-Modelle genannt, bilden das betrachtete System im Detail ab. Dieser Ansatz ist daher gut zur Projektion der Endenergie geeignet, da sowohl technologische Effizienzsteigerungen als auch strukturelle Veränderungen abgebildet werden können. Die grundsätzliche Berechnung des Energiebedarfs  $E$  erfolgt nach:

$$\bar{E}_{t,i} = Q_{t,i} \cdot I_{t,i}. \quad (3.2)$$

Durch die Verknüpfung von Energieintensität  $I$  (Energiebedarf pro Bezugsgröße) und der Bezugsgröße  $Q$  (z. B. Bevölkerung, Beschäftigte oder Gebäudeflächen) wird der Bedarf für eine energieverbrauchende Aktivität  $i$  (z. B. Wärmebereitstellung) einer Periode  $t$  berechnet. Die Variation von Energieintensität und Bezugsgröße erlaubt es, unterschiedliche Szenarien im Betrachtungszeitraum zu entwickeln. Dabei werden technologische Effizienzverbesserungen mittels der Veränderung der Energieintensität und den strukturellen Änderungen des Bedarfs anhand der Bezugsgrößen betrachtet. Der gesamte Energiebedarf des Energiesystems (z. B. Sektor) wird durch die Summierung aller Aktivitäten nach:

$$E_t = \sum_{i=1}^n \bar{E}_{t,i} \quad (3.3)$$

berechnet. Diese Aufschlüsselung nach verschiedenen Aktivitäten, die den Energiebedarf beeinflussen, erlaubt eine umfassendere Projektion des gesamten Bedarfs. Der grundlegende Zusammenhang des Endverbraucher-Ansatzes ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt. [52, 55]

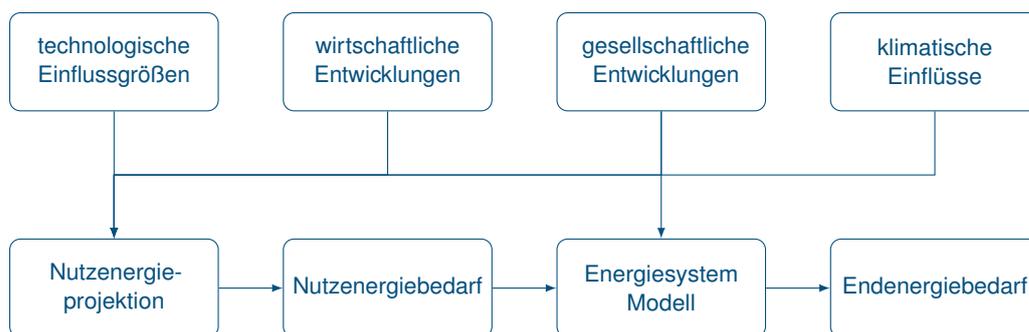


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Endverbraucher-Ansatzes zur Projektion des zukünftigen Energiebedarfs. Eigene Darstellung in Anlehnung an [52].

Ein Vorteil von Modellen, die auf dem Endverbraucher-Ansatz aufbauen, besteht darin, dass diese die Zukunft nicht ausschließlich von der Vergangenheit ableiten, sondern auf Basis unterschiedlicher Szenarien auch andere Entwicklungen aufzeigen können.

Der Nachteil dieses Ansatzes liegt in der meist unzureichenden Kopplung an makroökonomischen Entwicklungen. [52]

### 3.1.3 Gängige Ansätze für den Sektor GHD

Im Vergleich zu anderen Endverbrauchssektoren liegen für den GHD-Sektor weniger Studien vor, die sich mit der Projektion des zukünftigen Energiebedarfs beschäftigen [52]. Nach [59] sind diesbezüglich vor allem zwei Gründe zu nennen. Zum einen ist hierfür die Definition des Sektors verantwortlich, die im Vergleich zu Industrie, Haushalt und Verkehr nicht eindeutig ist. Zum anderen existiert eine mangelnde konsistente Datengrundlage, die als Basis für eine systematische Analyse des Sektors herangezogen werden könnte.

Eine Projektion des zukünftigen Energiebedarfs für den deutschen GHD-Sektor erfolgt oft in Zusammenhang mit Studien und dem Ziel einer gesamtwirtschaftlichen sowie sektorübergreifenden Modellierung des Energiesystems. Teilweise wird jedoch in diesen Studien keine genaue Aussage bezüglich der verwendeten Projektionsmethodik des Energiebedarfs getätigt. Für diese Arbeit wurden drei Studien identifiziert, die eine Beschreibung des angewandten Ansatzes darlegen und einen Zeitraum bis 2050 untersuchen.

Die Studie „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“ [60] aus dem Jahr 2014 verwendet den Endverbraucher-Ansatz für die Projektion des zukünftigen Bedarfs. Die sektorale Projektion des Endenergiebedarfs erfolgt hierbei für jeden Sektor mittels Bottom-Up-Modellen auf Basis von geeigneten Leitvariablen (z. B. Bevölkerungsentwicklung). Die Preiselastizität des Bedarfs wird mittels ökonomischer Verfahren ermittelt und in die Bottom-Up-Modelle integriert. Bezüglich der Projektion für den Sektor GHD werden keine zusätzlichen Angaben getätigt.

In der Studie „Klimapfade für Deutschland“ [61] aus dem Jahr 2018 wurde ein Bottom-Up-Modell der Prognos AG für die Projektion verwendet. Die Prognos AG war auch an der Studie zur Erstellung der Energiereferenzprognose [60] beteiligt. Für eine genauere Modellierung des GHD-Sektors wird dieser in elf Branchen eingeteilt. Des Weiteren werden die Anwendungsbereiche Raumwärme und Warmwasser, Prozesswärme, Kühlen und Lüften, Beleuchtung, Bürogeräte sowie Kraftanwendungen in die Simulation integriert. Der zukünftige Endenergiebedarf wird anhand von Veränderungen der Beschäftigten, Flächenindikatoren, Wertschöpfung, Ausstattungsgrade, Anlagen usw. berechnet.

Die detailliertesten Angaben zur Modellierung des GHD-Sektors finden sich in der Studie „Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht“ [62]. Auch hier handelt es sich um ein Bottom-Up-Simulationsmodell. Der gesamte Energiebedarf ergibt sich aus der Berechnung des Bedarfs der acht betrachteten Branchen und der 13 Energiedienstleistungen. Die Energiedienstleistungen in Form von Beleuchtung, Kühlung oder IKT sind an die Anwendungsbereiche der Nutzenergie angelegt. Der Endenergiebedarf berechnet sich aus der Verknüpfung von Verbreitung und Aktivitätsgröße, wie z. B. der Anzahl der Beschäftigten, und den technologischen Einflussfaktoren, wie z. B. installierte Leistung oder Nutzungsdauer, sowie der zukünftigen Diffusionsrate einer Technologie.

## 3.2 Methodik

Die entwickelte Methodik zur Modellierung des Nutzenergiebedarfs für den Sektor GHD basiert auf dem Endverbraucher-Ansatz. Die Projektion des zukünftigen Energiebedarfs erfolgt im Gegensatz zu [60, 61, 62] auf der Ebene der Nutzenergie. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass nur Veränderungen bezüglich der Bedürfnisse der Endnutzer nach Energie betrachtet werden. Dieses Vorgehen reduziert ferner die Anzahl der Parameter, die für das Modell in den unterschiedlichen Szenarien parametrisiert werden müssen. Technologische Veränderungen in Form von z. B. Effizienzsteigerungen müssen somit nicht über die Nutzenergieprojektion in die Zukunft modelliert werden. Diese Entwicklungen werden anhand der Modellierung des Endenergiebedarfs im Modell *MESSAGEix-GHD*, das in Kapitel 4 beschrieben ist, abgebildet.

Im Jahr 2016 lag der Anteil von Raumwärme und Klimakälte bei rund 59% am gesamten Nutzenergiebedarf des GHD-Sektors (vgl. Abbildung 2.1). Aufgrund des hohen Anteils und der Temperaturabhängigkeit dieser Anwendungsbereiche wird eine Temperaturkorrektur in die Berechnungsmethodik für die Projektion des zukünftigen Bedarfs von Raumwärme und Klimakälte integriert.

Ein vereinfachtes Schema für die Projektion des zukünftigen Nutzenergiebedarfs des Sektors ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Der Zusammenhang zwischen den historischen Daten und den möglichen Szenarioeingaben der entwickelten Berechnungsmethodik wird in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer beschrieben.

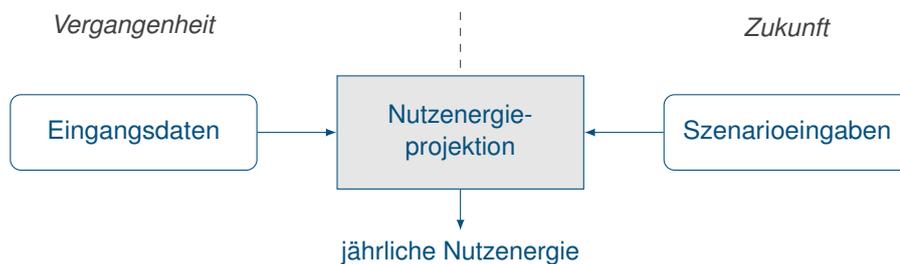


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Methodik zur Nutzenergieprojektion. Übersicht des funktionalen Zusammenhangs der historischen Daten und der zukünftigen Szenarioparameter.

### 3.2.1 Temperaturdaten

Die notwendigen Temperaturdaten zur Berechnung des Temperaturkorrekturfaktors werden aus dem regionalen Klimamodell RCA4 [25] des Rossby Centers vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut für Deutschland extrahiert. Das RCA4-Modell wurde für die europäische Domäne des Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) im Rahmen des World Climate Research Programme (WCRP) für die notwendigen Klimaprojektionen des 5. Sachstandsberichts des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) erstellt. Das Modell wurde mit zwei unterschiedlichen horizontalen Auflösungen im Raster von  $0,44^\circ$  (50 km-Raster) und  $0,11^\circ$  (12,5 km-Raster) für Europa umgesetzt.

Der zeitliche Horizont der Simulationen erstreckt sich von 1961 bis 2100. Der Zeitraum von 1961 bis 2005 wird als historisch betrachtet, da das Modell mit historischen Werten des

Strahlungsantriebs betrieben wird. Für die Zukunftsszenarien wird der Strahlungsantrieb der RCP-Szenarien des 5. Sachstandsberichts des IPCC verwendet, die ab dem Jahr 2005 definiert sind. Diese Szenarien beschreiben unterschiedliche repräsentative Konzentrationspfade (engl. Representative Concentration Pathways) (RCP) bis zum Jahr 2100. Dem Szenario RCP 2.6 (RCP 4.6) ist zugrunde gelegt, dass Strategien zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen dazu führen, dass sich der Strahlungsantrieb bis 2100 bei  $2,6 \text{ W/m}^2$  ( $4,5 \text{ W/m}^2$ ) stabilisiert. Das Szenario RCP 8.5 beschreibt hingegen den Fall, dass erhöhte Treibhausgasemissionen zu einem Strahlungsantrieb von  $8,5 \text{ W/m}^2$  führen. [25]

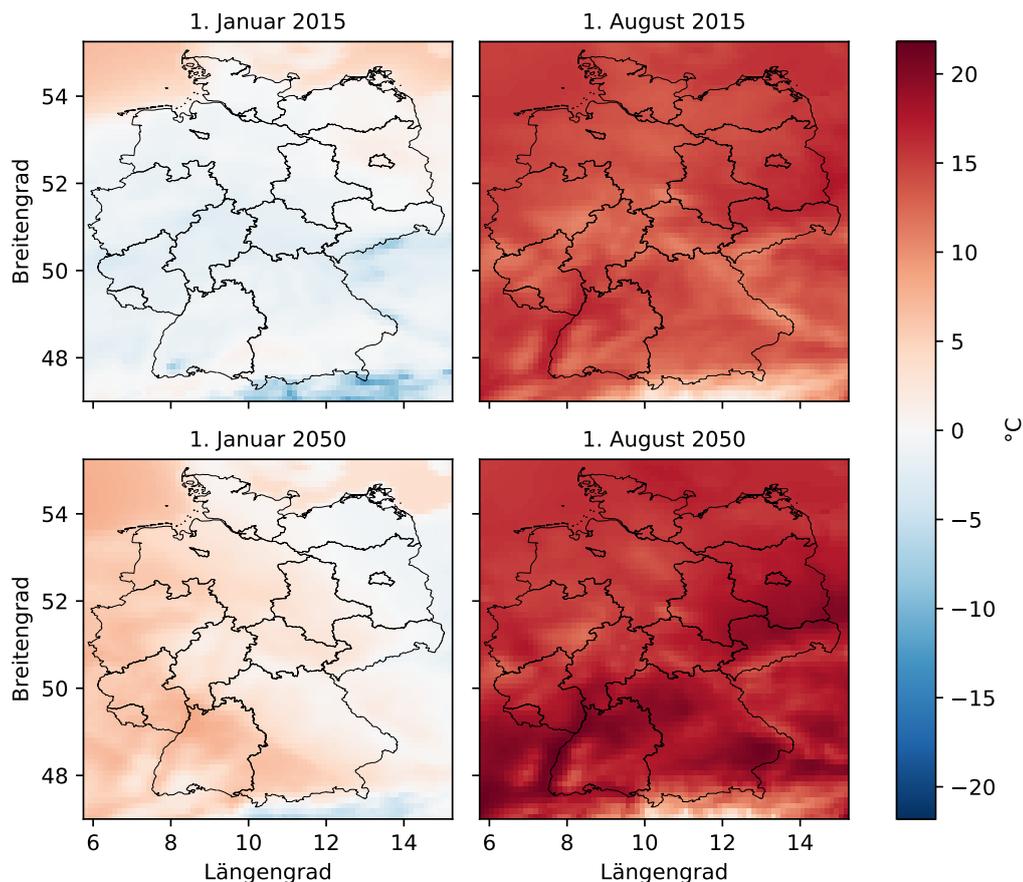


Abbildung 3.3: Vergleich der mittleren Temperaturen in zwei Meter Höhe für einen Tag im Januar und August für die Jahre 2015 und 2050. Die Daten für Deutschland basieren auf dem RCP-Szenario 8.5 des RCA4-Klimamodells [25].

Für die Nutzenergieprojektion wurden für die Tagesmitteltemperatur eine Höhe von zwei Meter und eine räumliche Auflösung von  $12,5 \text{ km} \times 12,5 \text{ km}$  ausgewählt. Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft einen Tag in Deutschland im Januar und einen im August, basierend auf dem Szenario RCP 8.5 für die Jahre 2015 und 2050. Die mittleren Temperaturen bei diesen zufällig gewählten Tagen sind im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2015 sowohl im Winter als auch im Sommer überwiegend höher. Bei einer anderen Wahl der Tage kann sich dies jedoch ändern.

Zur Berechnung der Tagesmitteltemperatur Deutschlands wurden im ersten Schritt die Temperaturwerte der Rasterpunkte für die jeweiligen Bundesländer mittels einer Längen- und Breitengradmaske [63] im Zeitraum von 2006 bis 2050 extrahiert. Im darauffolgenden Schritt wurden die mittleren Temperaturen je Bundesland anhand des Medians berechnet. Das Ergebnis dieser beiden Schritte ist eine Matrix der Form *Tag x Bundesland x Jahr x RCP-Szenario* (365x16x44x3). Abschließend wurde der gewichtete Temperaturmittelwert berechnet. Die Gewichtung erfolgte dabei anhand der Bevölkerung je Bundesland. Das Ziel dieses Verfahrens besteht darin, die Temperaturen bei der Skalierung des Nutzenergiebedarfs von dichter besiedelten Bundesländern stärker zu berücksichtigen (vgl. Unterkapitel 3.2.2). Die dazu notwendigen Bevölkerungszahlen der Bundesländer wurden aus der Statistik „Bevölkerungsentwicklung in den Bundesländern bis 2060“ [64] für die Variante „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ entnommen. Das Ergebnis dieses Berechnungsverfahrens ist eine Temperaturmatrix für Deutschland der Form *Tag x Jahr x RCP-Szenario* (365x44x3).

In Abbildung 3.4 ist der Verlauf der Jahresmitteltemperatur von 2006 bis 2050 für die unterschiedlichen RCP-Szenarien für Deutschland dargestellt. Die Linie zeigt den Mittelwert an, wobei die farbige Fläche den minimalen und maximalen Wert der Tagestemperatur umschließt. Das Diagramm zeigt eine leicht steigende Tendenz der Jahresmitteltemperatur für alle Szenarien. Ferner ist zu erkennen, dass die minimalen und maximalen Temperaturwerte über den zeitlichen Verlauf und die RCP-Szenarien stark schwanken.

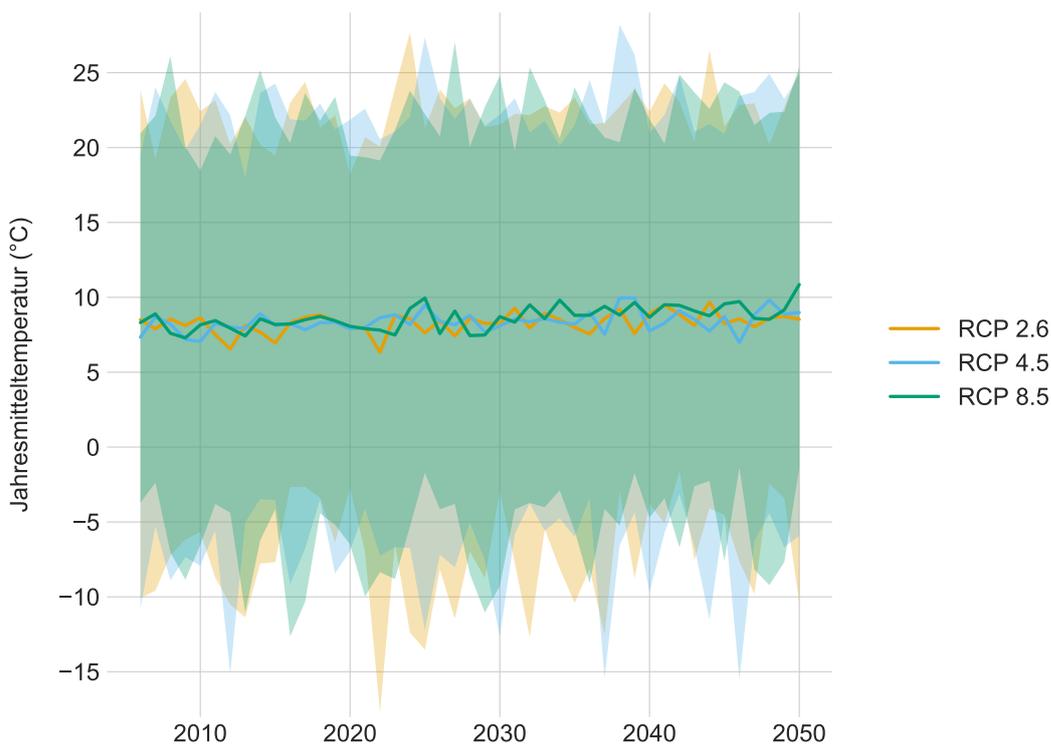


Abbildung 3.4: Zeitlicher Verlauf der mittleren Jahrestemperatur Deutschlands im Zeitraum von 2006 bis 2050. Die minimalen und maximalen Tagestemperaturen sind eingefärbt dargestellt. Eigene Berechnung nach [25, 64].

### 3.2.2 Temperaturkorrektur

Der Bedarf von Raumwärme und Klimakälte hängt zum einen von den Gewohnheiten der Verbraucher und zum anderen von der vorliegenden Außentemperatur ab. Daher wird für die Nutzenergieprojektion eine Temperaturkorrektur zur Berechnung des Nutzenergiebedarfs der Raumwärme und der Klimakälte integriert. Diese erlaubt eine Analyse der Auswirkungen des Klimas auf den Bedarf dieser Anwendungsbereiche. Die Temperaturkorrektur erfolgt wie in [13, 65] anhand der Skalierung des Bedarfs auf Grundlage der jährlichen Heizgradtags- und Kühlgradtagszahlen. Die für die Berechnung notwendigen Formelzeichen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Nomenklatur für die Berechnung der Heizgradtags- und Kühlgradtagszahlen.

Symbol	Einheit	Beschreibung
$t$	$a$	Jahr
$d \in D$	$d$	Tage $D = \{1 \dots 365\}$
$\vartheta_i$	$^{\circ}\text{C}$	Tagesmittelwert der Raumtemperatur
$\vartheta_a$	$^{\circ}\text{C}$	Tagesmittelwert der Außentemperatur
$HDD$	$K$	Heizgradtagszahl
$CDD$	$K$	Kühlgradtagszahl
$HDD'$	$K$	Referenz-Heizgradtagszahl
$CDD'$	$K$	Referenz-Kühlgradtagszahl
$s \in S$		Temperaturszenario $S = \{2014, RCP\ 2.6, RCP\ 4.5, RCP\ 8.5\}$
$f$		Temperaturkorrekturfaktoren

Die jährliche Heizgradtagszahl  $HDD$  berechnet sich anhand der Summierung der Differenz zwischen der mittleren gewählten Raumtemperatur  $\vartheta_i$  ( $20\ ^{\circ}\text{C}$ ) und der Tagesmitteltemperatur  $\vartheta_a$  der Außenluft, sofern die Heizgrenztemperatur von  $15\ ^{\circ}\text{C}$  nicht überschritten wird. [66]

$$HDD = \sum_{d \in D} \begin{cases} \vartheta_i - \vartheta_a^d, & \text{wenn } \vartheta_a^d < 15. \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Die jährliche Kühlgradtagszahl  $CDD$  berechnet sich analog der Heizgradtagszahl und ist in Gleichung 3.5 dargestellt. Der funktionale Zusammenhang beschreibt die Annahme, dass der Bedarf an Klimakälte steigt, wenn die mittlere Tagesaußentemperatur  $\vartheta_a$  den Grenzwert von  $18\ ^{\circ}\text{C}$  übersteigt. Der Temperaturgrenzwert zur Berechnung der Kühlgradtagszahl wird für die Temperaturkorrektur in dieser Arbeit auf  $15\ ^{\circ}\text{C}$  für eine symmetrische Grenztemperatur zwischen Heizen und Kühlen reduziert [65].

$$CDD = \sum_{d \in D} \begin{cases} \vartheta_a^d - 15, & \text{wenn } \vartheta_a^d > 15. \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.5)$$

Die Berechnung der Faktoren zur Temperaturkorrektur für die Anwendungsbereiche Raumwärme und Klimakälte sind in den Gleichungen 3.6 und 3.7 dargestellt. Der jährliche Korrekturfaktor ergibt sich aus dem Quotienten der jährlichen Heizgradtagszahl und der Referenzgradtagszahl

für die Temperaturszenarien  $S$ . Die Referenzgradtagszahlen  $HDD'$  (analog für  $CDD'$ ) berechnen sich aus dem Mittelwert der jährlichen Heizgradtagszahlen Deutschlands im Zeitraum von 2006 bis 2014. Diese sind für die jeweiligen RCP-Szenarien in Tabelle 3.2 aufgelistet. Die zugrunde liegenden Temperaturen zur Berechnung sind in Unterkapitel 3.2.1 beschrieben. Für die verbleibenden Anwendungsbereiche wird der Temperaturkorrekturfaktor auf ( $f_{a,s}^t = 1$ ) festgelegt. Somit wird für diese Bedarfe keine Korrektur vorgenommen.

$$f_{Raumwärme,s}^t = \frac{HDD^t}{HDD'_s} \quad (3.6)$$

$$f_{Klimakälte,s}^t = \frac{CDD^t}{CDD'_s} \quad (3.7)$$

Der jährliche Korrekturfaktor und der Trend dieses Faktors sind für den Anwendungsbereich Raumwärme in Abbildung 3.5 dargestellt. Der Faktor wird für das Szenario „Wetterjahr 2014“ über den Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050 als konstant angenommen. Die Daten zur Berechnung der Heizgradtagszahl stammen für dieses Wetterjahr vom Deutschen Wetterdienst DWD und wurden in [13] aufbereitet. Für die RCP-Szenarien offenbarten sich temperaturbedingt große Schwankungen mit einer sinkenden Tendenz zum Jahr 2050. Der Vergleich der Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 zeigt, dass der Faktor des Szenarios RCP 8.5 in den meisten Jahren kleiner ist. Dies hat auch zur Folge, dass in diesem Szenario der Wärmebedarf kleiner ist.

*Tabelle 3.2: Referenz Heizgradtags- und Kühlgradtagszahlen für die betrachteten Temperaturszenarien. Berechnet auf Basis der resultierenden Temperaturen der RCP-Szenarien Deutschlands. Eigene Berechnung für die RCP-Szenarien im Zeitraum von 2006 bis 2014 nach [25] und für 2014 [13].*

Referenzzahlen	Einheit	Temperaturszenario			
		2014	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
$HDD'$	$Kd/a$	3507	4258	4235	4236
$CDD'$	$Kd/a$	–	152	122	124

Die Entwicklung des Faktors für die Temperaturkorrektur der Klimakälte ist in Abbildung 3.6 ersichtlich. Analog der Korrektur des Wärmebedarfs wird für das Wetterjahr ein konstanter Faktor angenommen. Die RCP-Szenarien lassen einen steigenden Trend für die berechneten Temperaturkorrekturen bis zum Jahr 2050 erkennen. Die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 weisen einen sehr ähnlichen Trend auf, jedoch unterscheiden sich die jährlichen Faktoren und somit auch der resultierende Bedarf deutlich.

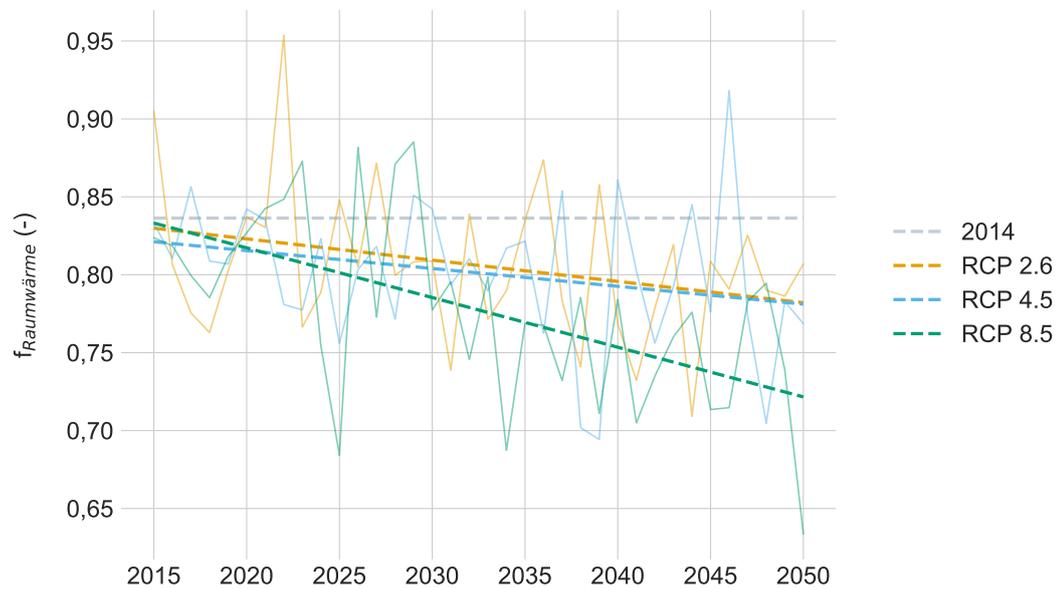


Abbildung 3.5: Verlauf der zeitlichen Entwicklung des Faktors für die Temperaturkorrektur des Anwendungsbereichs Raumwärme. Eigene Berechnung nach [13, 25, 64].

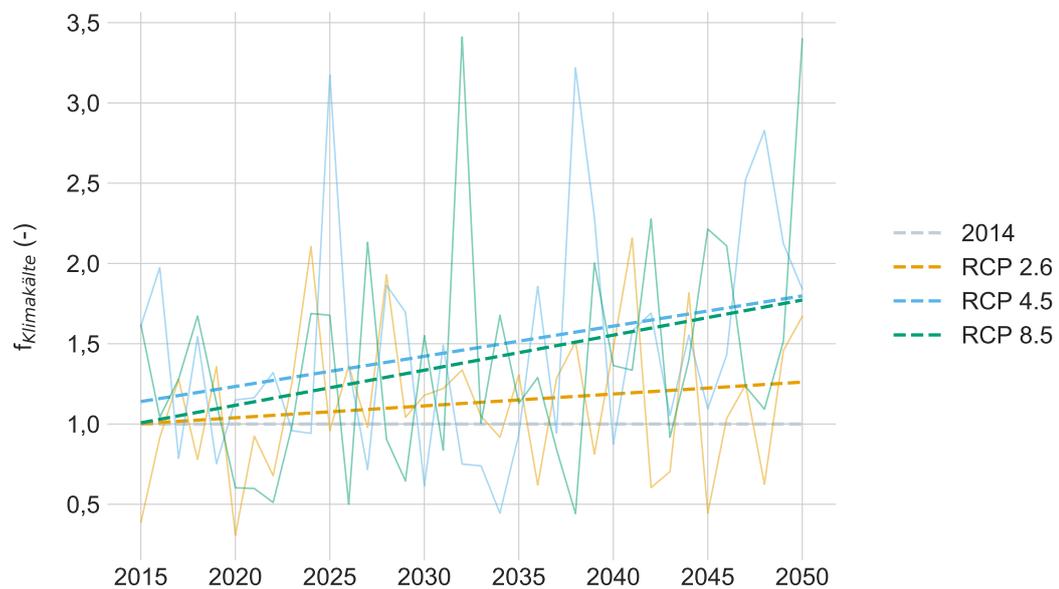


Abbildung 3.6: Verlauf der zeitlichen Entwicklung des Faktors für die Temperaturkorrektur des Anwendungsbereichs Klimakälte. Eigene Berechnung nach [25, 64].

### 3.2.3 Bezugseinheiten

Für die einzelnen Branchen des GHD-Sektors werden die Definitionen der Bezugseinheiten und die daraus resultierenden historischen Werte der Jahre vor 2014 aus den Studien [11, 13] verwendet. Für die Branchen Baugewerbe, Bürobetriebe, Herstellung, Handel, Gastgewerbe, Nahrungsmittel, Wäschereien, Landwirtschaft, Gartenbau, Textil, Bekleidung und Spedition beschreibt die Bezugseinheit die Anzahl der Erwerbstätigen je Branche. Die Erwerbstätigen wurden dabei aus dem Unternehmensregister und den Angaben zur Erwerbstätigenrechnung der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung abgeleitet. Für die Branchen Krankenhäuser (Planbetten), Schulen (Anzahl Schüler), Bäder (Wasserfläche in m<sup>2</sup>) und Flughäfen (Verkehrseinheiten) wurden Bezugseinheiten abweichend von den Erwerbstätigen definiert. Diese wurden mittels diverser Statistiken identifiziert und berechnet. Für die verbleibenden Branchen, die nicht aus den oben genannten Studien entnommen werden konnten, wurde die Bezugseinheit einheitslos auf eins (z. B. eine Einheit Militär) festgelegt (vgl. Branchen in Tabelle 2.1). [11, 13]

### 3.2.4 Spezifischer Nutzenergiebedarf

Ein zentraler Parameter für die Projektion des zukünftigen Bedarfs ist der spezifische Nutzenergiebedarf. Dieser berechnet sich aus dem Quotienten der Nutzenergie und der Bezugseinheit (vgl. Gleichung 3.8). Der spezifische Bedarf beschreibt somit den Nutzenergiebedarf pro Bezugseinheit, der für den Großteil der Branchen den Bedarf pro Erwerbstätigen darstellt. Die jährliche Auflösung der Berechnung wird als Jahressumme festgelegt. Die Parameter und Variablen zur Berechnung sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

$$I_{b,a,e,s}^t = \frac{\widehat{NE}_{b,a,e,s}^t}{BZE_b^t} \quad (3.8)$$

Für die Berechnung des spezifischen Nutzenergiebedarfs werden die witterungsbereinigte Nutzenergie je Branche, Anwendungsbereich und Energieträger aus [13, 15] und die berechneten Faktoren für die Temperaturkorrektur verwendet. Die Witterungsbereinigung erfolgt für den Anwendungsbereich Raumwärme nach Gleichung 3.9. Die Bereinigung der Klimakälte wird analog berechnet, indem die Heizgradtagszahl durch die Kühlgradtagszahl ersetzt wird (vgl. Gleichung 3.10).

$$\widehat{NE}_{b,Raumwärme,e,s}^t = NE_{b,Raumwärme,e}^t \cdot \frac{HDD'_s}{HDD_t} \quad (3.9)$$

$$\widehat{NE}_{b,Klimakälte,e,s}^t = NE_{b,Klimakälte,e}^t \cdot \frac{CDD'_s}{CDD_t} \quad (3.10)$$

Die notwendigen Formelzeichen für die Beschreibung des spezifischen Nutzenergiebedarfs und der Witterungsbereinigung sowie der nachfolgenden Berechnungsmethodik der Nutzenergieprojektion sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Tabelle 3.3: Nomenklatur für die Berechnung des zukünftigen Nutzenergiebedarfs.

Symbol	Einheit	Beschreibung
$b \in B$		Branche(n)
$a \in A$		Anwendungsbereich(e)
$e \in E$		Energieträger $E = \{\text{Strom, Fernwärme, Brennstoffe}\}$
$BZE$		Bezugseinheit
$I$	$TWh$	spezifischer Nutzenergiebedarf
$NE$	$TWh$	Nutzenergiebedarf
$\overline{NE}$	$TWh$	witterungsbereinigter Nutzenergiebedarf
$V$		Vergangenheit $t = \{2006 \dots 2014\}$
$Z$	$a$	Zukunft $t = \{2015 \dots 2050\}$
$\Delta BZE$	$a$	prozentuale Veränderung der Bezugseinheit
$\Delta I$	$TWh$	prozentuale Veränderung des spezifischen Nutzenergiebedarfs
$\overline{BZE}$		fortgeschriebene Bezugseinheit
$\overline{I}$	$TWh$	fortgeschriebene Energieintensität

### 3.2.5 Berechnungsmethodik

Die Berechnung der Bottom-Up-Projektion der Nutzenergie ist in drei Blöcke – Eingangsdaten, Szenariodaten und Nutzenergieprojektion – aufgeteilt (vgl. Abbildung 3.2).

Die Grundlage der Berechnungsmethodik bildet der Block der Eingangsdaten. In diesem sind die historischen Daten  $V$  der Bezugseinheiten  $BZE_b^t$  und der berechneten Energieintensitäten  $I_{b,a,e,s}^t$  Deutschlands hinterlegt. Ferner werden in diesem Abschnitt die Temperaturdaten der unterschiedlichen Temperaturszenarien  $S$  für die Vergangenheit und die Zukunft  $Z$  abgelegt.

Die Eingabe der Szenariodaten wird im zweiten Block abgebildet. Hier werden für den Betrachtungszeitraum  $Z$  von 2015 bis 2050 die jährlichen Veränderungen der Parameter in Prozent festgelegt. Die Parameter können abhängig vom Szenario für die Bezugseinheit  $\Delta BZE_b^t$  und die Energieintensitäten  $\Delta I_{b,a,e,s}^t$  für alle Branchen, Anwendungsbereiche und Energieträger definiert werden. Für die Betrachtung unterschiedlicher Klimapfade muss ein Temperaturszenario  $S$  ausgewählt werden.

Das Bindeglied zwischen den Eingangsdaten und der Szenarioeingabe stellt die Nutzenergieprojektion dar. In diesem wird anhand der getroffenen Annahmen und auf Basis der bereitgestellten Eingangsdaten der Nutzenergiebedarf als Jahressumme für den Zeitraum von 2015 bis 2050 berechnet. Die Berechnung erfolgt dabei in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Szenarioparameter ( $\overline{BZE}$  und  $\overline{I}$ ) in die Zukunft fortgeschrieben. Die Fortschreibung erfolgt durch die Berechnung der prozentualen Veränderung zum Vorjahr und ist in den Gleichungen 3.11 und 3.12 aufgezeigt.

$$\overline{BZE}_b^t = BZE_b^t \left( 1 + \Delta BZE_b^{t-1} \right) \quad (3.11)$$

$$\overline{I}_{b,a,e,s}^t = I_{b,a,e,s}^t \left( 1 + \Delta I_{b,a,e,s}^{t-1} \right) \quad (3.12)$$

Im zweiten und abschließenden Schritt erfolgt die Berechnung der jährlichen Nutzenergie (vgl. Gleichung 3.13). Diese ergibt sich aus der Multiplikation der Bezugseinheit, dem spezifischen Nutzenergiebedarf und dem Faktor zur Temperaturkorrektur.

$$NE_{b,a,e,s}^t = \overline{BZE}_b^t \cdot \bar{I}_{b,a,e,s}^t \cdot f_{a,s}^t \quad (3.13)$$



## Kapitel 4

# Modellierung des Sektors

Das entwickelte Konzept und die daraus abgeleitete Softwarearchitektur für die energetische Modellierung des heterogenen Sektors GHD werden in diesem Kapitel vorgestellt. Das Kapitel beginnt mit einer kurzen Analyse der bestehenden Energiesystemmodelle und deren Klassifizierung anhand von ausgewählten Kriterien. Darauf aufbauend wird das ausgewählte Modellierungsframework *MESSAGEix* zur Abbildung der zukünftigen technologischen Entwicklungspfade des GHD-Sektors beschrieben. Im Anschluss an die Einführung von *MESSAGEix* wird die darauf aufbauend entwickelte Modellarchitektur erläutert. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung des Aufbaus und der Struktur sowie den wichtigsten Eingangsdaten des entwickelten Energiesystemmodells *MESSAGEix-GHD* ab.

### 4.1 Modellierung von Energiesystemen

Komplexe Zusammenhänge werden in vielen wissenschaftlichen Disziplinen und Bereichen der Wirtschaft mithilfe von mathematischen Modellen dargestellt. Ziel eines Modellierungsprozesses ist es, ein vereinfachtes Abbild der Realität anhand eines abstrahierten Modells zu erstellen. Modelle bilden in vielen unterschiedlichen Bereichen eine fundamentale Grundlage, um komplexe Sachverhalte besser verstehen zu können. Diese Modelle stellen somit ein unterstützendes Instrument für den Prozess der datenbasierten Entscheidungsfindung dar. [67]

Auch in der Energiewirtschaft ist der Ansatz der Modellierung ein weit verbreitetes Werkzeug, um ein besseres Verständnis des zunehmend komplexer werdenden Energiesystems zu erlangen. Modelle werden beispielsweise eingesetzt, um die optimale Durchdringung von Technologien zu untersuchen oder um mögliche Auswirkungen bestimmter Maßnahmen auf den zukünftigen Entwicklungspfad zu bewerten. [68]

In Zusammenhang mit der Modellierung von Energiesystemen werden häufig die Begriffe Framework und Modell verwendet. Ein Framework bezeichnet im Wesentlichen ein Gerüst, auf dem ein Modell aufgebaut ist. Diese Struktur beinhaltet eine mathematische Formulierung oder eine Software-Umgebung. Die konkrete Modellierung einer bestimmten Region oder eines bestimmten Sektors auf Basis eines Frameworks mit den dafür angepassten Eingangsdaten wie z. B. Technologien oder Nachfrage wird als Modell bezeichnet. [68]

Die Modellierungslandschaft auf europäischer Ebene ist aufgrund der zahlreichen unterschiedlichen Modelle sehr divers. Einen umfassenden Überblick über die bestehenden Modelle und ihre Anwendungsbereiche zu erhalten, stellt daher ein ressourcenintensives Unterfangen dar. Dies kann auch dazu führen, dass Forscher bestehende Modelle oder Modellfunktionalitäten übersehen und dadurch den Aufwand betreiben, diese Funktionalitäten neu zu entwickeln. [68] Ferner können diese Neuentwicklungen auch zur Folge haben, dass Modelle aufgrund der fehlenden Evaluierung durch die Wissenschaftsgemeinde mit Fehlern behaftet sind. Dieses Problem der Reduzierung der parallelen Anstrengungen und Doppelarbeit wird auch in [69] als einer von sechs Punkten zur Steigerung einer transparenten und reproduzierbaren Forschung im Bereich Energieforschung aufgeführt.

Die Vielzahl der unterschiedlichen Energiemodelle wird in verschiedenen Veröffentlichungen aufgezeigt, basierend auf ihren Grundzügen klassifiziert und mithilfe von Kriterien zu Gruppen zusammengefasst. In [68] werden 47 europäische Modelle der Energy Modelling Platform for Europe vorgestellt. Basierend auf einer breiten Literaturrecherche werden unterschiedliche Ansätze zur Klassifizierung aufgezeigt. Unter anderem werden neun Dimensionen beschrieben, die für die Einordnung von Energiemodellen hilfreich sind, sich jedoch nicht gegenseitig ausschließen. Die Veröffentlichung [70] untersucht 75 Modelle mit dem Fokus auf der zunehmenden Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem. Dabei werden die Eigenschaften der jeweiligen Modelle bezüglich 19 Kriterien aufgelistet. Die Verwendung von 22 Modellen und die Einordnung dieser anhand von 14 Kriterien wird in [71] beschrieben. Diese Modelle werden eingesetzt, um das Energiesystem des Vereinigten Königreichs (UK) zu untersuchen.

Die in den genannten Veröffentlichungen präsentierten Kriterien zur Klassifizierung von Energiemodellen unterscheiden sich in der Anzahl und in ihrem Detaillierungsgrad. Die grundlegende Klassifizierung von Energiesystemmodellen erfolgt hier nach folgenden Kriterien: Zweck (allgemeiner oder spezifischer), Modellstruktur (interne oder externe Annahmen), analytischer Ansatz (Top-Down oder Bottom-Up), zugrundeliegende Methodik (z. B. Simulation oder Optimierung), mathematischer Ansatz (z. B. lineare oder dynamische Programmierung) und der geografischen, sektoralen und zeitlichen Auflösung sowie dem Modellierungszeitraum.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen unterschiedliche technologische kostenoptimale Transformationspfade für den Sektor GHD hin zu einer klimaneutralen Energiebereitstellung bis zum Jahr 2050 untersucht werden. Der Sektor soll mittels eines Modells abstrahiert dargestellt werden und die möglichen Entwicklungspfade sind zu untersuchen. Für diese Aufgabe wird basierend auf den in diesem Kapitel vorgestellten Kriterien ein geeignetes Modellierungsframework ausgewählt. Die Grundlage für den Auswahlprozess bildet der Entscheidungsbaum, der in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Die Auswahl erfolgt nach vier übergeordneten Entscheidungsklassen: Infrastruktur, allgemeine Logik, Auflösung und Parameter. Diese Klassen sind jeweils mit Kriterien und deren Anforderungen (in grau gekennzeichnet) hinterlegt, die zur Beantwortung der Fragestellung notwendig sind. Die Auswahl fiel für diese Arbeit auf das Modellierungsframework *MESSAGEix* [24], da dieses die definierten Anforderungen erfüllt.

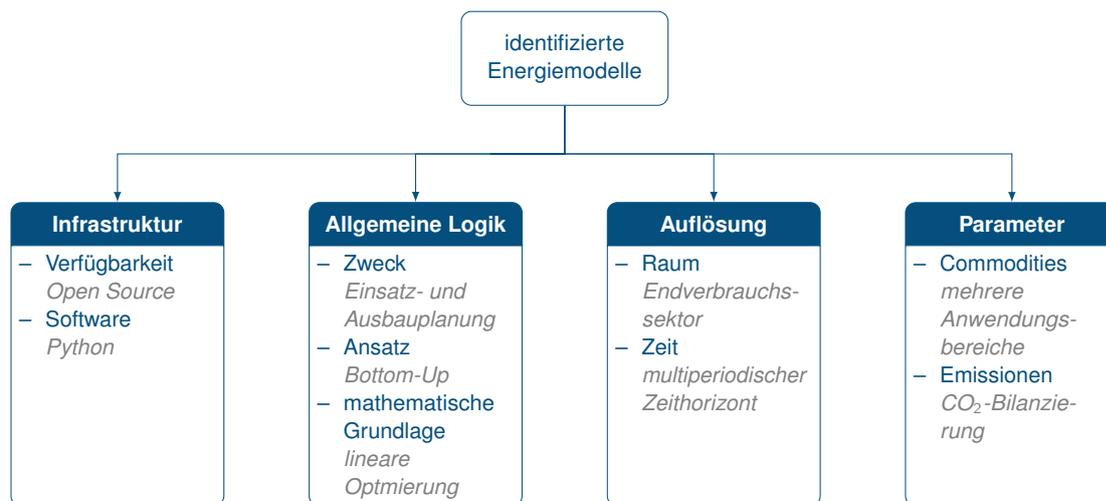


Abbildung 4.1: Entscheidungsbaum zur Identifikation des Modellierungsframeworks. Die jeweiligen Anforderungen an das Framework für diese Arbeit sind in grau beschrieben. Eigene Darstellung in Anlehnung an [70].

## 4.2 Modellierungsframework MESSAGEix

Das Modellierungsframework *MESSAGEix* des International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) ermöglicht die Modellierung eines langfristigen Zeithorizonts für die Untersuchung der möglichen sektoralen Entwicklungspfade bis zum Jahr 2050 sowie eine detaillierte Bottom-Up-Abbildung des Sektors GHD. Weitere wesentliche Merkmale, die die Auswahl untermauern, sind die integrierte Funktionalität der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung, die Möglichkeit der Begrenzung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Python-Schnittstelle zur Integration von *MESSAGEix* in die entwickelte Modellarchitektur. Das Framework ist auf GitHub [72] unter der Apache-Lizenz Version 2.0 veröffentlicht.

### 4.2.1 Ursprung

*MESSAGE* steht als Akronym für Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact und wurde in den letzten vier Jahrzehnten von der IIASA entwickelt. Dabei handelt es sich um ein prozessbasiertes integriertes Bewertungsmodell, auch Integrated Assessment Model (IAM) genannt. Die Bewertung erfolgt mittels einer detaillierten Abbildung der technischen, sozioökonomischen und biophysikalischen Prozesse des Energie- und Landnutzungssystems. Das lineare/gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodell *MESSAGE* ist darauf ausgerichtet, den exogenen vorgegebenen Bedarf mit minimalen Kosten zu decken. Makroökonomische Effekte, wie die der Rückkopplung zwischen dem Endverbrauchspreis und der Nachfrage, können mit der Kopplung des optionalen Modells *MACRO* [73] untersucht werden. [24]

Das etablierte Modell *MESSAGE* wurde in der Vergangenheit häufig verwendet, um relevante Fragen zur wissenschaftlichen Politikberatung bezüglich des Wandels von Energiesystemen sowie Umweltfragen zu erörtern.

Das Modell wurde in den letzten zehn Jahren in verschiedenen internationalen Projekten eingesetzt, z. B. zur Erstellung des globalen Energieberichts (GEA) [74], der eine integrierte Analyse der Herausforderungen und Chancen der Transformation von Energiesystemen für unterschiedlich entwickelte Länder der Welt aufzeigt. Ferner wurden die globalen Szenarien des repräsentativen Konzentrationspfads RCP 8.5 [75] sowie des sozioökonomischen Pfads SSP-2 [76] berechnet. [24]

Im Jahr 2018 wurde das Modellierungsframework *MESSAGEix* veröffentlicht. Hierbei handelt es sich um eine Neuimplementierung und Erweiterung von *MESSAGE* [77] auf Basis neuer Softwarestandards. Dieser Schritt des Aufbaus einer neuen Infrastruktur zur Modellierung war notwendig, um die Transparenz, Reproduzierbarkeit und Verständlichkeit des Modells sowie dessen Ergebnisse zu verbessern. Im Zuge dieser Neuveröffentlichungen wurden moderne wissenschaftliche Arbeitsabläufe sowie transparente Prozesse der Verarbeitung und Speicherung von Daten in das Framework integriert. Die mathematischen Gleichungen für das dynamische Optimierungsmodell werden in der algebraischen Modellierungssprache General Algebraic Modeling System (GAMS) [78] definiert, die die Möglichkeit bietet, diese einfach zu erweitern. [24]

#### 4.2.2 Modellierungsplattform

Das Modellierungsframework *MESSAGEix*, inklusive der in GAMS verfassten mathematischen Gleichungen, ist vollständig in die ix-Modellierungsplattform (*ixmp*) [79] der IIASA integriert. Die Plattform stellt ein Data-Warehouse dar, das auf eine leistungsstarke Szenarioanalyse basierend auf einer effektiven Datenverarbeitung ausgelegt ist. Diese umfasst die strukturierte und versionierte Ablage der benötigten Szenariodaten in einem Datenbank-Backend. Neue Szenarien können mittels eines transparenten und reproduzierbaren wissenschaftlichen Arbeitsablaufs mithilfe der Python- oder R-Schnittstelle hinzugefügt und ausgewertet werden. [24]

#### 4.2.3 Methodik

In diesem Abschnitt werden der grundlegende mathematische Ansatz sowie die Netzwerkdarstellung zur Modellierung eines Energiesystems eingeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und Zusammenspiels der notwendigen Softwarepakete von *MESSAGEix* sowie der ix-Modellierungsplattform ist in [24] zu finden.

#### Mathematische Grundlage

Die Modellierung des Sektors GHD erfolgt auf Basis des linearen Optimierungsmodells *MESSAGEix*. Dies bedeutet, dass die Zielfunktion, die Minimierung der Gesamtkosten sowie alle Restriktionen wie z. B. Deckung des Bedarfs oder Ausbaugeschwindigkeiten nur aus Linearkombinationen der Entscheidungsvariablen bestehen dürfen. [80]

Lineare Modelle stellen aufgrund der effektiven und zuverlässigen Algorithmen zur Lösung der zugrunde liegenden linearen Optimierungsprobleme, auch lineare Programmierung (LP) genannt, ein bedeutendes und weit verbreitetes Werkzeug in vielen Bereichen der Wissenschaft und Wirtschaft dar. Die eingesetzten Algorithmen (z. B. der Simplex-Algorithmus) zur Lösung

der Probleme sind zudem sehr schnell in der Berechnung des globalen Optimums. Sie können große Probleme mit hunderten von Variablen und tausenden von Restriktionen auf einem Desktop-Computer in wenigen Sekunden lösen. Das lineare Optimierungsproblem kann in allgemeiner Form anhand der Matrizen-Notation dargestellt werden:

$$\begin{aligned} \min_x \quad & c^T x \\ \text{u. d. N.} \quad & Ax \leq b \\ & \text{und } l \leq x \leq u. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Der Lösungsraum des Vektors  $x$ , der optimiert wird, kann hierbei nach unten  $l$  oder nach oben  $u$  begrenzt sein. Die Vektoren  $c$ ,  $l$ ,  $u$  und  $b$  sowie die Matrix  $A$  sind Parameter des Optimierungsproblems, die die Zielfunktion und die Nebenbedingungen festlegen. [80, 81]

### Darstellung des Energiesystems

Das Referenzenergiesystem (engl. Reference Energy System) (RES) ist eine Netzwerkdarstellung von allen technischen Prozessen, die zur Versorgung des Endverbrauchers mit verschiedenen Energieformen erforderlich sind [82]. In Abbildung 4.2 ist ein einfaches Netzwerkdiagramm dargestellt. Die Energieversorgung zur Bereitstellung der Nutzenergie Beleuchtung baut auf einem abstrahierten Modell des Energieflusses auf. Die Energieträger (vertikal) werden mithilfe von Prozessen (Kanten) auf ein anderes Energielevel gewandelt. Dieser Vorgang beschreibt den Energiefluss der Ressourcen (Quelle) hin zur Nachfrage (Senke) [83]. Die Modellierung von komplexen Energiesystemen auf Basis des RES-Konzepts erlaubt es, Systeme spezifisch und in ihrem vollen Umfang eindeutig zu beschreiben. Es können sowohl nationale als auch regionale Energiesysteme mit dieser Netzwerkdarstellung abgebildet werden [84].

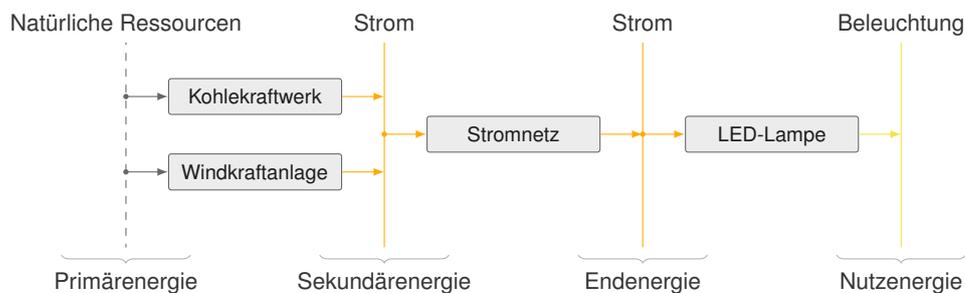


Abbildung 4.2: Abbildung eines beispielhaften Energiesystems für die Deckung des Bedarfs an Beleuchtung mittels eines Referenzenergiesystems. Eigene Darstellung in Anlehnung an [85].

## 4.3 Modellarchitektur Sektor GHD

Im folgenden Abschnitt werden das entwickelte Konzept und die daraus abgeleitete Softwarearchitektur der Modellierung des GHD-Sektors mit *MESSAGEix* vorgestellt. Darauf aufbauend werden der Testprozess zur funktionalen Prüfung der entwickelten Module sowie die inhaltliche Überprüfung des Referenzszenarios dargestellt.

### 4.3.1 Grundlegendes Konzept

Auf Basis einer fundierten Literaturrecherche der relevanten sektoralen Daten wurde eine Methodik erarbeitet, um den heterogenen Sektor GHD abstrahiert in einem Modell abzubilden. Die dafür betrachteten Daten umfassen historische Entwicklungen zu Nutz- und Endenergiebedarf, Technologiebestand und CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie mögliche zukünftige Entwicklungen. Die schematische Darstellung des entwickelten modularen Konzepts zur Modellierung der Entwicklung der zukünftigen Energiebereitstellung im Sektor GHD ist in Abbildung 4.3 ersichtlich. Die wesentlichen Bestandteile des Konzepts sind die fünf grau gefärbten Felder Bestandserhebung, Nutzenergieprojektion, *MESSAGEix-GHD*, Szenarioanalyse sowie Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse. Die notwendigen Eingangsdaten aus der Vergangenheit sowie die zukünftigen Szenarioparameter sind anhand der weißen Felder abgebildet.

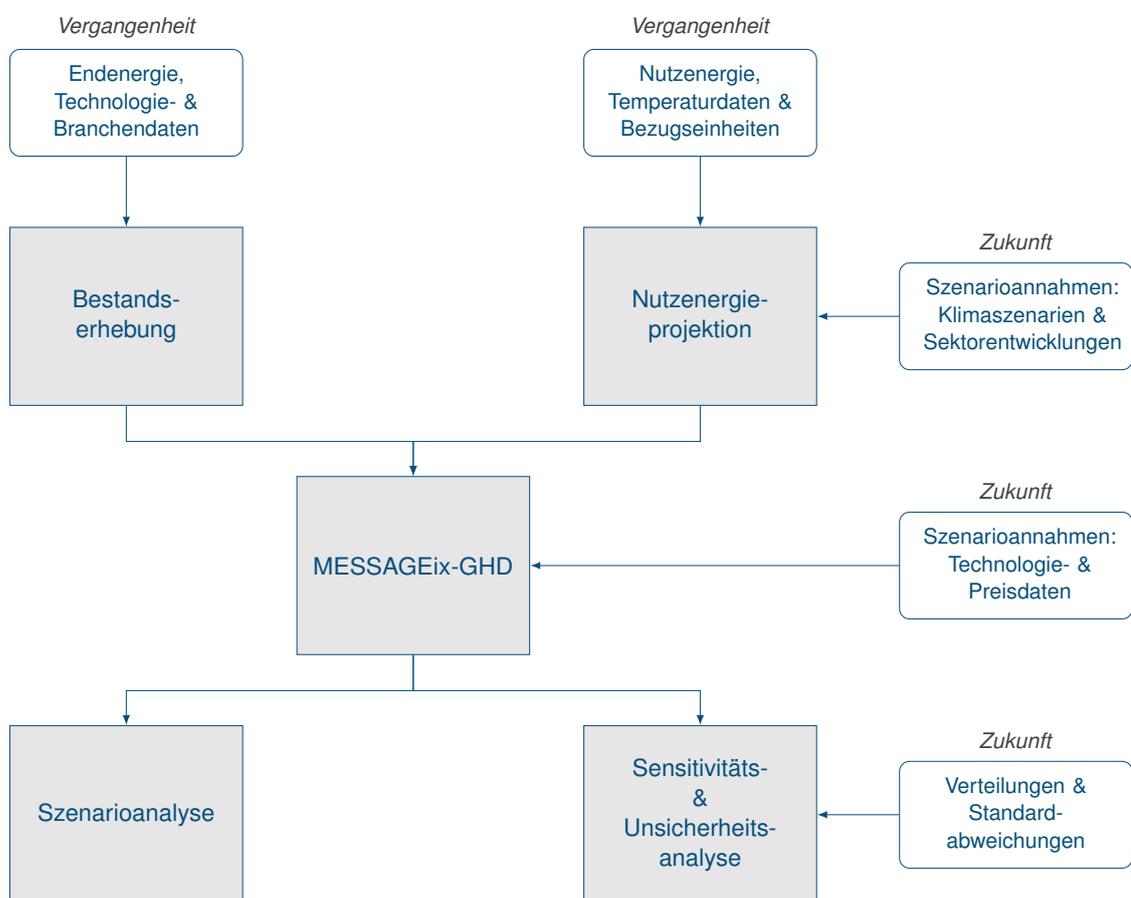


Abbildung 4.3: Schematische Modellarchitektur des entwickelten Konzepts zur Modellierung des Sektors GHD.

Den zentralen Baustein des Konzepts zur Modellierung des GHD-Sektors bildet das lineare Energiesystemmodell *MESSAGEix-GHD*. Dieses Optimierungsmodell wird auf Basis von *MESSAGEix* für 13 Branchen des Sektors GHD entwickelt, wobei sich die Entwicklung auf die Parametrisierung des Modells und die Konzeption des Workflows bezieht. Das Modell berechnet den kostenoptimalen Ausbau und Einsatz der verfügbaren Technologien zur Deckung

des Bedarfs. Die essenziellen Eingangsdaten für das Modell bilden einerseits der historische Technologiebestand, der anhand der Bestandserhebung ermittelt wird (vgl. Unterkapitel 2.3), und andererseits der zukünftige Nutzenergiebedarf, der der Nutzenergieprojektion entstammt. Dieser Bedarf wird unter der Berücksichtigung von ausgewählten Parametern wie z. B. Temperaturen aus Klimaszenarien und Branchentrends in die Zukunft fortgeschrieben (vgl. Kapitel 3).

Das Sektormodell *MESSAGEix-GHD* wird mittels der entwickelten Datenbasis für das Startjahr 2015 kalibriert. Mithilfe des kalibrierten Bottom-Up-Energiemodells können verschiedene Entwicklungspfade des Sektors szenariobasiert im Zeitraum zwischen den Jahren 2015 und 2050 abgebildet werden. Die resultierenden Szenarioergebnisse werden anhand einer Szenarioanalyse aufbereitet und ausgewertet (vgl. Kapitel 5). Die Analyse der Ergebnisdaten wird durch unterschiedliche grafische Visualisierungen der Szenarien unterstützt. Abschließend wird mittels einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss von Eingangsparametern auf die Modellergebnisse untersucht. Eine Unsicherheitsanalyse auf Basis der stochastischen Parameter zeigt ferner den möglichen Erwartungsbereich der Modellergebnisse von *MESSAGEix-GHD* im Betrachtungszeitraum zwischen 2015 und 2050 auf (vgl. Kapitel 6).

### 4.3.2 Softwarearchitektur

Die Softwarearchitektur ist darauf ausgelegt, Fragestellungen bezüglich des Sektors GHD zu beantworten. Für einen transparenten und reproduzierbaren Workflow ist diese Architektur modular in der Programmiersprache Python [86] umgesetzt.

Das entwickelte Konzept baut auf dem Modellierungsframework *MESSAGEix*, im Speziellen auf der integrierten Modellierungsplattform *ixmp* und dem Python-Paket *d2ix*, auf. Die Bottom-Up-Modellierung des Energiesystems für einen langen Betrachtungszeitraum hängt von einer Vielzahl von technologischen, ökonomischen und ökologischen Parametern ab. Selbst kleine Modelle mit wenigen Regionen, Technologien und Modelljahren benötigen Eingabedatensätze, die mehrere hunderttausend Datenpunkte umfassen können. Die Handhabung von solchen umfangreichen Datensätzen kann schnell unübersichtlich werden und zu Fehlern führen. Der Umstand des enormen Datenumfangs erschwert zusätzlich die Fehlererkennung, die wissenschaftliche Zusammenarbeit sowie die Interpretation von Modellergebnissen. Diese Rahmenbedingungen waren die Motivation der Entwicklung des neuen Python-Softwarepakets *d2ix* [87].

*d2ix* verfolgt das Ziel, die notwendigen Daten der Modellierung eines Energiesystems mit *MESSAGEix* in einem abstrahierten Datenmodell abzubilden und der Modellplattform *ixmp* zu übergeben. Die reduzierten Eingangsdaten können in überschaubarer und verständlicher Form mittels Tabellen eines Tabellenkalkulationsprogramms eingegeben werden. Die Nachvollziehbarkeit von Änderungen der Dateneingabe wird anhand der integrierten Konvertierung des Datenmodells in Textdateien des Dateiformats YAML sichergestellt. Diese Dateien können mithilfe einer Versionsverwaltungssoftware (z. B. Git) protokolliert und auf Veränderungen überprüft werden. Eine detaillierte Beschreibung der entwickelten Open-Source-Toolbox kann der Veröffentlichung [87] entnommen werden. Der dazugehörige Quellcode von *d2ix* ist auf GitHub [88] unter der Apache-Lizenz Version 2.0 veröffentlicht.

Die energetische Modellierung des GHD-Sektors erfolgt mithilfe des umfangreichen Ökosystems für wissenschaftliches Rechnen von Python. Die Aufbereitung und die Verarbeitung der Eingangs- und Ausgangsdaten werden mithilfe von Pandas [89], NumPy [90] und xarray [91] durchgeführt. Die grafische Darstellung dieser Daten geschieht mit den Paketen Matplotlib [92] und Seaborn [22]. Für die Durchführung der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse wird auf die Python-Pakete SALib [93] und Chaospy [94] zurückgegriffen.

Die grafische Darstellung der Softwarearchitektur in Form eines Flussdiagramms erfolgt in Abbildung 4.4. Die wesentlichen drei Bestandteile des Diagramms sind das Referenzszenario, der Szenario-Generator und das Postprocessing. Nachfolgend werden diese Bestandteile sowie deren Funktionalität genauer erläutert.

### Referenzszenario

Das Referenzszenario (im linken oberen Bereich der Abbildung 4.4) wird mithilfe der Nutzenergieprojektion und der Funktionalität des entwickelten Python-Pakets *d2ix* erstellt. Im ersten Schritt wird der zukünftige Nutzenergiebedarf für die definierten Branchen und Anwendungsbereiche für den Betrachtungszeitraum berechnet. Die zugrunde liegende Methodik der Berechnung ist in Kapitel 3 beschrieben. Die Dateneingabe für die Modellierung des zukünftigen Sektors erfolgt anhand einer Excel-Tabelle. Die strukturellen Entwicklungen werden als prozentuale Veränderungen für den spezifischen Nutzungsbedarf und die Bezugseinheiten pro Jahr eingetragen.

Die zentralen Eingangsdaten des GHD-Sektors wie z. B. die Brancheneinteilung und die Definition der Technologien sowie der berechnete Nutzenergiebedarf werden in die Excel-Dateien von *d2ix* eingetragen. Im Anschluss daran erzeugt *d2ix* aus den bereitgestellten Daten des Referenzszenarios ein Datenmodell. Dieses abstrahierte Modell entspricht den Anforderungen einer Szenarioabbildung in *MESSAGEix*. Die vereinfachte allgemeine Szenarioerstellung mittels *d2ix* erzeugt für alle Branchen Technologien mit identischen Eigenschaften. Diese Gegebenheit macht den Schritt der Adaption der Szenario-Daten notwendig. Hierbei werden Eigenschaften und Beschränkungen für Technologien branchenspezifisch angepasst.

Das mit *d2ix* erzeugte und für die einzelnen Branchen adaptierte Szenario wird im Schritt „Lösung LP-Modell“ mittels der Modellplattform *ixmp* an den Solver CPLEX [95] übergeben, um das lineare Optimierungsproblem zu lösen. Die Lösung sowie die Eingangsdaten der Szenarien werden in der HSQL-Datenbank abgespeichert, wo sie für das Postprocessing zur Verfügung stehen.

### Szenario-Generator

Der Szenario-Generator (im rechten oberen Bereich der Abbildung 4.4) dient zur Erstellung von Szenarien auf Basis des Referenzszenarios für die Szenario-, Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse. Ein Szenario beschreibt hierbei die konkrete Parametrisierung des Modells *MESSAGEix-GHD* zur Modellierung des zukünftigen Sektors GHD. Wird für eine spezifische Analyse eine Vielzahl von Entwicklungspfaden (Szenarien) für die Beantwortung der Fragestellung benötigt, so kann die Szenarioberechnung mittels der integrierten Parallelisierung der Erstellung und Lösung der Szenarien beschleunigt werden.

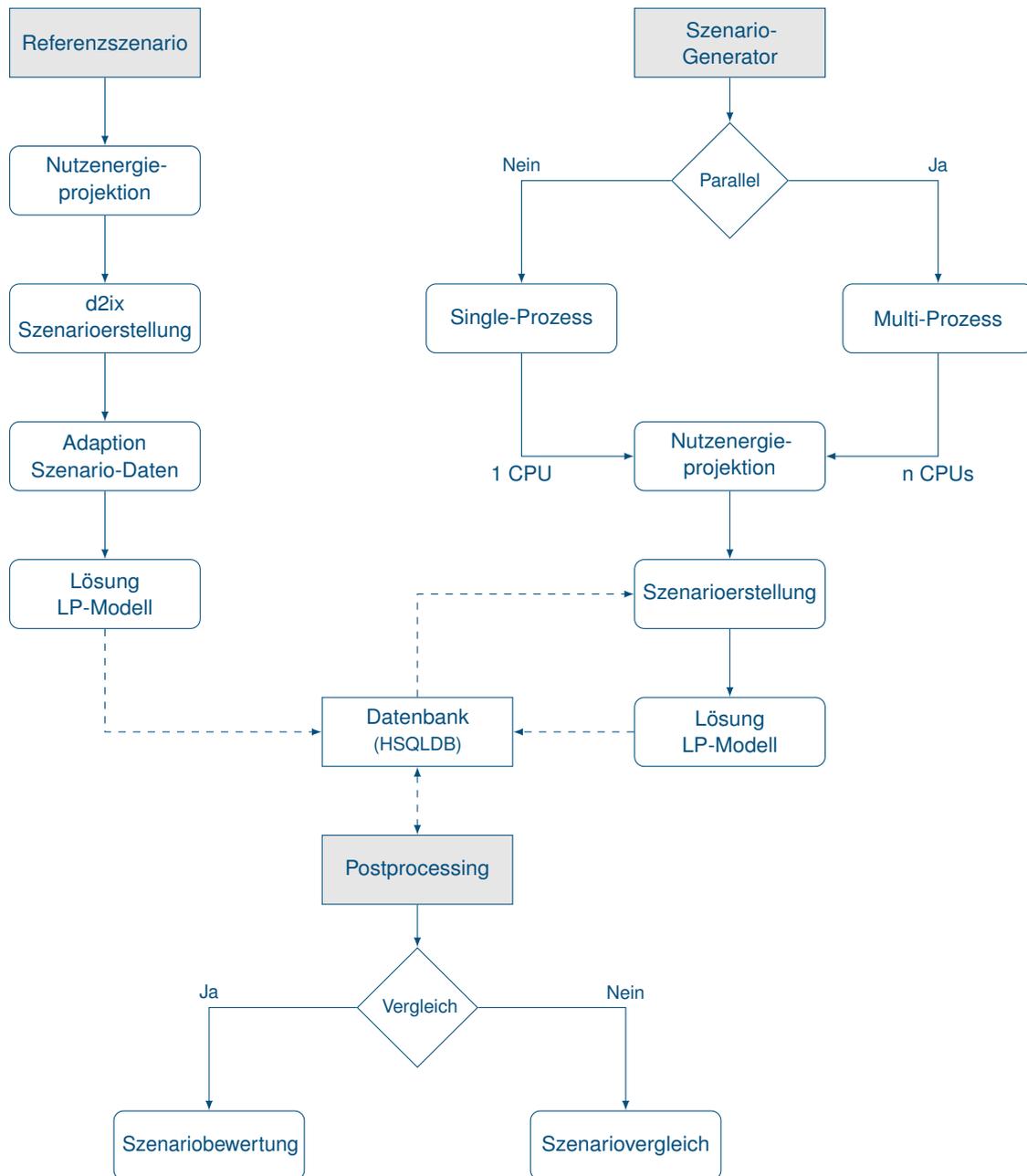


Abbildung 4.4: Schematische Softwarearchitektur des entwickelten Softwarekonzepts zur Modellierung des Sektors GHD.

Die Parallelisierung erfolgt durch die Verteilung der Arbeit (Erzeugung und Lösung) auf unterschiedliche Prozesse. Die Anzahl der CPU-Prozesse, die für die Bearbeitung zur Verfügung stehen, muss im Vorfeld definiert werden. Die im Szenario-Generator erzeugten Szenarien werden an eine Warteschlange (engl. Queue) übergeben, auf die die CPU-Prozesse zugreifen können. Die parallele Abarbeitung der Warteschlange erfolgt nach dem First-in-first-out-Prinzip. Hat ein CPU-Prozess die Nutzenergieprojektion, Szenarioerstellung und Szenariolösung durchgeführt, so wird das nächste Szenario aus der Warteschlange bearbeitet. Dieser Ablauf wiederholt sich, bis die Warteschlange leer ist und somit alle Szenarien abgearbeitet wurden. Alternativ kann die Berechnung eines spezifischen Szenarios auch von einem Prozess (Single-Prozess) sequenziell durchgeführt werden.

Der weitere Ablauf der Lösungsfindung unterscheidet sich nicht zwischen einzelnen oder parallelisierten Berechnungen. Im ersten Schritt erfolgt die Nutzenergieprojektion, die analog der Berechnung des Referenzszenarios aufgebaut ist. Darauf aufbauend wird das Szenario im benötigten Format von *MESSAGEix* erstellt. Für die Erstellung des Szenarios wird die Funktionalität des Klonens der Modellierungsplattform *ixmp* genutzt. Das Klonen eines Szenarios beschleunigt den Prozess der Szenarioerstellung im Vergleich zur Erstellung des Referenzszenarios signifikant. Hierbei werden die Eingangsdaten des bereits erstellten Referenzszenarios aus der Datenbank ausgelesen und für die weitere Verarbeitung verwendet. Die im Szenario-Generator definierten Eigenschaften des neuen Szenarios, die vom Referenzszenario abweichen, werden in der „Szenarioerstellung“ angepasst. Das in diesem Schritt definierte lineare Optimierungsproblem wird analog dem Referenzszenario vom Solver gelöst, bevor die Ergebnisse der Datenbank übergeben werden.

### **Postprocessing**

Die für die Auswertung und Überprüfung der Szenarien relevanten Informationen werden im Schritt Postprocessing erzeugt (im mittleren unteren Bereich der Abbildung 4.4). Es werden zum einen die zugrunde liegenden Daten der Ergebnisse in Form von Excel-Tabellen und zum anderen grafische Auswertungen in Form von Diagrammen bereitgestellt.

Die Ergebnisse aller Szenarien sind in der zentralen Datenbank abgelegt. Diese werden für die unterschiedlichen Analysen aus der Datenbank abgerufen und aufbereitet. Im Wesentlichen unterscheidet sich das Postprocessing durch eine Einzelszenarioanalyse und durch den Vergleich einer Mehrzahl von Szenarien. In der Einzelszenarioanalyse werden die Daten sowie Diagramme für ein spezifisches Szenario des GHD-Sektors als Gesamtes sowie für Branchen und Branchengruppierungen verschiedener Ausgangsgrößen, wie z. B. installierte Leistung oder Endenergieeinsatz, aufbereitet. Im Szenariovergleich liegt der Fokus auf der Darstellung des Vergleichs der ausgewählten Szenarien und der Auswertung der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse.

### **4.3.3 Testprozess**

In der Veröffentlichung [6] werden vier Herausforderungen der Energiesystemmodellierung für den Einsatz von Energiemodellen zur Untersuchung der energetischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts beschrieben.

Sie umfassen die zeitliche und geografische Auflösung, den Kompromiss zwischen Unsicherheit und Transparenz, die Betrachtung der zunehmenden Komplexität des Energiesystems, die Integration von menschlichem Verhalten sowie soziale Risiken und Chancen. Im Fazit dieser Veröffentlichung werden einige Vorschläge genannt, um die Relevanz des Werkzeugs der Energiemodellierung sicherzustellen. Eine Empfehlung beschreibt die Verwendung von Methoden der Softwareentwicklung, wie z. B. automatisch integrierte Tests zur Identifikation und Reduzierung von Fehlern in den verwendeten Softwaremodellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein automatischer Testprozess für die Überprüfung des Quellcodes und des Referenzszenarios entwickelt. Der schematische Zusammenhang dieses Prozesses ist in Abbildung 4.5 ersichtlich. Die Grundlage des Testprozesses bildet die Versionsverwaltungssoftware Git [96]. Mit dieser Software können Veränderungen am Quellcode sowie an den Eingangsdaten des GHD-Modells *MESSAGEix-GHD* in Form eines Git-Repositories verwaltet und nachvollzogen werden. Im Zentrum des Prozesses stehen die kontinuierliche Integration (engl. Continuous Integration) der möglichen Fehler von *MESSAGEix-GHD* sowie die Überprüfung des grundlegenden Referenzszenarios.

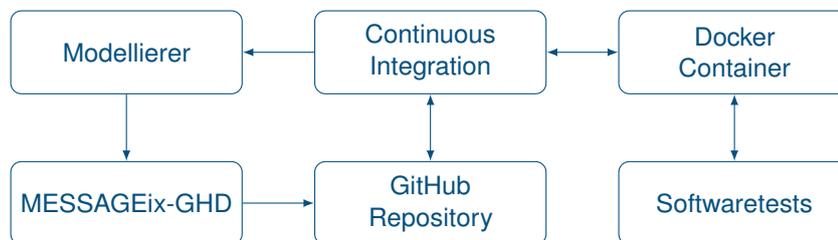


Abbildung 4.5: Testprozess zur kontinuierlichen und automatischen Überprüfung des Modells *MESSAGEix-GHD*.

Änderungen des Quellcodes oder der Eingangsdaten von *MESSAGEix-GHD*, die vom Modellierer durchgeführt werden, werden anhand des Git-Befehls Push an die kollaborative Online-Versionsverwaltung GitHub [97] übertragen. Nachdem die Daten vollständig an den GitHub-Server übermittelt worden sind, startet automatisch der kontinuierliche Integrationsprozess mithilfe von Travis CI [98].

Im ersten Schritt wird mithilfe der Containervirtualisierungssoftware Docker [99] ein Container erstellt, der alle notwendigen Softwareprogramme und Konfigurationen für die Lösung des linearen Optimierungsmodells beinhaltet. In dieser definierten Umgebung werden anschließend verschiedene Softwaretests ausgeführt. Die Ergebnisse der Testdurchläufe werden mittels Travis CI an GitHub übertragen, wo sie dem Modellierer zur Verfügung stehen. Die Auswertung der Testergebnisse gibt dem Entwickler Aufschluss über die Qualität bzw. mögliche Fehler im Modell. Dieser Prozess zur Überprüfung des entwickelten Frameworks wird bei jeder Änderung am Modell oder an den Eingangsdaten automatisch durchgeführt.

### Test – Quellcode

Die Qualität des entwickelten Quellcodes wird fortlaufend mit den Python-Paketen Flake8 [100] und Mypy [101] zur Steigerung der Nachhaltigkeit des Codes sowie zur Reduktion möglicher Fehler überprüft.

Flake8 überprüft den Quellcode bezüglich der Richtlinien des Python-Styleguides. Des Weiteren stellt das Paket sicher, dass alle importierten Module auch verwendet werden und dass die Komplexität des entwickelten Codes die McCabe-Metrik von zehn nicht übersteigt. Die Überprüfung der Typisierung der Variablen wird mit dem Paket Mypy durchgeführt. Die Definition der Typen der Python-Funktionen dient auch der Unterstützung zur Dokumentation des Quellcodes.

### **Test – Referenzszenario**

Das Referenzszenario des GHD-Modells *MESSAGEix-GHD* umfasst ca. 700 Technologien zur Deckung der sieben modellierten Nutzenergiebedarfe der 13 Branchen. Diese Technologien sind für den Betrachtungshorizont von 1990 bis 2050 definiert und in der Datenbank hinterlegt. Für eine detaillierte Modellierung des Sektors werden diese Technologien unterschiedlich parametrisiert. Sie können unterschiedliche Beschränkungen in der Verfügbarkeit und im Wachstum sowie z. B. den Preisen aufweisen.

Eine manuelle Überprüfung der Nutzbarkeit der rund 700 Technologien im Modell ist sehr zeitintensiv und kann daher nicht bei jeder Änderung der Parametrisierung wiederholt werden. Daher wurde im Modell *MESSAGEix-GHD* eine automatische Überprüfung der Einsetzbarkeit der Technologien mittels des Python-Paketes Pytest [102] implementiert.

Dieser Test überprüft die Verfügbarkeit jeder Technologie in jedem Stützjahr. Die Überprüfung erfolgt anhand des Outputs einer Technologie. Für den Test werden die variablen Kosten der Technologie auf einen sehr geringen Wert gesetzt und für alle anderen Technologien wird ein sehr hoher Wert gewählt. Somit ist es für das Modell immer wirtschaftlicher, die zu prüfende Technologie einzusetzen. Ist die Technologie im Modell nutzbar, so ist der Wert des Outputs größer null. Würde das Modell die Technologie nicht nutzen und stattdessen eine teurere Technologie verwenden, so würde ein Fehler in der Parametrisierung dieser Technologie vorliegen. Technologien, die nicht für alle Branchen verfügbar sind, werden vorab gekennzeichnet. Der Test fällt für diese Technologien positiv aus, wenn diese im Modell nicht eingesetzt werden können.

Für das kalibrierte Modell wird der Wert der Zielfunktion (die Gesamtkosten) entnommen, der für den Test der Gesamtkosten des Modells hinterlegt wird. Mit diesem Test wird sichergestellt, dass Änderungen am Quellcode in Form von Restrukturierungen keine Auswirkungen auf das Modellergebnis haben und die Kosten im Modell gleichbleiben müssen. Weitere Tests überprüfen die Singularität der Einheiten für jeden Parameter und jede Technologie.

### **Manueller Test**

In einem weiteren Test wird der Anteil der Deckung des Nutzenergiebedarfs für jede Technologie in Schritten von 25 %, 50 %, 75 % und 99 % überprüft. Anhand dieses Tests kann eine Überparametrisierung des Modells identifiziert werden, um das Potenzial einer Technologie im Sektor je Branche zu bewerten. Der Test wird aufgrund des hohen Rechenaufwands in Prozentschritten durchgeführt. Aufgrund des Rechenaufwands ist dieser Test nicht in den automatischen Testprozess integriert und muss manuell angestoßen werden.

## 4.4 Struktur und Aufbau des Modells MESSAGEix-GHD

Nachfolgend werden die grundlegende Struktur und der Aufbau der Modellierung des Sektors GHD beschrieben. Es wird der strukturelle Zusammenhang der Eingangs- und Ausgangsdaten mit dem linearen Optimierungsmodell *MESSAGEix-GHD* aufgezeigt. Darauf aufbauend werden der grundsätzliche Aufbau des Sektormodells sowie das Energierferenzsystem für die Modellierung der Energieflüsse zur Bereitstellung der Nutzenergie beschrieben.

### 4.4.1 Modellstruktur

Die Struktur des linearen Optimierungsmodells *MESSAGEix-GHD* ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Es veranschaulicht den grundlegenden Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsdaten des Modells. Das für den Sektor GHD entwickelte Modell berechnet für jede der 13 Branchen auf Grundlage der Eingangsdaten die minimalen Kosten zur Bereitstellung der Nutzenergiebedarfe über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050. Als wesentliche Nebenbedingungen des linearen Modells sind die Versorgungssicherheit, die Deckung des Bedarfs in jedem Zeitschritt, die technologischen Kapazitäts- und Aktivitätsgrenzen sowie die sektoralen Beschränkungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu nennen.

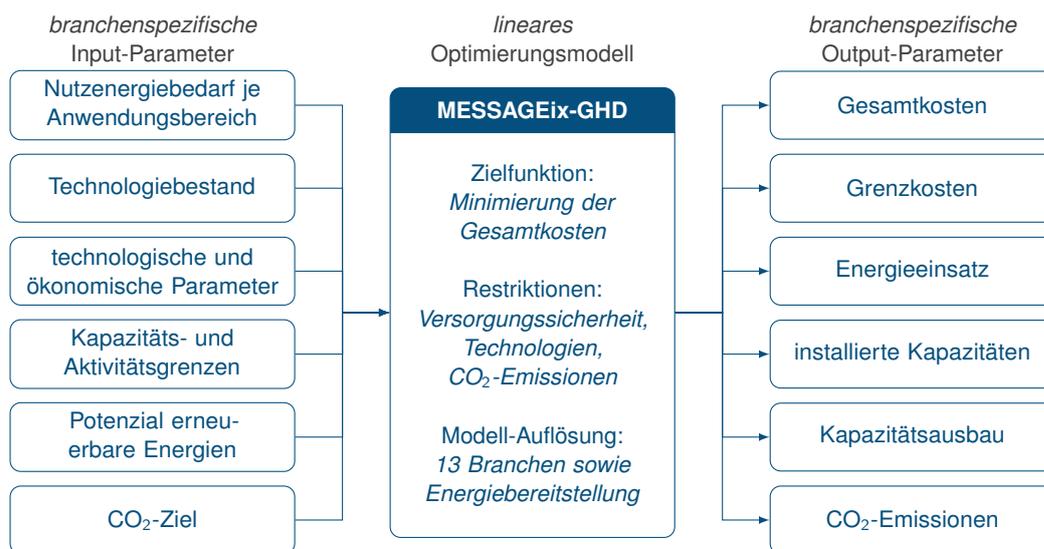


Abbildung 4.6: Grundlegende Struktur des Optimierungsmodells *MESSAGEix-GHD*. Die wichtigsten Inputs für *MESSAGEix-GHD* sind branchenspezifische und technologiespezifische Daten. Das Modell optimiert die Energieversorgungskosten unter der Bedingung, dass die Nachfrage zu jedem Zeitpunkt gedeckt sein muss. Die wichtigsten Ergebnisse des Modells sind die Gesamtkosten, Energieeinsatz und Kapazitäten der Technologien sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die zentralen Eingangsdaten des Modells umfassen die Nutzenergiebedarfe, Technologiebeschreibungen, sektoralen Potenziale der erneuerbaren Energien und die zukünftigen CO<sub>2</sub>-Ziele. Für eine detaillierte Modellierung des GHD-Sektors werden diese Daten spezifisch für jede der 13 Branchen (vgl. Tabelle 2.1) angepasst. Die Technologiebeschreibungen beinhalten technologische und ökonomische Parameter, Beschränkungen und den historischen Technologiebestand.

Das Modell berechnet die kostenoptimale Technologiezusammensetzung auf Grundlage der Wirtschaftlichkeit und unabhängig von der verbleibenden Lebensdauer der verfügbaren Technologien. Daraus folgt, dass das Modell in jedem Zeitschritt die Technologiezusammensetzung unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen anpassen kann. Dies kann dazu führen, dass Technologien frühzeitig modernisiert oder durch andere Technologien ausgetauscht werden. In Szenarien mit CO<sub>2</sub>-Zielen kann ein frühzeitiger Wechsel hin zu klimaneutraleren Technologien notwendig sein, um die gewählten Ziele für das Stützjahr zu erreichen. Werden sehr anspruchsvolle CO<sub>2</sub>-Ziele (z. B. vollständige Dekarbonisierung des Sektors binnen zehn Jahren) mittels Szenarien abgebildet, kann das Optimierungsproblem unter Umständen aufgrund der technologischen Beschränkungen und der nicht ausreichenden erneuerbaren Potenziale nicht lösbar sein. Die Unlösbarkeit der Szenarien stellt auch eine gültige Lösung dar, indem sie darauf hinweist, dass der definierte Transformationspfad des Sektors nicht umsetzbar ist. Diese Szenarien müssen mithilfe der Slackvariablen von *MESSAGEix* explorativ ausgewertet werden, da in diesem Fall keine Lösungsergebnisse als Output zur Verfügung stehen. Die Slackvariablen sind ein Hilfsmittel für die Modellierung und stellen Technologien mit negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen dar. Dies ermöglicht es, den Zeitschritt zu identifizieren, in dem das CO<sub>2</sub>-Ziel mit den verfügbaren Technologien nicht mehr erfüllt werden kann. Die wesentlichen Ergebnisse eines lösbaren Szenarios umfassen die Kosten, installierten Kapazitäten und Aktivitäten der Technologien sowie die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, die notwendig sind, um die Bedarfe der jeweiligen Branchen des GHD-Sektors im Modellierungszeitraum zu decken.

#### 4.4.2 Modellaufbau

Die Einteilung des heterogenen GHD-Sektors erfolgt im Gegensatz zu üblichen Energiesystemmodellen für die Modellierung nicht geografisch, sondern nach Branchen in Form eines gerichteten Graphen (vgl. Abbildung 4.7). Für eine detaillierte Modellierung der energetischen Charakteristika des Sektors wird das Modell *MESSAGEix-GHD* für 13 Branchen des GHD-Sektors aufgebaut. Die betrachteten Branchen sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. Die Aufgliederung des GHD-Sektors in 13 Branchen wurde anhand der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) und der verfügbaren Datengrundlage gewählt. Eine Beschreibung der Definition des GHD-Sektors sowie die Einteilung der vorliegenden 13 Branchen sind in Unterkapitel 2.1 ausführlich beschrieben.

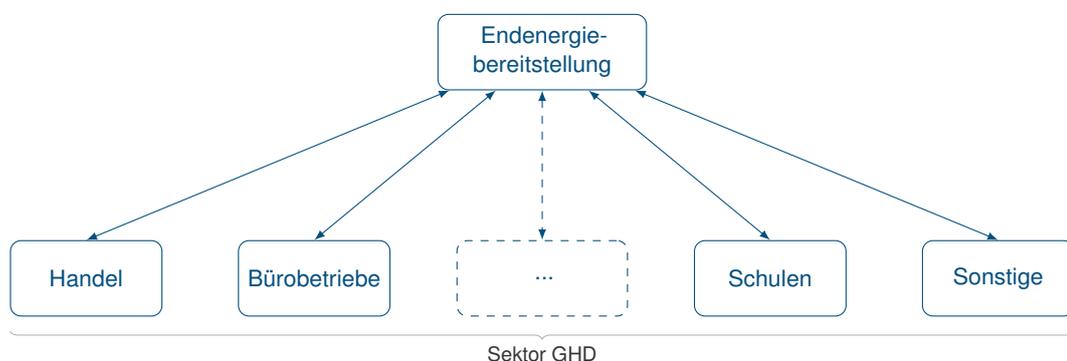


Abbildung 4.7: Zusammenhang der Branchen des GHD-Sektors in Form eines gerichteten Graphen. Die Kanten zwischen den Branchen (Knoten) zeigen die Möglichkeit des Energieaustausches.

Abbildung 4.8 zeigt den entwickelten Modellaufbau für eine Branche als Referenzenergiesystem (vgl. Unterkapitel 4.2.3). Die Darstellung veranschaulicht die möglichen Energieflüsse (Kanten) zur Deckung der Nutzenergiebedarfe einer Branche. Die Umwandlung der Energie von Endenergie und den natürlichen Ressourcen zu Nutzenergie erfolgt mittels Technologien (Knoten). Die Verluste des Umwandlungsprozesses zwischen den jeweiligen Energielevels einer Technologie werden mit dem Wirkungsgrad und dem Verhältnis der nutzbaren zur aufgewendeten Energie modelliert.

Das Optimierungsmodell berechnet aus den verfügbaren Technologien die kostengünstigste Zusammensetzung zur Deckung des Nutzenergiebedarfs für eine Branche. Dabei müssen jedoch nicht alle verfügbaren Technologien genutzt werden. Die Kombination der kostenoptimalen Technologiestruktur kann sich für die unterschiedlichen Branchen aufgrund des spezifischen Nutzenergiebedarfs und der branchenspezifischen Kostenstruktur sowie des historischen Bestands unterscheiden.

## 4.5 Eingangsdaten für MESSAGEix-GHD

Die Eingangsdaten für das Modell *MESSAGEix-GHD* beschreiben die aktuelle Energiebereitstellung zur Deckung der Nutzenergie der sieben Anwendungsbereiche sowie die Eigenschaften und spezifischen Kosten der eingesetzten Technologien. Im Folgenden werden die allgemeinen Annahmen und notwendigen Daten zur Modellierung des zukünftigen GHD-Sektors Deutschlands beschrieben.

### 4.5.1 Allgemeine Annahmen

Das Modell wird mit Daten für die historischen Stützjahre ab 1990 bis 2010 sowie die im Modell betrachteten Stützjahre 2015 bis 2050 parametrisiert. Der Wert von einem Stützjahr entspricht dem mittleren Wert der Periode aus fünf Jahren (vgl. Tabelle 2.5). Das Stützjahr 2015 beinhaltet die Jahre 2011 bis 2015 und ist das erste Jahr, für das das lineare Optimierungsmodell die Energiebereitstellung optimiert. Das Modell *MESSAGEix-GHD* wird anhand des mittleren Endenergiebedarfs des Sektors GHD aus [13] der Jahre von 2011 bis 2014 für die jeweiligen Anwendungsbereiche und Energieträger für das Stützjahr 2015 kalibriert. Die installierte Technologiestruktur der jeweiligen Branchen zur Bereitstellung des Nutzenergiebedarfs, der aus dem Technologiebestand des GHD-Sektors abgeleitet wird, ist für das Stützjahr 2015 anhand der Kapazitäts- und Aktivitätsgrenzen für die einzelnen Technologien fest definiert. Die Abbildung der Szenarien erfolgt ab dem Stützjahr 2020 bis 2050. Die Stützjahre umfassen immer fünf Jahre, wie z. B. 2020, das die Jahre 2016 bis 2020 beinhaltet.

Eine weitere Annahme wird für den Zinssatz getroffen. Der Zinssatz der gewichteten Kapitalkosten (WACC) wird für alle Branchen des Sektors sowie die Modelljahre von 2015 bis 2050 mit 7 % festgelegt.

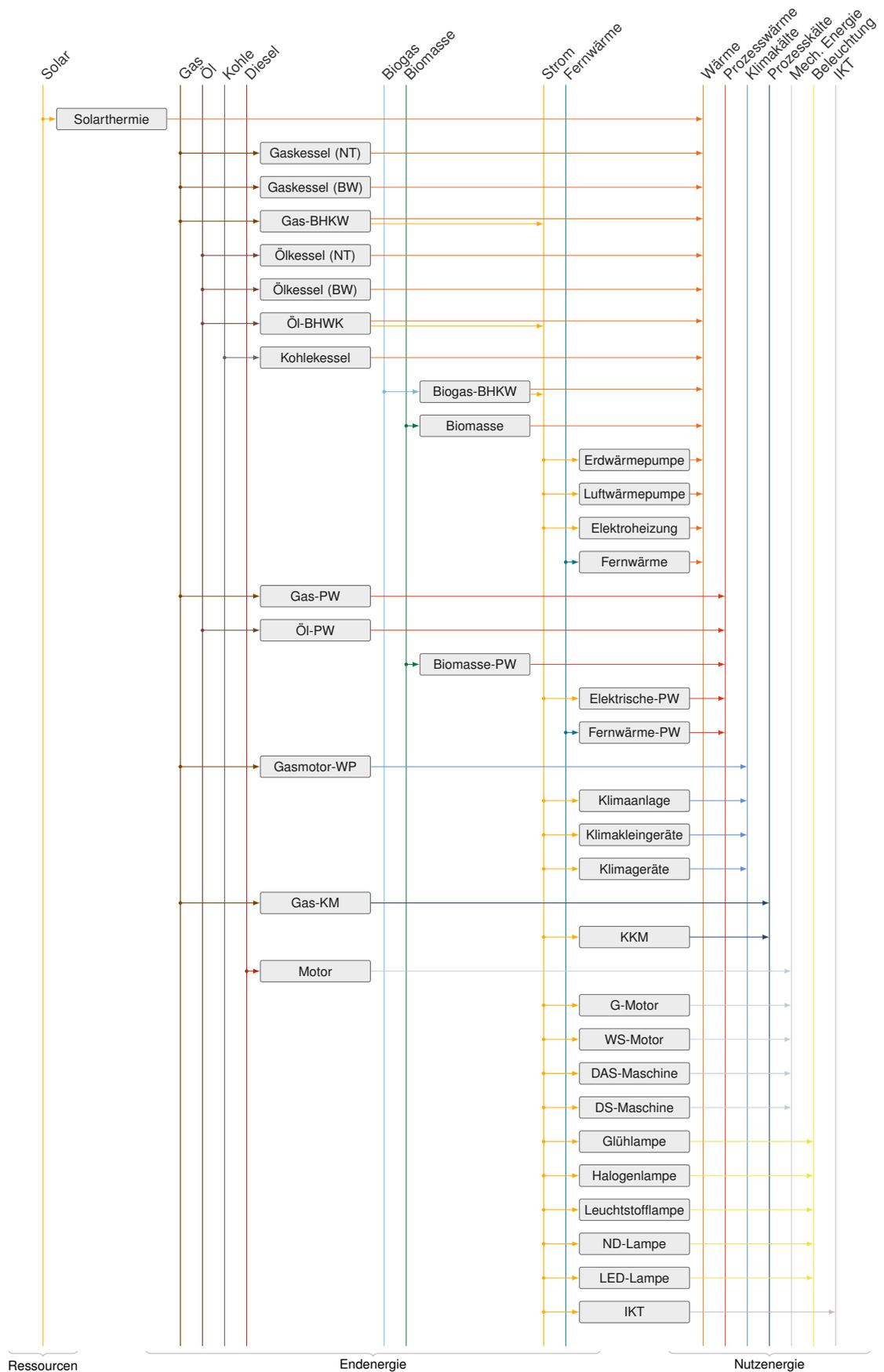


Abbildung 4.8: Auszug des Referenzenergiesystems von MESSAGEix-GHD für eine Branche zur Bereitstellung der Nutzenergiebedarfe.

### 4.5.2 Nutzenergiebedarf

Der exogen vorgegebene Nutzenergiebedarf muss vom Optimierungsmodell in jedem Stützjahr gedeckt werden. Der Nutzenergiebedarf des Referenzszenarios ist für das Temperaturszenario 2014 aggregiert für alle Branchen des Sektors in Tabelle 4.1 dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse der Nutzenergieprojektion sind für alle Branchen und Anwendungsbereiche für den Modellierungszeitraum im Anhang in Tabelle A.1 abgebildet. Die zugrunde liegende Methodik der Projektion des zukünftigen Bedarfs sowie die Datengrundlage sind in Kapitel 3 beschrieben. Die Annahmen der sektoralen Entwicklungen, die den Nutzenergiebedarf beeinflussen, werden für das Referenzszenario in Unterkapitel 5.1 erläutert. Der Nutzenergiebedarf wird für die Szenarioanalyse variiert. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, für den zukünftigen GHD-Sektor den Einfluss von strukturellen Entwicklungen und Klimaveränderungen zu untersuchen.

*Tabelle 4.1: Entwicklung des sektoralen Nutzenergiebedarfs des Sektors GHD des Referenzszenarios in TWh. Der Bedarf je Anwendungsbereich ist in dieser Tabelle für alle Branchen aggregiert.*

Anwendungsbereiche	Stützjahre							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wärme	198,2	170,0	154,3	144,0	137,8	133,6	130,5	128,0
Mechanische Energie	28,4	27	26,3	25,5	24,9	24,3	23,8	23,2
Prozesskälte	22,2	22,4	23,0	23,6	26,2	29,1	32,3	35,9
Prozesswärme	20,0	20,2	20,4	20,5	20,6	20,7	20,8	20,9
IKT	21,2	20,8	20,6	20,3	20,0	19,7	19,4	19,2
Beleuchtung	15,0	14,7	14,5	14,3	14,1	13,9	13,7	13,5
Klimakälte	8,7	8,8	9,0	9,2	10,3	11,5	12,8	14,2
Summe	313,8	283,9	268,2	257,3	253,9	253,0	253,4	254,9

### 4.5.3 Technologische und ökonomische Parameter

Die Energiepreise sowie die technologischen und ökonomischen Parameter der Technologien bilden die grundlegenden Eingangsdaten des Modells *MESSAGEix-GHD* zur Bottom-Up-Modellierung des GHD-Sektors. Die Preise der Endenergieträger sind in Tabelle 4.2 für die einzelnen Stützjahre dargestellt.

Die Beschreibungen der Technologien für die Bereitstellung der Nutzenergie sind im Anhang in Tabelle B.2 aufgezeigt. Diese beinhalten die spezifischen fixen und variablen Kosten der Technologien, wobei die fixen Kosten aufgeteilt sind in Investitionskosten und jährliche fixe Kosten. Die prognostizierte Kostensenkung bezieht sich auf das Jahr 2050 und wird mittels einer exponentiellen Abnahmefunktion im Zeitraum zwischen 2015 und 2050 berechnet. Die technische Lebensdauer einer Technologie dient zum einen der Abbildung der zukünftigen Verfügbarkeit und ist zum anderen ein zentraler Bestandteil der Investitionsrechnung. Die Umwandlungseffizienz einer Technologie von Endenergie hin zur Ebene der Nutzenergie wird mittels des Wirkungsgrads beschrieben. Die technologische Weiterentwicklung der Technologie ist als lineare Veränderung des Wirkungsgrads pro Jahr festgelegt. Eine Ausnahme stellen hier die BHKW-Technologien dar. Diese Technologien haben zwei Outputs und erzeugen gleichzeitig Strom und Wärme. Der erste Wert des Wirkungsgrads in der Tabelle bezieht sich

hierbei auf den elektrischen Wirkungsgrad und der zweite auf den thermischen. Die letzte verbleibende Spalte beinhaltet den Betriebsfaktor. Dieser beschreibt die jährliche Betriebszeit, die sich aus dem Quotienten der Volllaststunden einer Technologie und den Stunden eines Jahres ergibt. Die dargestellten Werte in dieser Tabelle beschreiben den Mittelwert für die Technologien über alle Branchen. Die Definition des Eingangs und des Ausgangs der Technologien ist im Anhang in Tabelle B.1 dargestellt. Parameter ohne Quellenangaben wurden für den Sektor GHD abgeschätzt.

Tabelle 4.2: Entwicklung der Endenergiepreise in €/kWh der im Modell verfügbaren Energieträger im Zeitraum zwischen 2015 und 2050.

Energieträger	Stützjahre								Quelle
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
Biogas	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	[103]
Biomasse	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	[11]
Heizkohle	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	[104]
Diesel	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,20	[60]
Fernwärme	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	[104]
Strom	0,20	0,22	0,23	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	[60]
Gas	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	[60]
Heizöl	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	[60]

#### 4.5.4 Technologiebestand

Die Beschreibung der Erhebung des Technologiebestands der Branchen des Sektors ist in Unterkapitel 2.3 zu finden. Die aggregierte installierte Leistung über die betrachteten Branchen ist für das Jahr 2015 in den Abbildungen 2.9 bis 2.13 ersichtlich.

Abbildung 4.9 zeigt die installierte Leistung der Wärmebereitstellung im Zeitraum von 2015 bis 2050. Die zeitliche Abschreibung des Bestands wird anhand der verbleibenden Lebensdauer einer Technologie extrapoliert. Diese Abbildung zeigt den möglichen Einfluss des Bestands über den Modellierungshorizont. Das Modell *MESSAGEix-GHD* kann die Technologien jedoch auch bereits vor Ende der Lebenszeit durch wirtschaftlichere Technologien ersetzen.

#### 4.5.5 Potenzial erneuerbarer Energien

Das Potenzial der erneuerbaren Energien des GHD-Sektors ist in Tabelle 4.3 erkennbar. Das gesamte jährliche Potenzial der Solarthermie liegt bei 40 TWh [105]. Die Aufteilung des Potenzials der Branchen erfolgt anhand des Anteils der Gebäudefläche [11] einer Branche. Das Potenzial der Biomasse und des Biogases wird nur für den gesamten Sektor hinterlegt. Unter Einhaltung des gesamten Potenzials des Sektors sowie der Kapazitäts- und Aktivitätsgrenzen der jeweiligen Technologien in den einzelnen Branchen kann das Modell *MESSAGEix-GHD* somit das Potenzial optimal unter den Branchen aufteilen.

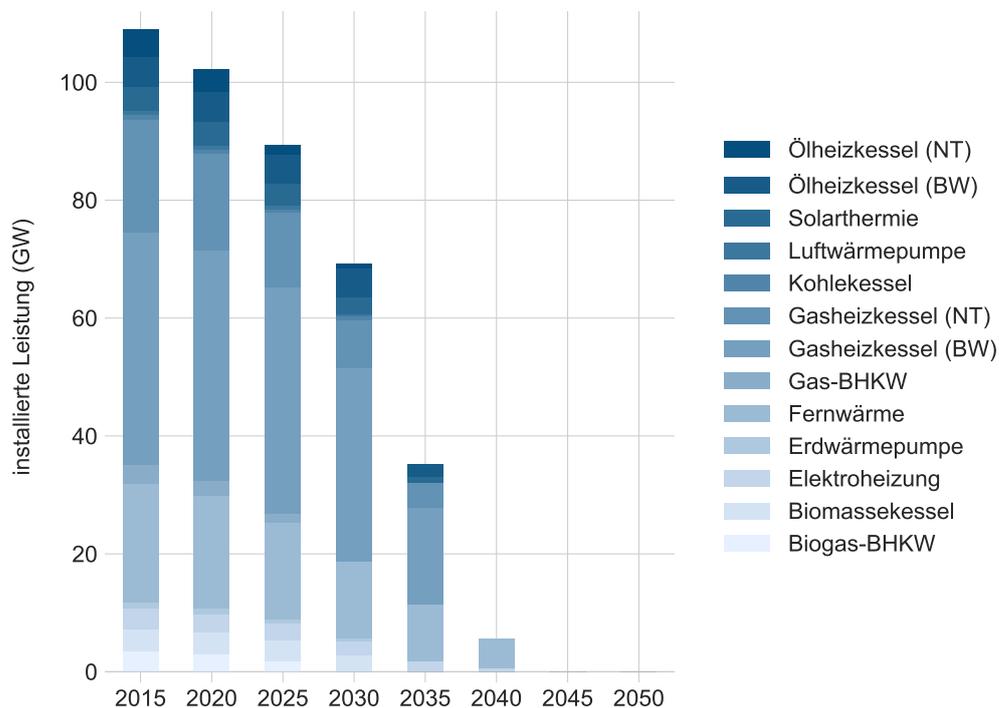


Abbildung 4.9: Abschreibung der thermisch installierten Leistung der Wärmebereitstellung des GHD-Sektors aufgrund der jeweils verbleibenden Lebensdauer. Berechnet aus dem historischen Technologiebestand (vgl. Unterkapitel 2.3) sowie aus den jeweiligen Lebensdauern nach Tabelle B.2.

Tabelle 4.3: Jährliches maximales Potenzial in TWh der erneuerbaren Energien Solarthermie und Bioenergie des Sektors GHD aufgeteilt nach Branchen.

Branchen	Solarthermie [105]	Biomasse [13]	Biogas [26]
Bäder	0,17	–	–
Baugewerbe	3,23	–	–
Bürobetriebe	12,15	–	–
Gartenbau	0,19	–	–
Gastgewerbe	6,07	–	–
Handel	8,03	–	–
Herstellungsbetriebe	1,51	–	–
Krankenhäuser	1,04	–	–
Landwirtschaft	0,94	–	–
Nahrungsmittelgewerbe	0,15	–	–
Schulen	3,93	–	–
Sonstige	2,55	–	–
Wäschereien	0,04	–	–
<b>GHD</b>	<b>40,00</b>	<b>20,91</b>	<b>54,34</b>

#### 4.5.6 CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden im Modell *MESSAGEix-GHD* für die Energieträger anhand der Werte in Tabelle 4.4 bilanziert. Die Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen umfasst in *MESSAGEix-GHD* die direkt und indirekt verursachten Emissionen des Sektors. Dies ist notwendig für die Analyse von Szenarien mit Emissionszielen. Die Betrachtung der indirekten Emissionen hindert das Modell daran, überproportional auf die Energieträger Strom und Fernwärme zu setzen, die bei Vernachlässigung der indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne einen Emissionsfaktor dargestellt würden.

Die Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme besitzen im Zeitraum von 2015 bis 2050 einen dynamischen Verlauf. Diese Faktoren stammen aus dem Startscenario der Energiebereitstellung Deutschlands aus der Veröffentlichung [106]. Das Startscenario ist hierbei eine Reproduktion des Trendszenarios aus [60] mit erneuerten Eingangsdaten. Die Emissionsfaktoren der weiteren Energieträger bleiben über den Betrachtungszeitraum konstant.

*Tabelle 4.4: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren in g CO<sub>2</sub> pro kWh der im Modell verfügbaren Energieträger im Zeitraum zwischen 2015 und 2050.*

Energieträger	Stützjahre								Quelle
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
Heizkohle	341	341	341	341	341	341	341	341	[107]
Diesel	267	267	267	267	267	267	267	267	[107]
Fernwärme	392	236	204	188	149	137	129	123	[106]
Strom	525	357	331	238	151	97	84	75	[106]
Gas	231	231	231	231	231	231	231	231	[107]
Heizöl	279	279	279	279	279	279	279	279	[107]

#### 4.5.7 Kapazitäts- und Aktivitätsgrenzen

Die zukünftige Entwicklung des Sektors GHD wird mit Kapazitäts- und Aktivitätsgrenzen des Modells eingeschränkt. Dies ist notwendig, um die möglichen Entwicklungspfade realistischer zu gestalten. Die Beschränkung erfolgt unter anderem bei der Diffusionsgeschwindigkeit von Technologien. Das Wachstum der Technologien wird aufgrund der historischen Wechselrate und der prognostizierten Absatzzahlen im Zeitraum bis 2050 beschränkt.

Der Zubau von neuen Kapazitäten der Technologien Gasheizkessel (NT), Ölheizkessel (NT) und Kohlekessel ist im Modell nicht erlaubt, sondern nur noch Kessel mit Brennwerttechnik. Diese Annahme beruht auf den aktuellen legislativen Einschränkungen für die Nutzung sowie den Einsatz von effizienteren Technologien. Der Ausbau der Fernwärme und der Biomasse zur Bereitstellung von Wärme wird bis zum Jahr 2050 mit einem moderaten Wachstum erlaubt. Die Wachstumsgeschwindigkeit für Solarthermie und Wärmepumpen wird aus den zukünftigen Absatzzahlen anhand der korrespondierenden Gebäudefläche für Solarthermie [108] und Wärmepumpen [109] für die einzelnen Branchen berechnet.

Der zukünftige Austausch der unterschiedlichen Arten von Elektromotoren ist aufgrund der hohen Unsicherheit und der geringen Information im Modell sehr beschränkt. Die Elektrifizierung

der Bereitstellung der mechanischen Energie im Bereich der Mobilität und im Speziellen in der Landwirtschaft ist bis zum Jahr 2050 aufgrund fehlender marktreifer Technologien begrenzt.

Der Ausbau der elektrischen Prozesswärme wird mittels des share constraint im Modell beschränkt. Der prozentuale Anteil der elektrischen Prozesswärme an der gesamten Prozesswärme (Erzeugung) der jeweiligen Branchen wird für die Modelljahre ausgehend vom Wert in 2015 fortgeschrieben. Diese Annahme beruht auf der Tatsache, dass Informationen bezüglich der möglichen Entwicklung nicht hinreichend bekannt sind.

Für das Modell wird abgeleitet aus den historischen Daten die Annahme getroffen, dass zentrale Klimaanlage einen maximalen Anteil von 70 % des Bedarfs bereitstellen können. Die dezentral erzeugte Klimakälte unterliegt der Annahme, dass davon mindestens ein Drittel mit mobilen Klimageräten bereitgestellt werden muss.

## 4.6 Grenzen des Modells MESSAGEix-GHD

Für die Modellierung des komplexen sektoralen Energiesystems wurden Vereinfachungen vorgenommen und Annahmen getroffen. Dies ist zum einen erforderlich, da die Datengrundlage für die Modellierung der zukünftigen Entwicklung teilweise unzureichend ist. Zum anderen wird der Sektor GHD durch eine heterogene Zusammensetzung geprägt. Des Weiteren werden in dieser Arbeit mögliche Wechselwirkungen mit den weiteren Endverbrauchssektoren nicht berücksichtigt.

### Lineare Optimierung

Das in diesem Kapitel vorgestellte Modell *MESSAGEix-GHD* zur energetischen Modellierung des zukünftigen Sektors GHD ist ein lineares Optimierungsmodell. Das Modell berechnet den kostenoptimalen Ausbau und Einsatz der Technologien zur Deckung der Nutzenergiebedarfe der sieben Anwendungsbereiche Wärme, Prozesswärme, Klimakälte, Prozesskälte, mechanische Energie, Beleuchtung und IKT für die Branchen des GHD-Sektors. Für die Modellierung des Sektors wird hier eine weitere Vereinfachung vorgenommen, indem die Preiselastizität und die Rückkoppelung von Energiepreisen auf den tatsächlichen Bedarf nicht betrachtet werden. Der Grund für die Vernachlässigung des Elastizitätenansatzes liegt in der heterogenen Zusammensetzung des GHD-Sektors und der fehlenden Datengrundlage. Diese Annahme führt im Modell zu einer strikten Deckung der Nutzenergie, was bedeutet, dass die optimale Lösung der Erzeugung gleich dem Bedarf ist. Dies beschränkt den Lösungsraum auf Lösungen mit einem Optimum ohne Unter- und Überproduktion. Die Nichtnutzung von Wärme tritt nur im Modelljahr 2015 aufgrund der historischen Daten auf. Dieser Effekt der Überproduktion kann auf die BHKW-Anlagen zurückgeführt werden. Zum einen unterscheidet sich die Bilanzierung der BHKWs in [13] (vgl. BHKW-Bilanzierung) und zum anderen war es vor 2012 für Biogas-BHKWs erlaubt, überschüssige Energie an die Umwelt abzugeben [29].

Das lineare Optimierungsmodell berechnet das globale Optimum zur Deckung des Bedarfs über alle Branchen und der Energiebereitstellung, was dem Pareto-Optimum entspricht. Somit ist es nicht möglich, für eine spezifische Branche eine kostengünstigere Zusammensetzung an Technologien zu nutzen, ohne dass sich eine andere Branche dabei verschlechtern würde [110].

In der Realität versucht hingegen jeder Betrieb, für sich die kostengünstigste Energiebereitstellung unter Berücksichtigung einer möglichst kurzen Amortisationsdauer (üblicherweise wenige Jahre) für neue Investitionen umzusetzen. Diese Zusammensetzung weicht jedoch vom globalen Pareto-Optimum des gesamten Sektors ab und verursacht höhere Gesamtkosten.

### **Exogener Bedarf**

Der Nutzenergiebedarf wird für das Modell exogen für alle Stützjahre und Branchen vorgegeben und kann nicht vom Modell beeinflusst werden. In der Szenarioanalyse werden für die drei energieintensivsten Branchen unterschiedliche Entwicklungen untersucht, um die Auswirkungen des optimalen Technologiemies zu analysieren.

### **Zeitliche und sektorale Auflösung**

Die zeitliche Auflösung der Modellierung des GHD-Sektors erfolgt auf jährlicher Basis im Zeitraum zwischen 1990 und 2050. Die Daten werden für das Modell in Stützjahre zu jeweils fünf Jahren zusammengefasst. Dieser Zeithorizont ist in zwei Bereiche unterteilt: in die Historie von 1990 bis 2010 und den Modellzeitraum von 2011 bis 2050. Die Historie wird nicht mehr vom Modell optimiert, sondern dient der Abbildung des historischen Technologiebestands. Die sektorale Auflösung des Modells spiegelt im Modell *MESSAGEix-GHD* die 13 Branchen des Sektors, die in Unterkapitel 2.1 definiert werden, und die Koppelung mit Endenergiebereitstellung wider. Hierbei werden Betriebe mit einem ähnlichen Zweck und einer ähnlichen energetischen Verbrauchscharakteristik, unabhängig ihrer Größe, zusammengefasst (z. B. Bürobetriebe).

### **Technologische Auflösung**

Das Ziel des entwickelten Modells *MESSAGEix-GHD* besteht in der Modellierung der grundsätzlichen zukünftigen Entwicklung des Sektors. Die Technologien werden dafür nur vereinfacht, mittels des Wirkungsgrads (ohne Teillastverhalten) und der fixen und variablen Kosten (ohne Anlaufkosten), modelliert. Ferner werden die zeitlichen Schwankungen der Produktion der Solarthermie und die daraus resultierende Zuverlässigkeit für die Modellierung des Sektors vernachlässigt. Der gewählte Detaillierungsgrad ermöglicht eine szenarienbasierte Berechnung einer Vielzahl von Entwicklungspfaden (mehrere tausend) in vertretbarer Rechenzeit. Die Auswertung der gelösten Vielzahl an Szenarien erlaubt die Ableitung möglicher zukünftiger sektoraler Trends.

Eine detaillierte technische Abbildung der einzelnen Technologien, wie z. B. die Betrachtung der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen für ein Heizungssystem, ist hingegen nicht das Ziel des Modells. Ist für die Beantwortung der Forschungsfragen eine exakte Abbildung der technischen Umsetzung eines konkreten Betriebs notwendig, so muss dafür auf ein anderes Modell zurückgegriffen werden.

### **Unsicherheit**

Das Modell *MESSAGEix-GHD* bezeichnet ein deterministisches Modell, für das alle Eingangsgrößen bekannt sind und das keine Zufallsvariablen enthält. In der Realität sind jedoch nicht alle Eingangsparameter direkt eindeutig messbar, sondern unterliegen Schwankungen, was sich in Unsicherheit ausdrückt. In Kapitel 6 werden mittels einer Sensitivitätsanalyse die Parameter mit dem größten Einfluss auf das Ergebnis identifiziert und diskutiert. Parallel dazu wird anhand einer Unsicherheitsanalyse der Erwartungsbereich des Ergebnisses berechnet.

### **Emissionsbilanzierung**

Die Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Nutzung von Energie im Sektor GHD verursacht werden, erfolgt im Modell *MESSAGEix-GHD* für energiebedingte Umwandlungsprozesse. Die verursachten direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden zusätzlich nach dem Verursacherprinzip ausgewiesen. Diese Methodik der Bilanzierung unterscheidet sich zum Verfahren des Quellprinzips dahingehend, dass alle verbrennungsbedingten Emissionen, die durch die Nutzung eines Energieträgers im Sektor entstehen, auch diesem zugeordnet werden. Das bedeutet, dass die indirekten Emissionen, die im Umwandlungssektor entstehen, durch die Bereitstellung von Strom und Fernwärme dem Sektor GHD zugewiesen werden. Die Bilanzierung erfolgt im Ausmaß der Nutzung von Strom und Fernwärme für die Deckung des sektoralen Nutzenergiebedarfs der einzelnen Anwendungsbereiche.

Die Motivation dieser Bilanzierung liegt einerseits darin, dass der Sektor nicht allein durch das Elektrifizieren von Prozessen die Klimaziele erreichen kann, sondern auch anhand von zusätzlichen Maßnahmen wie z. B. mithilfe von Effizienzsteigerungen. Zum einen soll ein möglichst ganzheitliches Bild des Sektors und seines Klimaeinflusses für die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt werden. Andererseits sind im Klimaschutzplan [2] der Bundesregierung aus dem Jahr 2016 verbraucherorientierte Steuer- und Abgabensysteme als eine strategische Maßnahme zur Erreichung der Klimaziele beschrieben.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus erneuerbaren Brennstoffen werden bei der Bilanzierung der sektoralen Emissionen nicht berücksichtigt. Die Konvention dieses Berechnungsverfahrens entspricht der üblichen internationalen Treibhausgasberichterstattung auf nationalstaatlicher Ebene. [4, 107]

Die CO<sub>2</sub>-Emissionsziele beziehen sich auf die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors GHD aus dem Jahr 1990. Diese lagen bei 208 Mt CO<sub>2</sub>, wobei der Anteil der direkten Emissionen bei 86 Mt CO<sub>2</sub> und jener der indirekten bei 122 Mt CO<sub>2</sub> lag. Die Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in *MESSAGEix-GHD* ist in Unterkapitel 2.2.4 dargestellt.

### **BHKW-Bilanzierung**

Die Bilanzierung nach [111] des Brennstoffeinsatzes von BHKW-Anlagen in den Energiebilanzen der AGEB beruhen auf der finnischen Methode [112]. Hierbei wird der Anteil des Brennstoffes prozentual auf Strom und Wärme verteilt. Der Brennstoffanteil der Wärmeerzeugung wird dem Sektor GHD zugeordnet und der Anteil der Stromerzeugung dem Umwandlungssektor. Der Brennstoffeinsatz der BHKW zur Erzeugung von Strom und Wärme wird im Modell

*MESSAGEix-GHD* hingegen vollständig im Sektor GHD bilanziert, da der erzeugte Strom überwiegend im Sektor genutzt wird.

### **Speicher und Netze**

Im Modell *MESSAGEix-GHD* sind keine Speichertechnologien implementiert. Dies hängt mit der gewählten zeitlichen Auflösung des Modells von einem Jahr zusammen. Es sind keine Speicher für den Einsatz der Energiespeicherung im Bereich GHD verfügbar, die Energie länger als ein Jahr sinnvoll technisch und wirtschaftlich speichern können. Der Energieaustausch zwischen den Branchen des GHD-Sektors und der Endenergiebereitstellung sind im Modell verlustfrei abgebildet.

### **Photovoltaik**

Die Technologie der Photovoltaik wird in dieser Arbeit nicht betrachtet und ist daher nicht im Modell *MESSAGEix-GHD* implementiert. Der erzeugte Strom aus Photovoltaikanlagen, die im GHD-Sektors installiert sind, wird nach [13] üblicherweise im Umwandlungssektor bilanziert.

### **Umweltwärme**

Die Energieform Umweltwärme wird im Modell *MESSAGEix-GHD* nicht abgebildet. Die Wärme, die jedoch zum Betreiben der Erd- und Luftwärmepumpe notwendig ist, wird ex-post für die Analyse des Endenergiebedarfs berechnet.

## Kapitel 5

# Szenarioanalyse

Dieses Kapitel beschreibt die Szenarioanalyse für das sektorale Modell *MESSAGEix-GHD* im Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050. Es beginnt mit der Einführung und Beschreibung der Ergebnisse des Referenzszenarios. Aufbauend auf diesem Szenario werden zum einen die Klimaeinflüsse auf den Sektor für die Anwendungsbereiche Wärme und Klimakälte untersucht. Die Auswirkungen der vom Umwandlungssektor und im Modell exogen vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme werden anhand der CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarien analysiert. Zum anderen wird der Einfluss möglicher struktureller Entwicklungen im Sektor GHD untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse in einer kurzen Diskussion eingeordnet und verglichen.

### 5.1 Entwicklung des Basisszenarios – Referenzszenario

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Beschreibung des Referenzszenarios und es werden die Ergebnisse für den GHD-Sektor vorgestellt. Das Szenario baut auf den Eingangsdaten auf, die in Unterkapitel 4.5 vorgestellt wurden.

#### 5.1.1 Szenarioannahmen

Das Referenzszenario basiert auf den Annahmen der sektoralen Entwicklungen sowie den Energiepreisen des Trendszenarios der Studie „Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose“ [60] (kurz Energierferenzprognose). Aufbauend auf einem konsistenten gesamtwirtschaftlichen Rahmen untersucht die Studie die Entwicklungen der Energiemärkte Deutschlands bis zum Jahr 2030. Die Ergebnisse werden anhand von zwei Szenarien erörtert: dem Trendszenario und dem Zielszenario. Das Trendszenario zeigt die Ergebnisse unter der Annahme, dass die Entwicklungen ab 2030 bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben werden. Im Zielszenario wird hingegen aufgezeigt, welche Maßnahmen notwendig sind, um die klimapolitischen Ziele zu erreichen. Diese Studie wurde aus zwei Gründen als Grundlage zur Erstellung des Referenzszenarios ausgewählt: erstens aufgrund seiner sektoralen Auflösung und zweitens aufgrund des betrachteten Zeitraums bis 2050.

Das Trendszenario beruht auf der Annahme, dass das Wirtschaftswachstum für den Sektor GHD bis zum Jahr 2050 weiter ansteigt. Im Vergleich zu 2011 liegt die reale Bruttowertschöpfung des Sektors im Jahr 2030 um 21 % und im Jahr 2050 um 44 % darüber. Im selben Zeitraum nimmt hingegen die Erwerbstätigenzahl bis 2030 um 5 % und bis 2050 um 10 % ab. Aufgrund anziehender Weltmarktpreise für alle Energieträger steigen die Energiepreise für den GHD-Sektor.

Die Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme stammen aus [106]. Die Faktoren werden in dieser Veröffentlichung für das oben erwähnte Trendszenario der Energieresferenzprognose berechnet. Hierbei werden die Endenergiesektoren sowie der Umwandlungssektor Deutschlands aus der Energieresferenzprognose anhand mehrerer Modelle nachgebildet. Auf Basis dieser Modellierung werden die durchschnittlichen jährlichen Emissionsfaktoren für die Modelljahre 2020 bis 2050 berechnet.

Das lineare Optimierungsmodell *MESSAGEix-GHD* berechnet unter diesen Annahmen und den in Unterkapitel 4.5 beschriebenen Eingangsdaten den kostenoptimalen Energieeinsatz für den Sektor GHD im Zeitraum von 2015 bis 2050. Für das Referenzszenario gelten keine Restriktionen bezüglich CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die grundlegenden Annahmen der sektoralen Entwicklungen und Beschränkungen des Modells sind in Unterkapitel 4.5.7 dargelegt.

### 5.1.2 Nutzenergieprojektion

Der Nutzenergiebedarf wird mittels der entwickelten Nutzenergieprojektion (vgl. Kapitel 3) für die Modelljahre ab 2020 berechnet. Die Nutzenergie wird auf Basis der Entwicklung der zukünftigen Bezugseinheiten (überwiegend Erwerbstätige) und des spezifischen Nutzenergiebedarfs pro Branche für ein Temperaturszenario berechnet. Die Temperaturszenarien beschreiben die zukünftigen Temperaturen Deutschlands anhand des Klimamodells RCA4 für die RCP-Szenarien sowie das konstante Wetterjahr 2014 bis zum Jahr 2050. Die Projektion des Nutzenergiebedarfs je Branche und Anwendungsbereich erfolgt für das Referenzszenario auf Grundlage der Temperaturen des Wetterjahrs 2014.

Die branchenspezifischen Entwicklungen der Erwerbstätigen und des spezifischen Nutzenergiebedarfs des GHD-Sektors werden aus dem Trendszenario der Energieresferenzprognose [60] abgeleitet und sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Die Tabelle zeigt die Annahme der jährlichen prozentualen Veränderung der Bezugseinheiten für den Zeitraum von 2016 bis 2050. Den größten Rückgang der Erwerbstätigen bis zum Jahr 2050 verzeichnen die Branchen Landwirtschaft (-34,0 %) und Baugewerbe (-33,7 %). Die Entwicklung der drei energieintensivsten Branchen Bürobetriebe, Gastgewerbe und Handel stellt sich wie folgt dar: Die Zahl der Erwerbstätigen im Bereich des Gastgewerbes steigt gering, um 2,4 % bis zum Jahr 2050. Für die Bürobetriebe ist hingegen ein Rückgang von -5,1 % der Beschäftigten und im Bereich des Handels von -18,7 % prognostiziert. [60]

Die zunehmende energetische Gebäudesanierung, der Bezug neuer Gebäude sowie die rückläufigen Erwerbstätigenzahlen führen im Sektor GHD zu einem Rückgang der beheizten Flächen. Bis zum Jahr 2050 reduziert sich daher der spezifische Nutzenergiebedarf von Wärme um 31,3 % im Vergleich zum Jahr 2015.

Der spezifische Bedarf an Prozesswärme steigt im gleichen Zeitraum um 10,5 %. Dieser Anstieg wird durch den zunehmenden Einsatz von Convenience Food (vorgefertigten Lebensmitteln) hervorgerufen [113]. Einen weit größeren Anstieg zeigen die Anwendungsbereiche der Klima- und Prozesskälte mit 86,1 % bis 2050. Dieses Wachstum im Bereich der Klimakälte ist bedingt durch einen erhöhten Komfortbedarf im Sommer und ein verändertes Produktportfolio für die Prozesskälte. Für die verbleibenden Anwendungsbereiche IKT, mechanische Energie und Beleuchtung wird der spezifische Nutzenergiebedarf pro Bezugseinheit im Zeitraum von 2016 bis 2050 als konstant betrachtet. [60]

Tabelle 5.1: Entwicklung der jährlichen prozentualen Veränderung der Erwerbstätigen für die einzelnen Branchen des GHD-Sektors. Eigene Berechnung nach den Annahmen aus [60].

Branchen	jährliche Veränderung (%)						
	2016–2020	2021–2025	2026–2030	2031–2035	2036–2040	2041–2045	2046–2050
Bäder	0,262	0,227	0,035	0,034	0,034	–0,060	–0,060
Baugewerbe	–1,297	–1,000	–1,452	–1,194	–1,270	–0,954	–1,002
Bürobetriebe	–0,096	–0,041	–0,181	–0,146	–0,147	–0,212	–0,215
Gartenbau	–0,564	–0,825	–0,944	–0,824	–0,860	–0,803	–0,837
Gastgewerbe	0,262	0,227	0,035	0,034	0,034	–0,060	–0,060
Handel	–0,853	–0,618	–0,641	–0,498	–0,511	–0,493	–0,505
Herstellungsbetriebe	0,262	0,227	0,035	0,034	0,034	–0,060	–0,060
Krankenhäuser	0,239	0,177	0,075	0,142	0,141	0,198	0,196
Landwirtschaft	–2,095	–1,391	–1,256	–0,917	–0,962	–0,802	–0,835
Nahrungsmittelgewerbe	0,262	0,227	0,035	0,034	0,034	–0,060	–0,060
Schulen	0,252	0,270	0,167	0,204	0,202	0,126	0,125
Sonstige	–1,224	–0,504	–0,578	–0,548	–0,564	–0,605	–0,624
Wäschereien	0,262	0,227	0,035	0,034	0,034	–0,060	–0,060

### Ergebnis der Nutzenergieprojektion

Das Ergebnis der Nutzenergieprojektion ist in Abbildung 5.1 ersichtlich. Das Diagramm veranschaulicht die Veränderung des gesamten Nutzenergiebedarfs des Sektors über alle Branchen gegenüber dem Jahr 2015. Diese basieren auf den Veränderungen der Bezugseinheit und des spezifischen Nutzenergiebedarfs je Anwendungsbereich, die oben beschrieben sind. Der Bedarf an Nutzenergie sinkt bis 2050 aufgrund der rückläufigen Gesamtbevölkerung Deutschlands, der daraus resultierenden sinkenden Beschäftigtenzahlen sowie der veränderten Energieintensitäten um –18,8 %. Der Bedarf an Wärme war im Jahr 2015 mit 63,3 % über alle Branchen hinweg aus energetischer Sicht der bedeutendste Anwendungsbereich. Trotz Anstrengungen zur Effizienzsteigerung im Gebäudebereich bleibt diese Bedeutung auch im Jahr 2050 bestehen. Der Wärmeanteil reduziert sich auf 50,2 %, bleibt aber weiterhin der relevanteste Anwendungsbereich. Der größte Bedarfsanstieg an Nutzenergie zeigt sich im Bereich Kälte. Die Klima- und Prozesskälte steigen von 9,8 % im Jahr 2015 auf 19,6 % im Jahr 2050 und verursachen dadurch nach der Wärme den zweitgrößten Bedarf. Die vollständigen Ergebnisse der Nutzenergieprojektion für das Referenzszenario befinden sich im Anhang in Tabelle A.1.

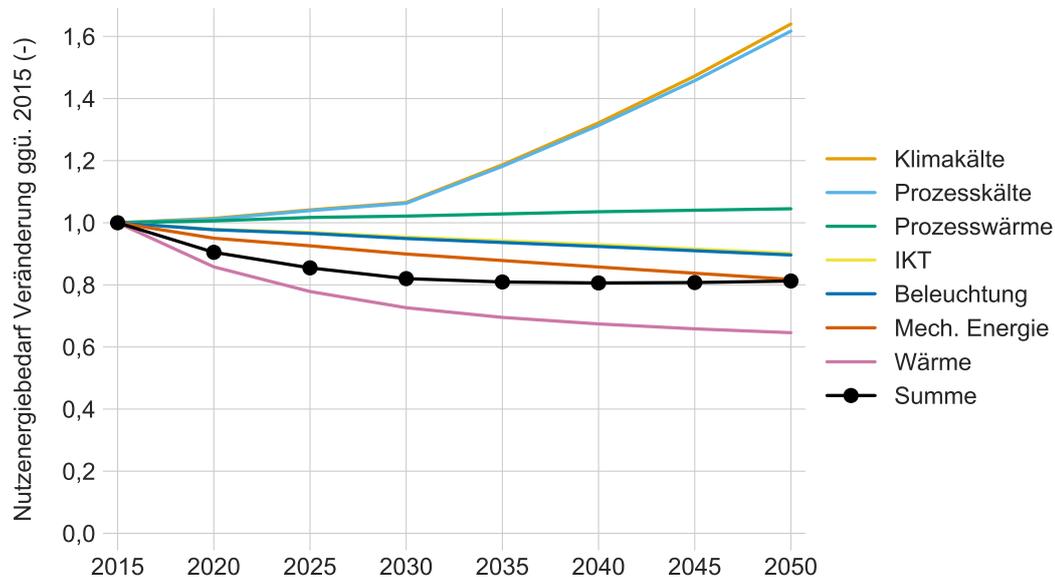


Abbildung 5.1: Ergebnis der Nutzenenergieprojektion für das Referenzszenario in Form der prozentualen Veränderung des Bedarfs gegenüber dem Jahr 2015. Darstellung der Entwicklung des gesamten Sektorbedarfs und des Bedarfs der einzelnen Anwendungsbereiche.

### 5.1.3 Auswertung der Modellergebnisse

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs des Referenzszenarios ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Der Bedarf des GHD-Sektors zeigt einen rückläufigen Verlauf bis zum Jahr 2050. Im Jahr 2015 liegt der sektorale Endenergiebedarf bei 447,5 TWh und sinkt bis zum Jahr 2050 auf 274,8 TWh (-38,6%). Auch die Zusammensetzung der Energieträger im Referenzszenario verändert sich im Betrachtungszeitraum deutlich. Der Anteil der fossilen Energieträger Gas, Heizöl, Diesel und Kohle sinkt von 50,4% im Jahr 2015 auf 38,2% im Jahr 2050. Der Rückgang des Anteils der fossilen Brenn- und Kraftstoffe am Endenergiebedarf wird im Jahr 2050 durch Strom (32,5%) und Fernwärme (12,9%) substituiert. Die Entwicklung dieser beiden Energieträger lässt im Betrachtungszeitraum ein stetiges Wachstum ihrer Anteile am Endenergiebedarf erkennen. Der Anteil der erneuerbaren Energien der Biomasse, Biogas, Solarthermie und Umweltwärme liegt im Jahr 2015 bei 15,1% und im Jahr 2050 bei 16,4%. Die Entwicklung dieses Anteils im Betrachtungszeitraum ist jedoch nicht monoton steigend. Bis zum Jahr 2030 verliert der Anteil des Biogases unter den erneuerbaren Energieträgern deutlich an Bedeutung. Dies führt zeitgleich zu einem Rückgang des Anteils der erneuerbaren Energieträger am gesamten Endenergiebedarf. Die steigenden fossilen Energiepreise und der technologische Fortschritt der Wärmepumpe begünstigen einen steigenden Ausbau dieser Technologie ab dem Jahr 2035.

Der Rückgang des Endenergiebedarfs in den Jahren von 2015 auf 2020 um 18,4% erklärt sich vor allem anhand des sinkenden Bedarfs an Wärme und der Vermeidung der Überproduktion an Wärme. Der Endenergiebedarf des größten Anwendungsbereichs Wärme sinkt im Betrachtungszeitraum von 285,6 TWh im Jahr 2015 um 45,6% auf 155,4 TWh bis zum Jahr 2050.

Der Anteil der Wärme stellt mit 56,5 % jedoch weiterhin den relevantesten Anwendungsbereich im letzten Stützjahr 2050 dar.

Ferner sinkt der Strombedarf der Beleuchtung um 56,0 % von 49,7 TWh im Jahr 2015 auf 21,9 TWh im Jahr 2050. Der Nutzenergiebedarf sinkt im gleichen Zeitraum lediglich um 10,6 %. Dieser hohe Rückgang des Endenergiebedarfs wird durch eine hohe Effizienzsteigerung erreicht. Mit einem Anteil von 86,5 % am gesamten Beleuchtungsbedarf des Sektors GHD nimmt die LED-Lampe eine wesentliche Rolle zur Beleuchtungsbereitstellung im Jahr 2050 ein. Diese Technologie ist im Vergleich zu den anderen verfügbaren Beleuchtungstechnologien deutlich effizienter.

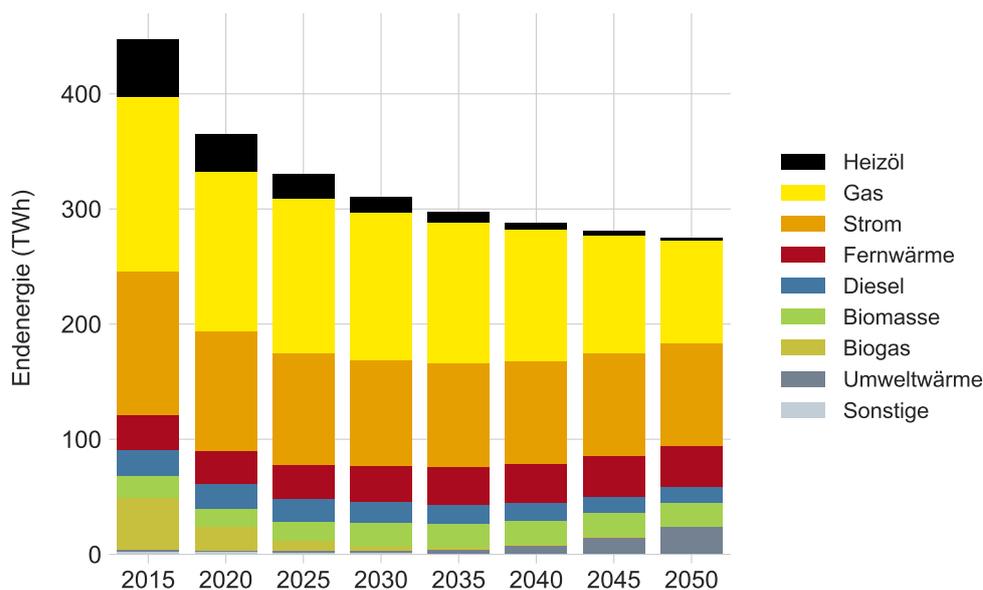


Abbildung 5.2: Entwicklung des sektoralen Endenergiebedarfs nach Energieträger im Zeitraum von 2015 bis 2050 für das Referenzszenario für den gesamten GHD-Sektor.

Abbildung 5.3 zeigt die Entwicklung des Nutzenergiebedarfs an Wärme sowie deren Erzeugung. Der Wärmebedarf von 198,2 TWh wird im Jahr 2015 überwiegend mittels Technologien bereitgestellt, die auf fossilen Kraft- und Brennstoffen (68,2 %) basieren. Am Ende des Betrachtungszeitraums, im Jahr 2050, werden hingegen lediglich 39,6 % der 128,0 TWh durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe bereitgestellt. Die Hälfte (50,2 %) des Bedarfs wird in diesem Jahr durch Fernwärme (26,6 %) und Luftwärmepumpe (23,6 %) erzeugt. Diese Anwendungen verdrängen die Technologien der Öl- und Gaskessel zur Wärmebereitstellung. Im gleichen Zeitraum verändert sich hingegen die Wärmeproduktion mittels Gas-BHKW und Biomassekessel kaum. Die Solarthermie (in Sonstige inbegriffen) besitzt im Referenzszenario mit 0,7 % eine sehr geringe Bedeutung zur Deckung des Wärmebedarfs im Sektor GHD.

Die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen des Referenzszenarios sind in Abbildung 5.4 für den Sektor GHD dargestellt. Die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen in diesem Szenario eine Reduktion von 82,8 % gegenüber dem Basisjahr 1990. Werden ausschließlich die direkten Emissionen des Sektors betrachtet, so wird im gleichen Zeitraum lediglich eine Reduktion von 71,1 % erreicht.

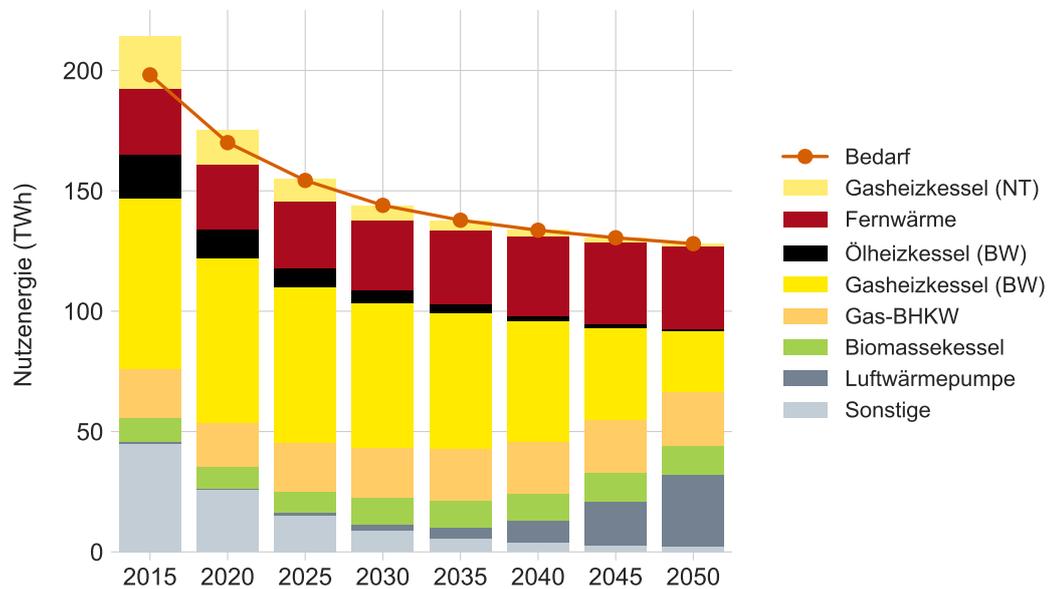


Abbildung 5.3: Entwicklung der sektoralen Deckung des Wärmebedarfs. Darstellung der eingesetzten Technologien zur Bereitstellung von Wärme im Zeitraum von 2015 bis 2050 für das Referenzszenario des gesamten GHD-Sektors.

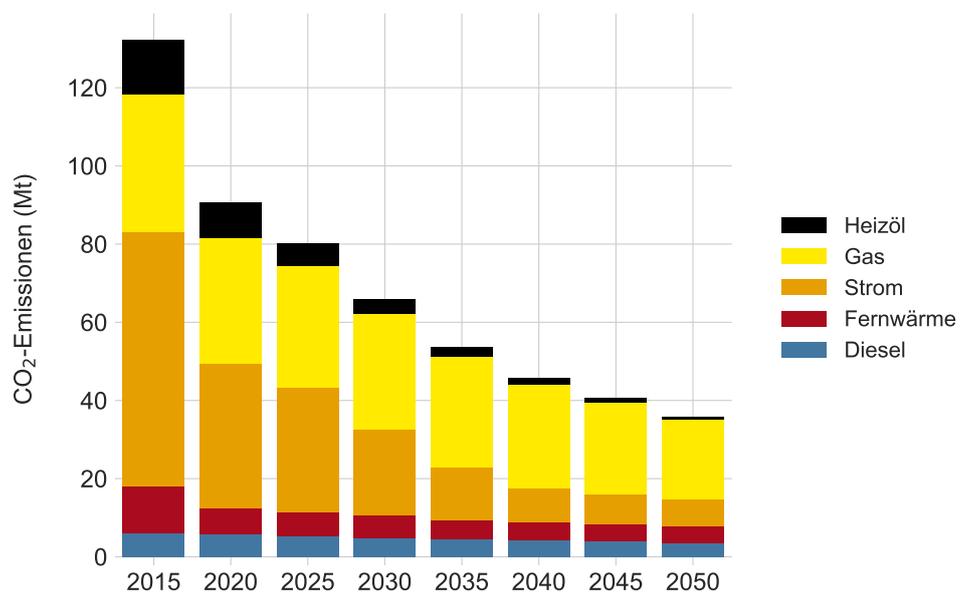


Abbildung 5.4: Entwicklung der sektoralen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger im Zeitraum von 2015 bis 2050 für das Referenzszenario des gesamten GHD-Sektors.

Der kostenoptimale Transformationspfad des Referenzszenarios erfüllt somit nicht die geforderten Klimaziele der Bundesregierung, die eine Reduktion der Treibhausgas-Emissionen von 80 bis 95 % bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 1990 vorgeben (vgl. Tabelle 1.1).

Der größte Rückgang an CO<sub>2</sub>-Emissionen wird durch die zunehmende Elektrifizierung des Sektors hervorgerufen. Diese Reduktion ist auf den stark sinkenden Emissionsfaktor von Strom bis 2050 zurückzuführen (vgl. Tabelle 4.4). Aufgrund des fossilen Technologiewechsels (z. B. Ölkessel hin zu Gaskessel) sinken die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Verbrennung des Kraftstoffs verursacht werden.

## 5.2 Veränderter Wärme- und Kältebedarf – Klimaszenarien

Die Anwendungsbereiche Wärme und Klimakälte verursachen im Jahr 2015 65,9 % und im Jahr 2050 55,8 % des gesamten sektoralen Nutzenergiebedarfs. Mithilfe der Klimaszenarien wird untersucht, welchen Einfluss die zukünftige Entwicklung des globalen Klimas aufgrund veränderter Tagesmitteltemperaturen auf den Wärme- und Klimakältebedarf des GHD-Sektors hat.

### 5.2.1 Szenarienannahmen

Die Eingangsdaten des Modells *MESSAGEix-GHD* unterliegen für die Klimaszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5, abgesehen vom Nutzenergiebedarf der Wärme und Klimakälte, den gleichen Annahmen und Eingangsdaten wie im Referenzszenario (vgl. Unterkapitel 5.1.1).

### 5.2.2 Nutzenergieprojektion

Der zukünftige Nutzenergiebedarf wird für diese Szenarien anhand der mittleren zukünftigen Tagestemperaturen, die aus dem regionalen Klimamodell RCA4 stammen, sowie mittels der Nutzenergieprojektion berechnet. Das Klimamodell des Rossby Centers des Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts berechnet die resultierenden mittleren Tagestemperaturen für die RCP-Szenarien der IPCC. Diese Szenarien bilden die repräsentativen Konzentrationspfade (engl. Representative Concentration Pathways) für einen festgelegten Strahlungsantrieb bis zum Jahr 2100 ab. Die Temperaturkorrekturfaktoren für die Berechnung der Wärme- und Klimakältebedarfe werden für die drei unterschiedlichen Szenarien Deutschlands aus dem Klimamodell CORDEX extrahiert. Die für die Arbeit entwickelte Methodik der Nutzenergieprojektion ist im Detail in Unterkapitel 3.2 dargelegt.

### Ergebnis der Nutzenergieprojektion

Die Ergebnisse der Nutzenergieprojektion sind für den Sektor GHD in Abbildung 5.5 dargestellt. Zu erkennen ist ein genereller Rückgang des Bedarfs bis zum Jahr 2050. Die Bedarfsreduktion wird für den zukünftigen Sektor GHD aufgrund der Annahmen des Referenzszenarios hervorgerufen. Der Nutzenergiebedarf der Klimaszenarien schwankt stark um den jährlichen Bedarf des Referenzszenarios. Es gibt Jahre, in denen der Nutzenergiebedarf über dem des Referenzszenarios liegt, jedoch auch Jahre, in denen dieser deutlich darunter liegt. Die große Schwankung erklärt sich vor allem durch den veränderten Wärmebedarf. Die Klimaszenarien

offenbaren keinen eindeutigen Trend bezüglich der Entwicklungen untereinander. Dies zeigt sich durch die schwankenden Bedarfe der unterschiedlichen Jahre und Szenarien. Der berechnete Nutzenergiebedarf für die Anwendungsbereiche Wärme und Klimakälte wird im Modell ab dem Jahr 2020 mit den expliziten Werten der Stützjahre bis zum Jahr 2050 angepasst.

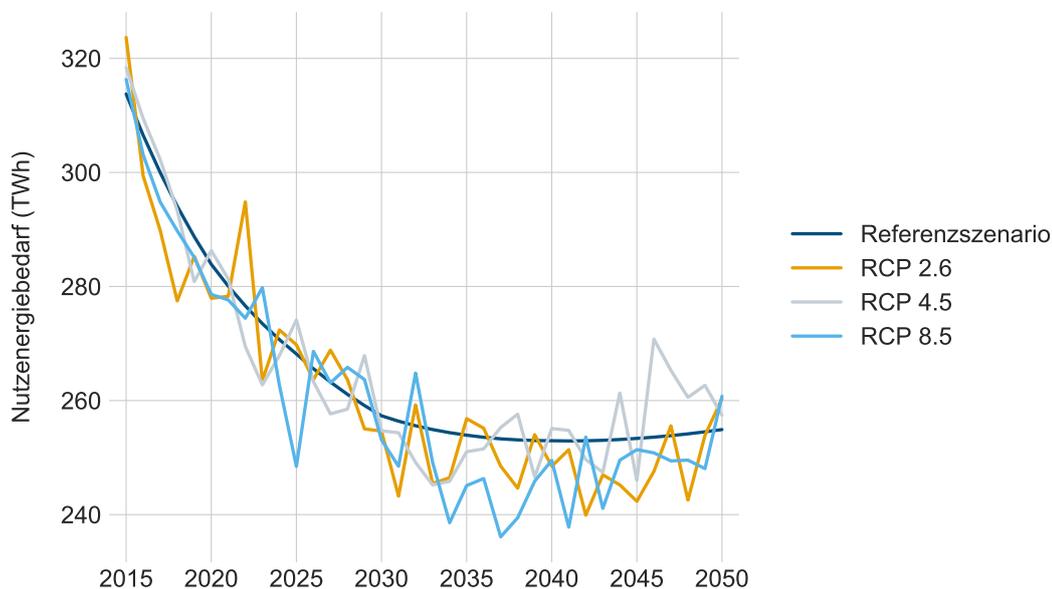


Abbildung 5.5: Ergebnis der sektoralen Nutzenergieprojektion für das Referenzszenario und die Klimaszenarien im Zeitraum von 2015 bis 2050.

### 5.2.3 Auswertung der Modellergebnisse

Die Entwicklungen des gesamten sektoralen Endenergiebedarfs der Branchen des Sektors GHD sind in Abbildung 5.6 veranschaulicht. Ersichtlich ist der Verlauf der Bedarfe für die drei Klimaszenarien und das Referenzszenario. Für das Referenzszenario liegt der Endenergiebedarf bei 365,3 TWh im Jahr 2020. Die Klimaszenarien lassen für dieses Jahr einen ähnlichen Bedarf erkennen. Die Abweichung des Bedarfs liegt für das Szenario RCP 8.5 bei  $-2,2$  TWh und für das Szenario RCP 4.5 bei  $3,4$  TWh. Im Jahr 2050 liegt der Endenergiebedarf der dargestellten Szenarien unter 274,8 TWh, was dem Wert des Referenzszenarios entspricht. Die größte Abweichung vom Referenzszenario weist das Szenario RCP 8.5 mit  $-6,2\%$  ( $-17,1$  TWh) auf, gefolgt von RCP 4.5 mit  $-2,1\%$  ( $-5,8$  TWh) und RCP 2.6 mit  $-0,3\%$  ( $-1,0$  TWh). Dieser Rückgang des Endenergiebedarfs lässt sich anhand des sinkenden Wärmebedarfs erklären, der durch die steigenden mittleren Tagestemperaturen im Zeitraum von 2020 bis 2050 bedingt wird.

Im Szenario RCP 8.5 sinkt der Wärmebedarf um  $16,9\%$  im Vergleich zum Referenzszenario. Diese Reduktion des Bedarfs führt dazu, dass sich die Kostenstruktur zur Bereitstellung von Wärme im Sektor GHD ändert. Der Einsatz der Luftwärmepumpe ist in diesem Szenario deutlich unwirtschaftlicher und sinkt um  $72,3\%$  im Vergleich zum Referenzszenario. Diese Veränderung wirkt sich im gleichen Maß auf die Ausnutzung der Umweltwärme aus.

Die zweitgrößte Technologieveränderung mit einer Reduktion liegt bei der Fernwärme von 14,4% (vgl. Abbildung 5.7). Im gleichen Zeitraum steigt für dieses Szenario der Klimakältebedarf um einen Faktor von 3,3 bis zum Jahr 2050. Dies zeigt, dass die Klimakälte und die Bedeutung im GHD-Sektor in Zukunft zunehmen. Bei Betrachtung des absoluten Einflusses der Klimakälte wird deutlich, dass der Anteil mit 15,9 TWh aufgrund der Zusammensetzung der Anwendungsbereiche des Endenergiebedarfs weiterhin im unteren Bereich liegt.

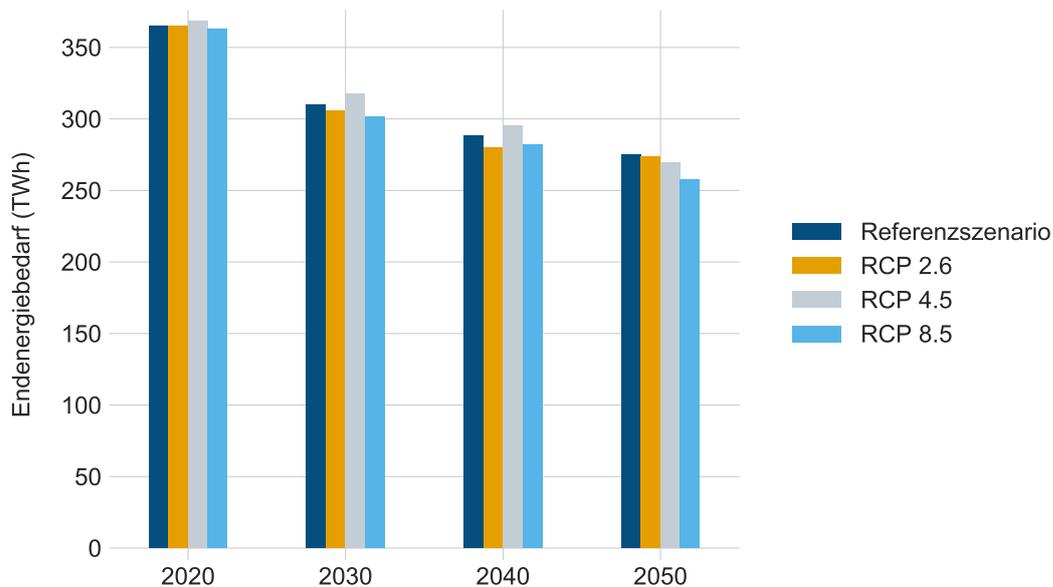


Abbildung 5.6: Entwicklung des zukünftigen Endenergiebedarfs der Klimaszenarien und des Referenzszenarios für ausgewählte Jahre bis zum Jahr 2050.

Die Zusammensetzung der Energieträger für die Bereitstellung der Endenergie ist in Abbildung 5.7 für das Jahr 2050 dargestellt. Die Endenergie wird in allen Szenarien überwiegend mittels der Energieträger Strom und Gas bereitgestellt. Der Mittelwert dieser Energieträger liegt bei 67,4%. Der Strombedarf steigt in allen Klimaszenarien im Vergleich zum Referenzszenario. Dieser Anstieg wird durch den vermehrten Einsatz von zentralen und dezentralen Klimaanlage hervorgerufen. Ferner gewinnt Gas, aufgrund des veränderten Grenzpreises der Bereitstellungsstruktur, an Bedeutung für die Deckung des Wärmebedarfs. Die größte Veränderung eines Energieträgers erfolgt im Szenario RCP 8.5. Der Einsatz von Umweltwärme (Teil von Sonstige in der Abbildung) sinkt um 16,9 TWh im Vergleich zum Referenzszenario.

Abbildung 5.8 zeigt die unterschiedlichen Dekarbonisierungspfade des GHD-Sektors. Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der betrachteten Szenarien lässt grundsätzlich einen sehr ähnlichen Verlauf erkennen. Im Jahr 2050 liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Mittelwert bei 36,0 Mt CO<sub>2</sub>. Dies entspricht einer Reduktion der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 von 82,7%. Die Abweichung der Klimaszenarien zum Referenzszenario ist mit -0,88% im RCP-8.5-Szenario und 1,8% RCP-2.6-Szenario im Jahr 2050 sehr gering. Die größte jährliche Abweichung vom Transformationspfad des Referenzszenarios mit -5,6% weist das Szenario RCP 8.5 im Jahr 2025 auf.

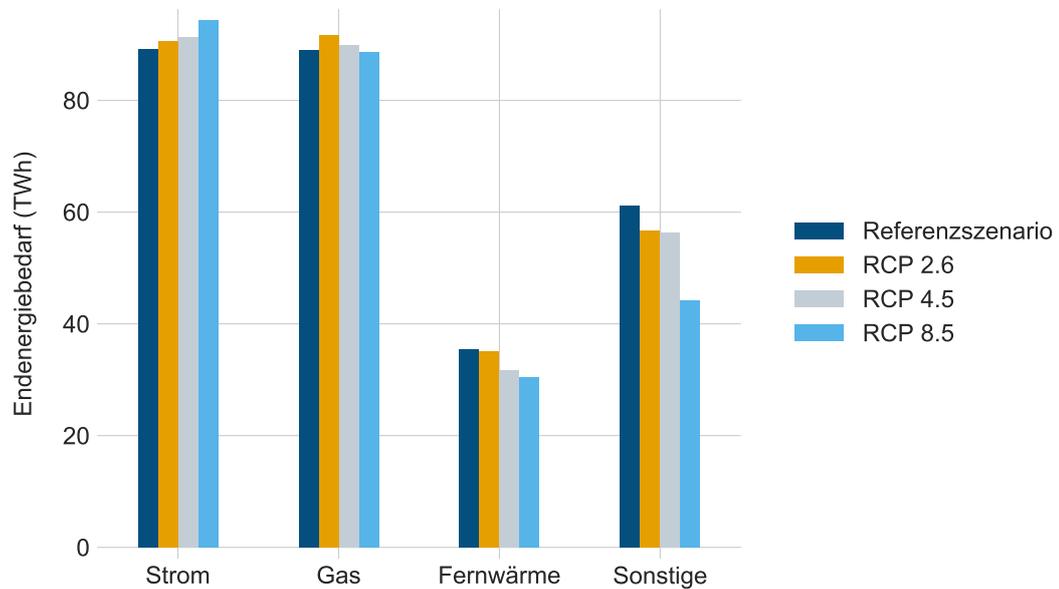


Abbildung 5.7: Vergleich des Endenergiebedarfs der drei bedeutendsten Energieträger Strom, Gas und Fernwärme sowie Sonstige im Jahr 2050.

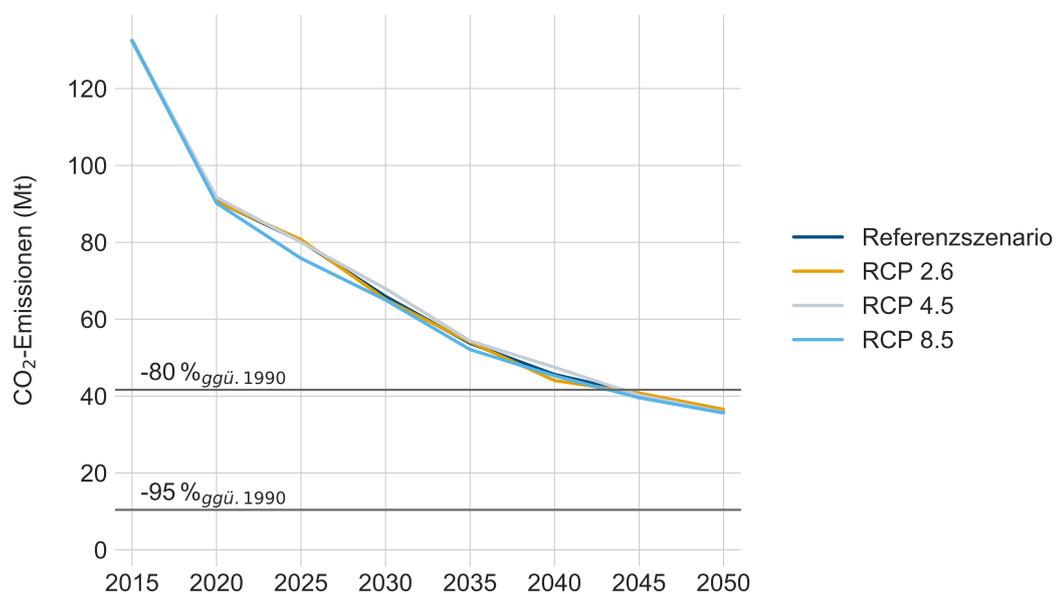


Abbildung 5.8: Pfade zur Dekarbonisierung der Klimaszenarien und des Referenzszenarios des Sektors GHD über den Betrachtungszeitraum.

Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Endenergiebedarfs der analysierten Klimaszenarien zeigt, dass der Klimaeinfluss auf die Technologiestruktur zur Bereitstellung von Wärme und Klimakälte bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts einen geringen Einfluss hat. Der betrachtete Klimaeinfluss wirkt sich nicht auf die Nichterreichung des ambitionierten Klimaziels (Reduktion von 95 % gegenüber 1990) der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 aus.

### 5.3 Einfluss der Emissionsfaktoren – CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarien

Im Jahr 2015 verursachen die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen mit 58,2 % mehr als die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors GHD im Referenzszenario. Zunehmende Anstrengungen bei der klimafreundlichen Bereitstellung von Strom und Fernwärme im Umwandlungssektor führen dazu, dass die indirekten Emissionen des Sektors rückläufig sind (vgl. Abbildung 5.4). Der Anteil dieser liegt am Ende des Transformationsprozesses bei 30,8 % im Jahr 2050.

Die Entwicklung im Referenzszenario verdeutlicht, dass die vom Sektor GHD verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu einem großen Teil durch die Nutzung von Strom und Fernwärme zur Deckung der sektoralen Bedarfe verursacht werden. Im Modell *MESSAGEix-GHD* werden die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Bereitstellung der Energieträger im Umwandlungssektor anfallen, anhand der Emissionsfaktoren abgebildet. Diese Parameter werden im Modell exogen vorgegeben. Das bedeutet, dass das Modell keinen Einfluss auf die Werte dieser Faktoren hat. Die Auswirkungen für den Sektor der mit Unsicherheit behafteten Entwicklungen der Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme werden im Nachfolgenden mithilfe der CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarien untersucht.

#### 5.3.1 Szenarienannahmen

Die CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarien unterscheiden sich im Vergleich zum Referenzszenario in den Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme ab dem Jahr 2020. Die Anpassung der Faktoren im Vergleich zum Referenzszenario erfolgt für beide Energieträger in zwei Stufen. Im ersten Schritt werden die Emissionsfaktoren des Jahres 2050 in beiden Richtungen um  $\pm 20$  und um  $\pm 40$  % skaliert. Das Szenario Emissionsfaktor  $-40$  % spiegelt ungefähr den Wert des Emissionsfaktors für Strom wider, der sich bei der Erreichung des 95 %-Ziels ergeben würde. Durch die Erhöhung dieser Faktoren werden die Auswirkungen für den GHD-Sektor untersucht, wenn die Klimaziele im Umwandlungssektor nicht erreicht werden. Die skalierten Faktoren werden im zweiten Schritt auf die vorliegenden Werte des Jahres 2015 diskontiert. In diesem Schritt der Diskontierung wird analog des Referenzszenarios die gleiche zeitliche Entwicklung (Gradient) der Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme unterstellt. Im Modell *MESSAGEix-GHD* werden die neu berechneten Emissionsfaktoren ab dem Jahr 2020 für das entsprechende Szenario angepasst.

#### 5.3.2 Auswertung der Modellergebnisse

Die Entwicklung der prozentualen Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario ist in Abbildung 5.9 für ausgewählte Jahre zur erkennen. Die steigende Unsicherheit der Emissionsfaktoren über den Betrachtungszeitraum hinweg, die in Form von Emissionsszenarien dargestellt ist, zeigt eine zunehmende Abweichung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

im Vergleich zum Referenzszenario. Die Skalierung der Emissionsfaktoren von Strom und Fernwärme im Jahr 2050 um  $\pm 40\%$  führt zu einer Veränderung der im Sektor GHD verursachten  $\text{CO}_2$ -Emissionen um  $\pm 12,3\%$ . Die Auswirkungen der Emissionen, die durch den Einsatz von Strom und Fernwärme verursacht werden, sind in Abbildung 5.10 für das Jahr 2050 veranschaulicht. Die Veränderungen in den Szenarien um  $\pm 40\%$  belegen, dass die Auswirkungen beim Energieträger Strom mit  $7,5\%$  größer ausfallen als bei der Fernwärme mit  $4,9\%$ . Dieser Zusammenhang erklärt sich durch die größere sektorale Bedeutung des Energieträgers Strom im Vergleich zur Fernwärme im Jahr 2050 (vgl. Abbildung 5.2).

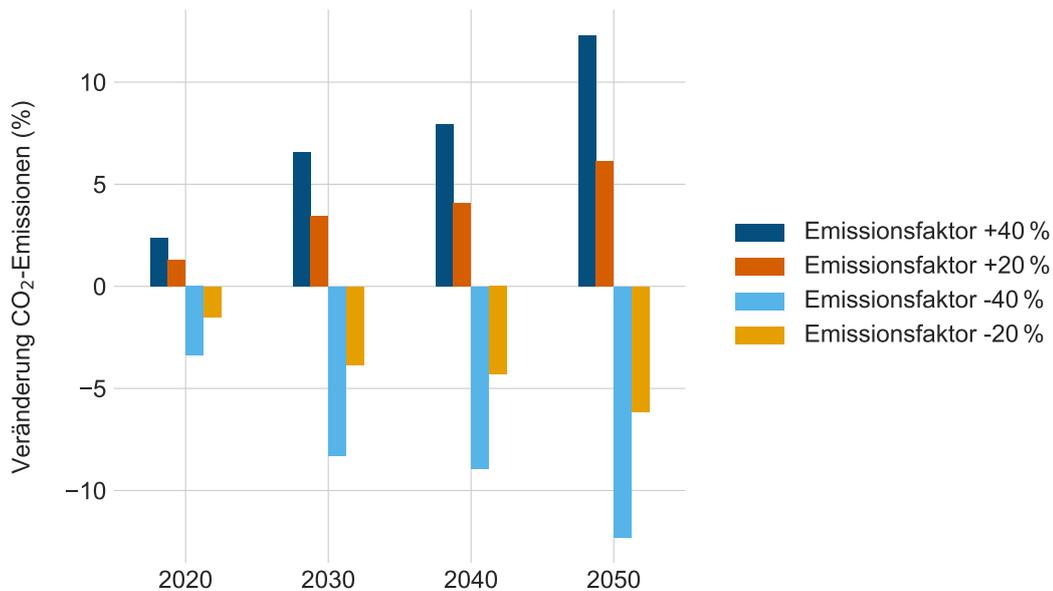


Abbildung 5.9: Entwicklung der prozentualen Veränderung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen der Emissionsszenarien im Vergleich zum Referenzszenario.

Die Ergebnisse der  $\text{CO}_2$ -Emissionsszenarien bestätigen, dass die indirekten energiebedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen einen signifikanten Einfluss auf die Deckung der Nutzenergiebedarfe und die daraus resultierenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen haben. Somit sind niedrigere Werte der Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme für den Transformationsprozess hin zu einer klimafreundlichen Bereitstellung der Nutzenergie im Sektor GHD von zentraler Bedeutung.

#### 5.4 Strukturelle Veränderungen des Sektors – GHD-Szenarien

Die strukturelle Entwicklung des GHD-Sektors wird für das Referenzszenario aus dem Trend-szenario der Energiereferenzprognose abgeleitet. Dieses Szenario geht von einem Rückgang der Beschäftigten des GHD-Sektors bis zum Jahr 2050 aus. Mithilfe der GHD-Szenarien werden Transformationspfade untersucht, die in der strukturellen Zusammensetzung des Sektors vom Referenzszenario abweichen. Der zukünftige Energieeinsatz und die daraus resultierenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen werden für sechs GHD-Szenarien untersucht. Diese Szenarien bilden hierbei unterschiedliche Wachstumsentwicklungen der Erwerbstätigen der drei energieintensiven Branchen – Handel, Bürobetriebe und Gastgewerbe – bis zum Jahr 2050 ab.

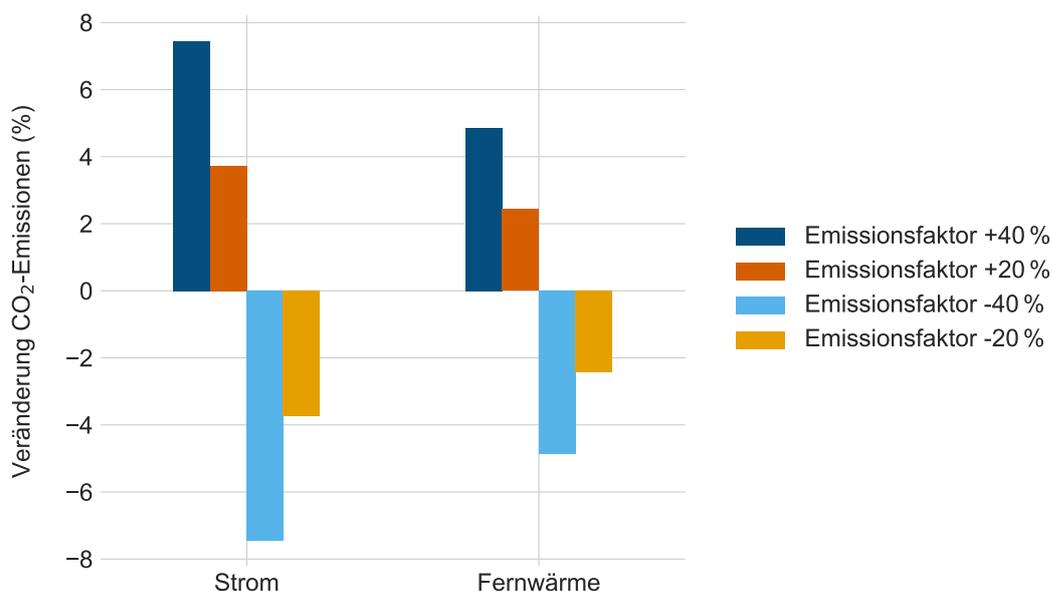


Abbildung 5.10: Vergleich der prozentualen Veränderung der indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energie-träger Strom und Fernwärme im Jahr 2050.

#### 5.4.1 Szenarienannahmen

Die GHD-Szenarien bauen grundsätzlich auf den Annahmen und Eingangsdaten des Referenzszenarios auf. Eine Anpassung erfolgt hingegen beim zukünftigen Nutzenergiebedarf der drei energieintensivsten Branchen Handel, Bürobetriebe und Gastgewerbe ab dem Jahr 2020.

#### 5.4.2 Nutzenergieprojektion

Die Entwicklung des zukünftigen Nutzenergiebedarfs wird für die Branchen Handel, Bürobetriebe und Gastgewerbe anhand der Veränderung der Bezugseinheiten (Erwerbstätige) bis zum Jahr 2050 berechnet. In diesen Szenarien wird ein lineares Wachstum oder ein linearer Rückgang der Erwerbstätigenzahlen um  $\pm 20\%$  im Zeitraum von 2016 bis 2050 angenommen. Der Nutzenergiebedarf dieser Branchen wird für die sieben Anwendungsbereiche anhand der Multiplikation der absoluten Beschäftigtenzahl mit dem spezifischen Bedarf pro Erwerbstätigem für die Modellstützjahre berechnet.

#### 5.4.3 Auswertung der Modellergebnisse

Die Auswirkungen der veränderten Beschäftigtenzahlen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten Sektors, bedingt durch die veränderte Endenergiezusammensetzung der drei Branchen, ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Die Abweichungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Referenzszenario steigen aufgrund der zunehmenden Abweichung des Nutzenergiebedarfs im Zeitraum zwischen 2020 und 2050 an. Der größte Unterschied bei den Erwerbstätigen liegt im Jahr 2050 mit  $\pm 20\%$  vor, was durch die Annahmen der Nutzenergieprojektion bedingt ist. Im Jahr 2050 ist auch die Abweichung der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen am größten.

Ein Anstieg der Beschäftigten im Bereich der Bürobetriebe um 20 % führt zu einem Anstieg der Emissionen um 4,1 % im Jahr 2050. Ein ähnlicher Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit 4,0 % wird durch die Veränderung der Beschäftigten des Gastgewerbes hervorgerufen. Den geringsten Einfluss mit 1,8 % hat die Branche Handel bei einem Anstieg der Beschäftigtenzahl um 20 % und um –2,1 % (–20 %). Sinken die Beschäftigtenzahlen der Branchen Bürobetriebe und Gastgewerbe um –20 %, führt dies zu einem Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sektor GHD von –3,8 % bzw. –3,5 %.

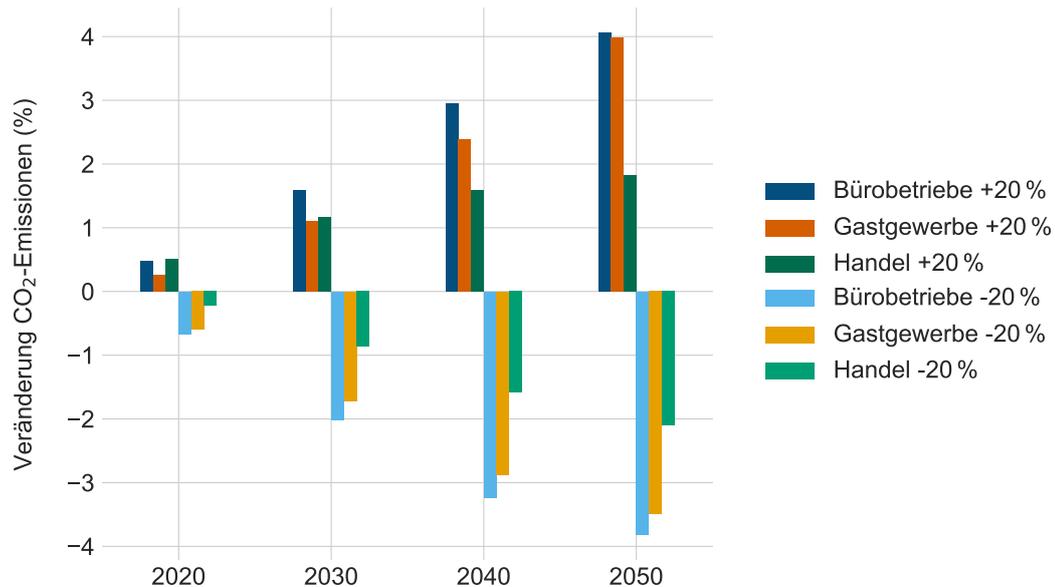


Abbildung 5.11: Entwicklung der prozentualen Veränderung der GHD-Szenarien im Vergleich zum Referenzszenario über den Betrachtungszeitraum.

Die Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger ist in Abbildung 5.12 ersichtlich. Steigende Beschäftigtenzahlen resultieren für alle GHD-Szenarien in einem Anstieg der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Mehrbedarf an Energie wird überwiegend durch Gas und Strom gedeckt. Der gleiche Effekt zeigt sich auch bei einem Rückgang der Erwerbstätigen, jedoch mit umgedrehten Vorzeichen. Den größten Einfluss auf diesen Zusammenhang hat der energetisch bedeutendste Anwendungsbereich Wärme. Im Vergleich zum Referenzszenario führt ein steigender Wärmebedarf dazu, dass mehr Wärme durch den Gasheizkessel (BW) und die Luftwärmepumpe erzeugt wird. Umgekehrt sinkt die Erzeugung aus diesen Technologien bei einem rückläufigen Wärmebedarf.

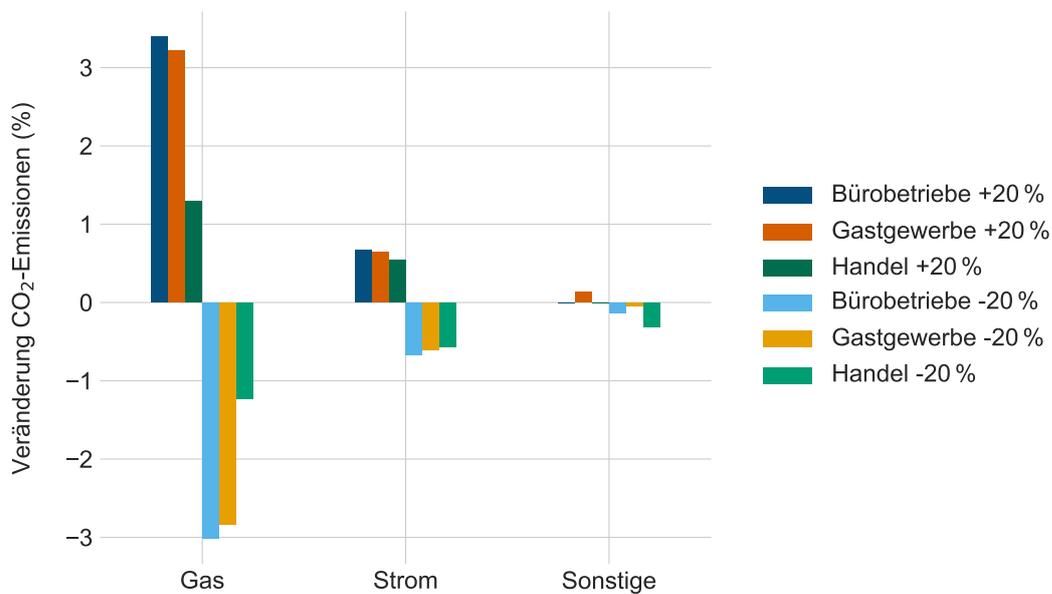


Abbildung 5.12: Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der GHD-Szenarien im Vergleich zum Referenzszenario nach Energieträger im Jahr 2050.

## 5.5 Diskussion der Ergebnisse

Kapitel 5 beginnt mit der Beschreibung des Referenzszenarios, das die kostenoptimale Entwicklung des zukünftigen Sektors GHD darstellt. Dieses Szenario bildet die Grundlage für die Untersuchungen der Dekarbonisierungsmaßnahmen auf den Transformationspfaden des Sektors GHD. Ferner werden die Auswirkungen für den Sektor für einen veränderten Wärme- und Klimakältebedarf, unterschiedliche Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme sowie strukturelle Entwicklungen der energieintensiven Branchen untersucht.

### CO<sub>2</sub>-Emissionen des Referenzszenarios

Das entwickelte Referenzszenario erreicht eine CO<sub>2</sub>-Einsparung der direkten und indirekten Emissionen um 82,8 % gegenüber 1990. Bei ausschließlicher Betrachtung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Verbrennung der Energieträger Gas, Heizöl, Diesel und Kohle entstehen, wird eine Reduktion von 71,1 % erreicht. Das Klimaziel der deutschen Bundesregierung, die Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990, wird im Referenzszenario im Jahr 2050 nicht erreicht. Das Ziel wird weder bei der Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach dem Verursacherprinzip noch nach dem Quellprinzip erreicht.

### Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit der Energierferenzprognose

Im Vergleich zum Referenzszenario (71,1 %) erreicht das Trendszenario der Energierferenzprognose eine Reduktion von 86,1 % der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese hohe Abweichung erklärt sich zum einen anhand der unterschiedlichen Bilanzierung der Kraft-Wärme-Kopplung (vgl. BHKW-Bilanzierung in Unterkapitel 4.6). Dies führt dazu, dass in *MESSAGEix-GHD* der Anteil am Energieträger Gas höher und der Strombedarf niedriger ist.

Ferner unterscheiden sich die Szenarien in der Bewertung der Bedeutung der Solarthermie für den Sektor GHD. Im Trendszenario der Energiereferenzprognose liegt die solarthermische Nutzung bei 27,5 TWh im Jahr 2050, im Referenzszenario hingegen lediglich bei 0,9 TWh. Im Jahr 2018 erzeugten die installierten Solarthermieanlagen Deutschlands über alle Sektoren rund 8 TWh an Wärme [114]. Das Trendszenario weist für den Sektor GHD eine Wärmeerzeugung aus Solarthermie von 10,0 TWh für das Jahr 2020 auf. Diese Abweichungen verdeutlichen die Überbewertung der Wachstumsprognose der Solarthermie im Trendszenario und erklären die unterschiedlichen Ergebnisse.

### CO<sub>2</sub>-Reduktion und das 95 %-Ziel

Ein Überblick der erreichten CO<sub>2</sub>-Reduktion der analysierten Szenarien ist in Abbildung 5.13 für das Jahr 2050 dargestellt. Die Ergebnisse der Szenarien weisen eine Reduktion von 84,9 % bis 80,6 % für den Sektor GHD auf. Bei ausschließlicher Betrachtung der  $\pm 20\%$ -Szenarien sowie der Klimaszenarien liegen die Ergebnisse im Bereich zwischen 81,7 % und 83,8 %. Dies zeigt, dass für die Erreichung des 95 %-Reduktionsziels im Sektor GHD enorme Anstrengungen für eine klimaneutrale Energieversorgung unternommen werden müssen. Ein möglicher Transformationspfad, der dieses Ziel im Jahr 2050 erreichen könnte, bedarf zum einen einer sehr effizienten Bereitstellung der Nutzenergiebedarfe und zum anderen einer signifikanten Elektrifizierung des Wärmebereichs und der fossil bereitgestellten mechanischen Energie sowie deutlich sinkender Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme im Vergleich zum Referenzszenario.

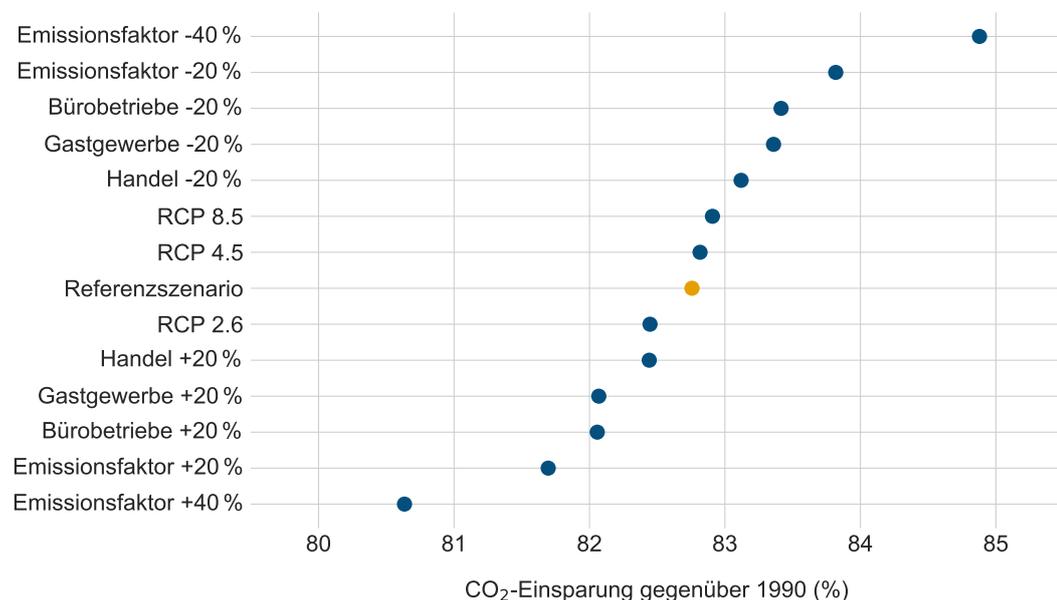


Abbildung 5.13: Vergleich der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Einsparung der untersuchten Transformationspfade im Jahr 2050.

### Kumulierte CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die kumulierten direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Referenzszenarios liegen bei 2,4 Gt CO<sub>2</sub> im Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050. Die Veränderung der kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen der untersuchten Szenarien im Vergleich zum Referenzszenario sind im rechten Diagramm der Abbildung 5.14 ersichtlich. Auf der linken Seite ist die relative Änderung der CO<sub>2</sub>-Reduktion gegenüber 1990 im Jahr 2050, bezogen auf das Referenzszenario, aufgetragen. Die prozentuale CO<sub>2</sub>-Einsparung gegenüber 1990 liegt im Jahr 2050 für die betrachteten Szenarien im Bereich zwischen 84,9 % und 80,6 %. Die Abweichung zum Referenzszenario beträgt  $\pm 2,6$  %. Die Einsparung der kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen weist jedoch eine breitere Streuung mit  $-6,1$  % und  $5,1$  % um das Referenzszenario auf. Dieser Zusammenhang der unterschiedlichen Streuungsbreite der Reduktion und der kumulierten Emissionen belegt, dass die zeitliche Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen entlang des Transformationspfads hin zu einer klimafreundlichen Bereitstellung der Nutzenergie von großer Bedeutung ist. Dies auch vor dem Hintergrund, dass für die unterschiedlichen Pfade sehr ähnliche CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele im Jahr 2050 erreicht werden.

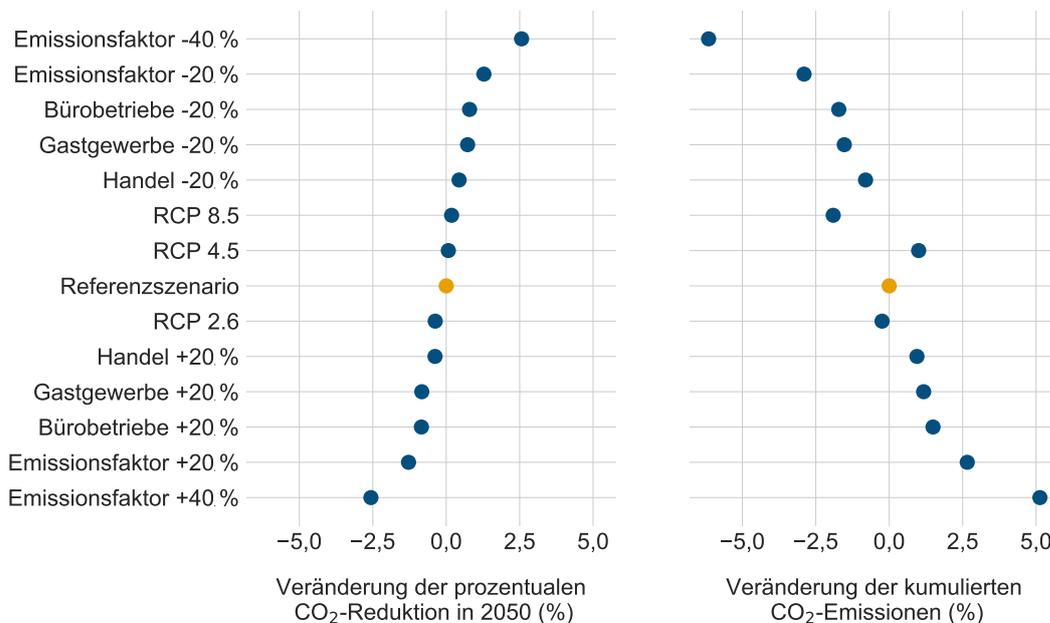


Abbildung 5.14: Vergleich der kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Reduktion. (links) Darstellung der prozentualen Veränderung der CO<sub>2</sub>-Reduktion gegenüber 1990 im Jahr 2050 bezogen auf das Referenzszenario. (rechts) Veränderung der kumulierten direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen des GHD-Sektors im Zeitraum zwischen 2015 und 2050 im Vergleich zum Referenzszenario.



## Kapitel 6

# Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse

Die Sensitivitäts- und die Unsicherheitsanalyse liefern Verfahren zur Charakterisierung der Auswirkungen der Unsicherheit von Parametern auf den Ausgang eines Modells. Oftmals werden die beiden Analysen gemeinsam durchgeführt, doch unterscheiden sie sich hinsichtlich des Zwecks der Untersuchung sowie der Eingangs- und Ausgangsparameter und verfolgen zudem unterschiedliche Ziele [115, 116]. Das Ziel der Quantifizierung von Unsicherheit besteht darin, die Verteilung und den Erwartungswert des Modellausgangs mit statistischen Metriken zu beschreiben [116]. Die Sensitivitätsanalyse hingegen hat das Ziel der Identifikation von Eingangsparametern mit einem relevanten Einfluss auf den Ausgang des Modells [117]. Diese Untersuchungen dienen ferner zur Einordnung der möglichen zukünftigen Entwicklungen des GHD-Sektors, die in der Szenarioanalyse in Kapitel 5 dargestellt sind.

Dieses Kapitel beginnt mit einer grundlegenden allgemeinen Einführung in die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse, gefolgt von der Umsetzung im Modell *MESSAGEix-GHD*. Abschließend werden die Ergebnisse der Analysen für das entwickelte Referenzszenario dargestellt.

### 6.1 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse quantifiziert die Unsicherheit und den Einfluss der Eingangsparameter auf die Modellausgabe für jeden mit Unsicherheit behafteten Eingangsparameter und sortiert diese Parameter gemäß ihrer Relevanz [118, 119]. Die Methoden der Sensitivitätsanalyse lassen sich in lokale und globale Ansätze unterteilen. Lokale Methoden untersuchen, wie sich die Modellausgabe bei kleinen Änderungen (Änderung von nur einem Eingangswert) um einen Festpunkt im Parameterraum ändert. Globale Methoden hingegen berücksichtigen die gleichzeitige Änderung der Parameter im möglichen Wertebereich. [116]

Die globale Sensitivitätsanalyse liefert ein wesentlich robusteres Maß für den Einfluss von Eingangsparametern auf den gesamten Modelleingangsbereich. Eine Vielzahl von Modelldurchläufen ist erforderlich, um den Eingabemodellraum vollständig zu untersuchen. Die hohe Anzahl an Durchläufen kann dazu führen, dass die Methode für ein spezifisches Modell aufgrund der sehr langen Rechenzeiten nicht sinnvoll anwendbar ist. Ein weiteres Risiko besteht

bei Eingangsparametern mit stetigen Verteilungen. In diesem Fall kann nicht der gesamte Eingangsraum vollständig quantifiziert werden, was dazu führt, dass mögliche Wechselwirkungen oder Effekte von Parametern bei der Analyse nicht berücksichtigt werden können. Mit statistischen Techniken kann bei ausreichender Abdeckung des Eingangsbereichs eine Schätzung des Parametereinflusses auf die Modellausgaben durchgeführt werden. Häufig wird hierbei die Bootstrapping-Technik angewendet. Diese schafft die Möglichkeit, die Konfidenzintervalle abzuschätzen und abzuleiten, ob die Eingangsprobe von ausreichender Güte ist, um eine robuste Bewertung der Eingangsparameter durchzuführen. [115]

Die globalen Methoden der Sensitivitätsanalyse können nach [118] zum einen eingesetzt werden, um Parameter mit geringem Einfluss auf den Ausgang auf einen Wert zu fixieren, und zum anderen, um Parameter von hohem Einfluss zu priorisieren. Parameter mit einer hohen Priorität haben einen großen Einfluss auf das Modellergebnis. [115]

Eine Zusammenfassung der relevanten Eigenschaften der Methoden – One-at-a-Time (OAT), Morris und Sobol – findet sich in Tabelle 6.1. Die varianzbasierte Sensitivitätsanalyse nach Sobol [120] ist aufgrund der Vielzahl an Durchläufen des Modells nicht zur Anwendung für *MESSAGEix-GHD* geeignet. Damit das Verfahren ordnungsgemäß funktioniert, sind für  $k$  Eingangsparameter  $N(k + 2)$  Optimierungsläufe notwendig, wobei sich der Wert von  $N$  bei der Anwendung von Sequenzen mit Quasi-Zufallszahlen auf rund 500 reduzieren lässt. Der Rechenaufwand für 156 Eingangsparameter liegt bei 79.000 Durchläufen. Im Detail ist das Verfahren in [118] beschrieben. Nachfolgend werden die Methoden OAT und Morris im Detail vorgestellt.

Tabelle 6.1: Charakterisierung ausgewählter Methoden zur Sensitivitätsanalyse. Eigene Darstellung in Anlehnung an [115, 118, 121].

Methode	OAT*	Morris	Sobol
Ansatz	lokal	global	global
abhängig vom Modell	nein	nein	nein
Parameter Sampling	Level	Level	Verteilungen
Multi-Parameter Variation	nein	ja	ja
Performance für $k$ -Parameter	$2(k + 1)$	$r(k + 1)$ †	$N(k + 2)$ ‡

\* OAT: Abkürzung für One-at-a-Time.

† Anzahl der  $r$  Trajektorien;  $r$  liegt bei 10, 20, oder 30 Stichproben.

‡ Anzahl der  $N$  Grundstichproben;  $N$  liegt bei einigen hundert bis einigen tausend Stichproben.

### 6.1.1 One-at-a-Time-Methode

Die lokale Methode One-at-a-Time (OAT) zählt zu den am weitesten verbreiteten Methoden der Sensitivitätsanalyse. Bei diesem Verfahren wird immer nur ein Eingangswert verändert, während die restlichen Parameter unverändert bleiben. Die Sensitivität der Eingangsparameter bezogen auf den Modellausgang wird durch die sequenzielle Änderung (z. B. partielle Ableitung) der einzelnen Parameter ermittelt. [118, 122]

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass der Rechenaufwand für  $k$  Parameter mit  $2(k + 1)$  sehr gering ist und dass Modellierer diese Methode zur Identifikation von Modellfehlern nutzen können. Fehlerhafte Modellergebnisse sind einfach auf einen spezifischen Eingangsparameter

ter rückführbar. Nachteile der OAT-Methode sind zum einen, dass bei Modellen mit hoher Parameterzahl  $k$  und wenigen sensitiven Parametern bei jedem Modelldurchlauf nur geringe neue Informationen gewonnen werden. Zum anderen wird immer nur ein Parameter geändert, wodurch mögliche Wechselwirkungen zwischen den Parametern nicht identifiziert werden. [118, 122]

### 6.1.2 Morris-Methode

Die Screening-Methode nach Morris [123] beruht auf der Grundlage des elementaren Effekts  $EE$ . Dieses Verfahren stellt eine einfache aber effektive Methode dar, um relevante Eingangsparameter mit einem hohen Einfluss auf den Ausgang zu identifizieren. Ziel des Verfahrens ist es, ein Sensitivitätsmaß mittels zweier Indikatoren bereitzustellen. Diese Metriken dienen zur Einordnung des Einflusses der Eingangsparameter auf den Ausgang nach: (a) vernachlässigbar, (b) linear und additiv oder (c) nicht linear oder basierend auf Wechselwirkungen mit anderen Parametern. Die Erweiterung von Campolongo [124] führt ein weiteres Maß ein, um Typ-II-Fehler (Nicht-Identifizierung eines relevanten Parameters, der das Modellergebnis beeinflusst) zu vermeiden.

Der elementare Effekt ist für ein Modell  $Y$  mit  $k$  unabhängigen Eingängen  $X_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) basierend auf der OAT-Methode wie folgt definiert:

$$EE_i = \frac{Y(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i + \Delta, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_k)}{\Delta}. \quad (6.1)$$

Die Eingangsparameter  $X_i$  variieren im  $k$ -dimensionalen Einheitswürfel entlang der  $p$  ausgewählten Levels, die einem  $p$ -stufigen diskreten Raster  $\Omega$  des Eingabebereichs entsprechen. Der Wert von  $\Delta$  liegt im Bereich von  $\{1/(p-1), \dots, 1 - 1/(p-1)\}$  und berechnet sich aus  $p/(2(p-1))$ , wobei  $p$  einer geraden Zahl entspricht, um den Raum symmetrisch zu diskretisieren. Die endliche Verteilung  $F_i$  berechnet sich aus der Anzahl der elementaren Effekte der Eingangsparameter  $X$  nach  $p^{k-1} [p - \Delta(p-1)]$ . Abbildung 6.1 zeigt ein Beispiel des vierstufigen Gitters ( $p = 4$ ) im zweidimensionalen Eingangsraum ( $k = 2$ ) zur Berechnung der notwendigen acht elementaren Effekte des Parameters  $X_1$  zur Bestimmung von  $F_1$ . [118]

Morris zeigt in [123] ein effizientes Samplingverfahren zur Bestimmung der Verteilung  $F$  anhand von  $r(k+1)$  elementare Effekte der Eingangsparameter  $X$ . Die Grundlage des Verfahrens besteht aus einer zufälligen Stichprobe unterschiedlicher  $X_i$  aus dem diskreten Raster  $\Omega$ . Die Anzahl der zufälligen Stichproben mit der Veränderung  $\Delta$  für einen Parameter wird als Trajektorien  $r$  bezeichnet. Campolongo [124] beschreibt die Möglichkeit, die Auswahl der Trajektorien zur Steigerung der Ergebnisse zu optimieren, indem der Eingangsraum besser abgedeckt wird. Die mathematischen Grundlagen des Verfahrens nach Morris und der Erweiterung von Campolongo sind im Detail in [118] beschrieben.

Die Sensitivitätsmaße nach Morris entsprechen den Schätzungen des Mittelwerts  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  der Verteilung  $F_i$ , erweitert um die Schätzung der Verteilung  $G_i$  des von Campolongo definierten Mittelwerts  $\mu^*$  der absoluten elementaren Effekte:

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_i^j \quad (6.2)$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j| \quad (6.3)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (EE_i^j - \mu_i)^2}. \quad (6.4)$$

Die Mittelwerte  $\mu$  und  $\mu^*$  ermöglichen eine Bewertung des Gesamteinflusses eines Parameters auf den Modellausgang. Die Standardabweichung  $\sigma$  beschreibt die Auswirkungen der Parameter auf den Ausgang. Besitzt ein Parameter  $X_i$  eine große Standardabweichung, bedeutet dies, dass der elementare Effekt stark von anderen Parametern beeinflusst wird und somit eine Abhängigkeit besteht oder ein nicht lineares Verhalten vorliegt. Ein niedriger Wert weist im Gegensatz auf einen gleichmäßigen Einfluss des Parameters hin, was darauf schließen lässt, dass der Einfluss des Parameters unabhängig von den anderen ist. [118]

Ferner besteht bei der Morris-Methode die Möglichkeit, Parameter zu Gruppen zusammenzufassen, um die notwendigen Modelldurchläufe zu reduzieren. Wird die Sensitivitätsanalyse mit gruppierten Eingangsparametern durchgeführt, ist es nicht möglich, die Standardabweichung der einzelnen Parameter zu berechnen und somit eine Aussage über das Verhalten (z. B. linear oder additiv) der gruppierten Parameter zu treffen. Eine ausführliche Beschreibung der Gruppenbildung der Eingangsparameter nach Morris und der zugrunde liegenden Theorie der elementaren Effekte erfolgt in [118].

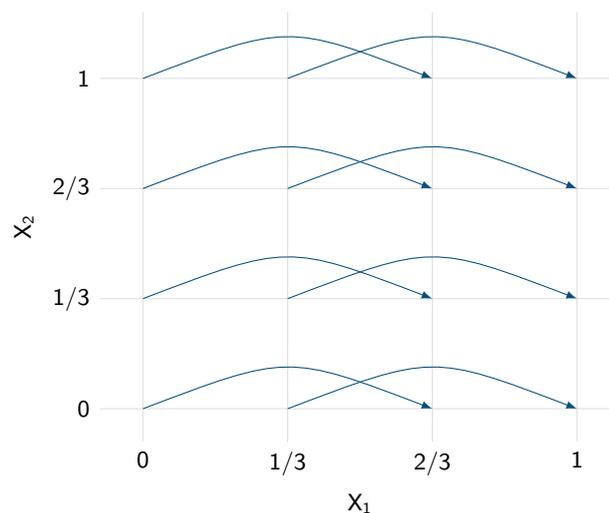


Abbildung 6.1: Darstellung des vierstufigen Gitters ( $p = 4$ ) im zweidimensionalen Eingangsraum ( $k = 2$ ) für ein gewähltes  $\Delta$  von  $2/3$ . Die Pfeile repräsentieren die acht Punkte im diskreten Raster, die notwendig sind, um den elementaren Effekt für den Parameter  $X_1$  zu bestimmen [118]. Eigene Darstellung in Anlehnung an [118].

## 6.2 Unsicherheitsanalyse

Die Unsicherheitsanalyse verfolgt das Ziel der Charakterisierung der Auswirkungen der Unsicherheit von Parametern auf den Ausgang eines Modells. Gegeben sei ein Modell  $U$ , das vom Raum  $x$  und der Zeit  $t$  abhängt sowie  $d$  unsichere Eingangsparameter  $Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_d]$  hat. Der Ausgang  $Y$  des Modells hängt wie folgt zusammen:

$$Y = U(x, t, Q). \quad (6.5)$$

Der Ausgang  $Y$  kann einen beliebigen Wert innerhalb des Ausgangsraums  $\Omega_Y$  annehmen und hat eine unbekannte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $\rho_Y$ . Das Ziel der Quantifizierung von Unsicherheit liegt darin, das unbekannte  $\rho_Y$  durch statistische Metriken zu beschreiben. [116]

Im Bereich der Modellierung können die Quellen der Unsicherheit in zwei grundlegende Typen eingeteilt werden: aleatorische oder epistemische Unsicherheit. Die aleatorische Unsicherheit tritt infolge von intrinsischen Zufälligkeiten eines Phänomens auf. Für den Modellierer besteht hier keine Möglichkeit, die Quelle der Unsicherheit zu reduzieren. Beruht die Unsicherheit auf unvollkommenem Wissen bei der Modellierung oder der nicht ausreichenden Datengrundlage, wird von epistemischer Unsicherheit gesprochen. Diese Quelle kann durch das Sammeln von weiteren Daten mit einer höheren Qualität oder durch Anpassungen der mathematischen Modellierung der Realität reduziert werden. [6, 125]

Während es für Unsicherheit mit epistemischer Quelle, abgesehen von der Verwendung von besseren Daten oder Modellen, keine Möglichkeit gibt, diese zu adressieren, existieren für die aleatorische Unsicherheit formale Methoden, um diese Unsicherheit zu quantifizieren. Diese Verfahren können in deterministische und stochastische Methoden unterschieden werden. Die stochastische Programmierung oder stochastische Optimierung beschreibt einen Ansatz der mathematischen Modellierung, der die optimale Lösung eines Modells unter unsicheren Eingangsdaten liefert. Die Unsicherheitsanalyse für deterministische Modelle wie *MESSAGEix-GHD* kann mittels des Monte-Carlo-Ansatzes durchgeführt werden. [6]

Einen ausführlichen Überblick zum Thema Monte-Carlo-Simulationen liefert [126]. Die zugrunde liegende Idee des Monte-Carlo-Ansatzes basiert auf der Durchführung einer Vielzahl von gleichartigen Zufallsexperimenten. In jedem Experiment (Durchlauf) werden die Eingangsparameter zufällig aus der gemeinsamen multivariaten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der betrachteten Parameter gezogen und nach dem Durchlauf des Modells ausgewertet. Dieser Prozess des zufälligen Ziehens der Eingangsparameter und des Lösens des Optimierungsmodells wird  $N$  mal wiederholt. Für die Modellergebnisse werden abschließend die statistischen Metriken des Erwartungswerts und der Varianz berechnet. Die Quasi-Monte-Carlo-Methode ist insofern eine Verbesserung der Monte-Carlo-Methode, als für das zufällige Ziehen Techniken der Varianzreduktion eingesetzt werden, um die Anzahl der erforderlichen Modellauswertungen für die statistische Auswertung zu reduzieren. [116]

Der Erwartungswert der Verteilung der Modellergebnisse, bedingt durch die Unsicherheit in den Eingangswerten, berechnet sich nach [116] für den Quasi-Monte-Carlo-Ansatz wie folgt:

$$E[Y] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i, \quad (6.6)$$

und die Varianz nach:

$$V[Y] \approx \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - E[Y])^2. \quad (6.7)$$

Der schematische Zusammenhang des deterministischen Modells *MESSAGEix-GHD* ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Hier wird ersichtlich, wie das Modellergebnis für festgelegte Eingangsparameter berechnet wird. Für den Monte-Carlo-Ansatz, der in Abbildung 6.3 dargestellt ist, wird jedem Eingangsparameter eine Wahrscheinlichkeitsfunktion zugewiesen. Durch die mehrfache Anwendung  $N$  des deterministischen Modells unter der zufälligen Variation der Eingangsdaten werden die Auswirkungen der unsicheren Eingangsparameter auf den Ausgang in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt. [6, 116]

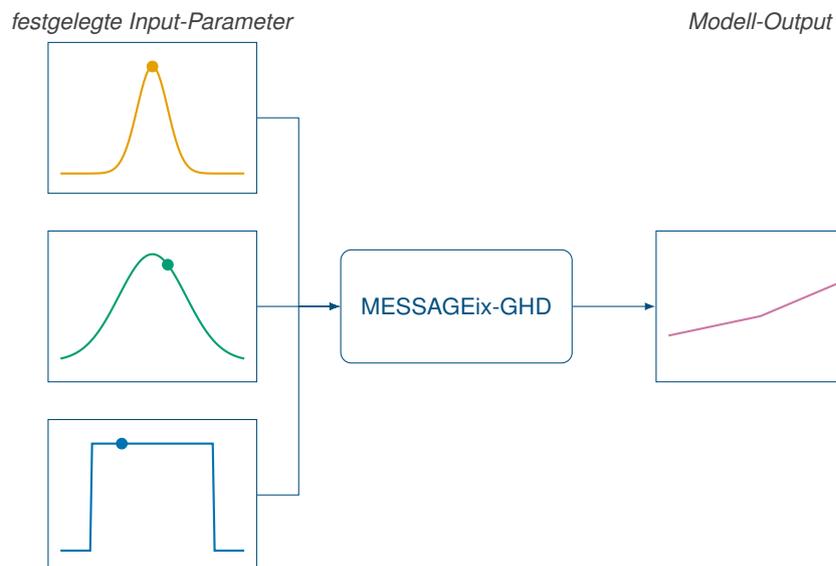


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung eines deterministischen Modellierungsansatzes. Jedem Input-Parameter wird ein fixer Wert zugewiesen. Das Modell liefert einen eindeutigen Wert als Output. Eigene Darstellung in Anlehnung an [116].

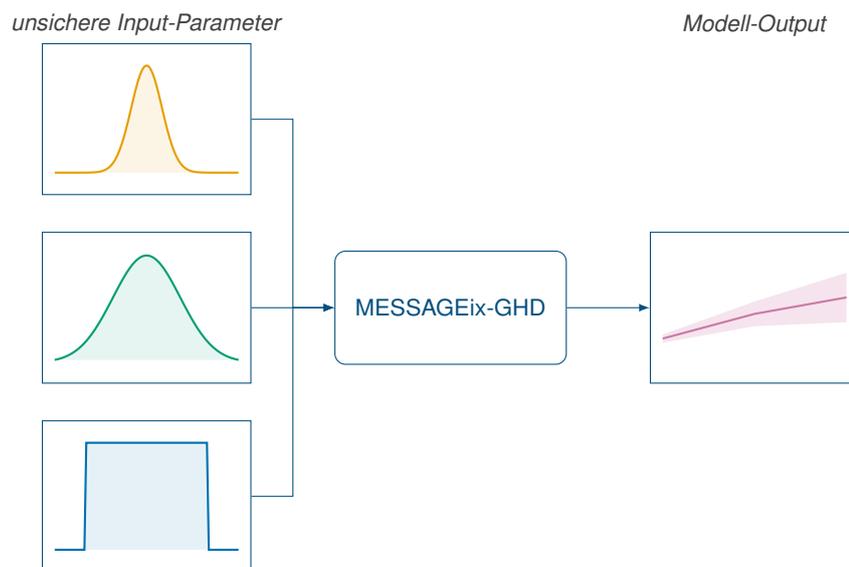


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung eines stochastischen Modellierungsansatzes. Für jeden Input-Parameter des Modells wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Werte hinterlegt. Das Modell liefert den Erwartungswert des Outputs sowie das dazugehörige Konfidenzintervall. Eigene Darstellung in Anlehnung an [116].

## 6.3 Integration in MESSAGEix-GHD

Die Modellierung von komplexen Energiesystemen mit *MESSAGEix* erfordert eine Vielzahl an Eingangsparametern. Viele dieser Parameter sind mit einer inhärenten Unsicherheit versehen und können sich über die Zeit verändern [116]. Mittels der integrierten Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse kann der Einfluss der Unsicherheit der Parameter auf den Modellausgang quantifiziert werden. Nachfolgend werden die ausgewählten Modellergebnisse und die in *MESSAGEix-GHD* implementierten Methoden der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse vorgestellt.

### 6.3.1 Modell-Outputs

Die Zielfunktion des linearen Optimierungsmodells *MESSAGEix-GHD* ist die Minimierung der Gesamtkosten der Energiebereitstellung unter Berücksichtigung der Deckung des Bedarfs im Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050. Die Gesamtenergiesystemkosten stellen daher das offensichtlichste Modellergebnis für die Sensitivitätsanalyse dar. Eingangsparameter mit einer hohen Sensitivität haben einen großen Einfluss auf die Zielfunktion und rufen bei Änderung des Werts mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eine Veränderung des Modellergebnisses hervor. [115]

Die Auswertung der Kosten basiert auf der *MESSAGEix*-Variable *COST\_NODAL* mit der Einheit Mrd. €. Für die Betrachtung des Transformationspfades des GHD-Sektors ist die Analyse der Dekarbonisierungsmaßnahmen des Sektors ein essenzieller Bestandteil dieser Arbeit. Die Variable *EMISS* spiegelt im Modell die vom Sektor verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Mt CO<sub>2</sub> wider. Die Möglichkeiten der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind im Sektor GHD vielfältig.

Grundsätzlich können diese durch die Steigerung der Effizienz z. B. von Prozessen oder durch die Substitution von Brennstoffen hin zu klimafreundlicheren Brennstoffen reduziert werden. Dafür wird aus der Variable *ACT* der Endenergiebedarf in TWh des Sektors berechnet, der als Indikator der Effizienz dient. Die Substitution wird für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse in Form der Elektrifizierung des Sektors (%) untersucht.

### 6.3.2 Sensitivitätsanalyse mittels der Morris-Methode

Für das lineare Optimierungsmodell *MESSAGEix-GHD* wird die globale Methode nach Morris mittels des Python-Pakets SALib [93] für die Sensitivitätsanalyse implementiert. Diese Methode wurde auch in [115] eingesetzt, um das Energiesystem von Großbritannien mithilfe der Energy System Modelling Environment (ESME) des Energy Technologies Institutes (ETI) zu untersuchen. Die Morris-Methode erlaubt es, eine Vielzahl von Eingangsparametern mit einem vertretbaren Rechenaufwand zu untersuchen. Für das Modell des deutschen GHD-Sektors werden 156 Parameter im Rahmen der Sensitivitätsanalyse auf ihren Einfluss auf die Modellausgänge untersucht (vgl. Unterkapitel 6.3.1). Die ausgewählten Eingangsparameter von *MESSAGEix-GHD* sind im Anhang C aufgelistet.

Die Eingangsgrößen umfassen die für *MESSAGEix* relevanten Parameter zur Beschreibung von Technologien im Modell. Zum einen beinhalten sie die Investitionskosten, die fixen und variablen Kosten sowie die Wirkungsgrade. Zum anderen umfassen sie die Restriktionen der Technologien. Die Technologieeinschränkungen beschreiben die mögliche Geschwindigkeit des Wachstums und Rückbaus einer Technologie bezogen auf die Leistung oder erzeugte Energie.

Die Eingangsparameter des Nutzenergiebedarfs und der Zinssatz werden wie in [115] als exogene Parameter vorgegeben und für die Sensitivitätsanalyse nicht mitbetrachtet. Des Weiteren werden die Parameter der Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme aus der Analyse ausgeschlossen. Der Grund für dieses Vorgehen ist, dass z. B. der Zinssatz oder der Nutzenergiebedarf einen sehr großen Einfluss auf die Zielfunktion haben und diese Parameter nur bedingt mit den betrachteten Parametern vergleichbar sind.

#### Parametrisierung

Ein Ziel der Sensitivitätsanalyse besteht darin, einen Einblick in das Verhalten des Modells zu gewinnen. Dieses Verhalten setzt sich zusammen aus der Parametrisierung der Eingangswerte und der mathematischen Formulierung des Optimierungsmodells. Im Rahmen der implementierten Sensitivitätsanalyse werden die Eingangsparameter als unabhängige Parameter betrachtet. Dies bedeutet, dass mögliche Korrelationen von Parametern nicht berücksichtigt werden. Die Annahme der Unabhängigkeit der Parameter ermöglicht die Offenlegung aller auftretenden Wechselwirkungseffekte, verursacht durch die Eingangsparameter in den Modellergebnissen. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Transparenz des Modells zu steigern und das daraus abgeleitete Verständnis zu verbessern. Das Risiko dieses Vorgehens, der Vernachlässigung der Korrelationen zwischen den Parametern, besteht darin, dass die Sensitivitätsanalyse einen einflussreichen Parameter aufgrund der gleichzeitigen (aber unbeobachteten) Veränderung der korrelierten Parameter fälschlicherweise als nicht relevant identifiziert. [115]

Die Morris-Methode zieht die Eingangsparameter aus einer Gleichverteilung, die mit einer unteren und oberen Grenze für jeden Parameter festgelegt sind. Diese Annahme kann unter Umständen zu einem Typ-I-Fehler führen. Aufgrund der Abweichung des Parameters von der Gleichverteilung wird der Parameter fälschlich als relevant eingestuft. Dieser Fehlertyp ist jedoch besser als ein Typ-II-Fehler, bei dem ein Parameter mit einem signifikanten Einfluss auf den Ausgang als nicht relevant klassifiziert wird. Die Gefahr eines Typ-II-Fehlers besteht, wenn die oberen und unteren Grenzen der Gleichverteilung wesentlich enger gesetzt werden als die der wahren Verteilung. Daher sollten die Grenzen so weit und so angemessen wie möglich für jeden Parameter gespreizt werden. [115]

Die gewählte Parametrisierung der Morris-Methode erfolgte anhand einer Voruntersuchung. In dieser wurden die Levels und Trajektorien variiert, mit dem Ziel eines möglichst geringen Konfidenzintervalls von  $\mu^*$  und einer Rechenzeit kleiner 24 Stunden. Auf Grundlage dieser vorgelagerten Untersuchung erfolgt die globale Sensitivitätsanalyse für das Modell MESSAGEix-GHD mit acht Levels ( $p = 8$ ) und 30 Trajektorien ( $r = 30$ ). Grundsätzlich gilt: Je höher die Werte für  $p$  und  $r$  gewählt werden, desto besser wird eine Gleichverteilung für die einzelnen Parameter approximiert. Dies führt zu genaueren Ergebnissen und einer geringeren Abweichung des Mittelwerts  $\mu^*$ . Die Abweichung wird mittels des 95%-Konfidenzintervalls ausgedrückt und anhand des statistischen Verfahrens Bootstrapping berechnet. Der Nachteil der höheren Anzahl an Trajektorien ist der damit verbundene notwendige Anstieg des Rechenaufwands aufgrund von  $r(k + 1)$ . [115]

#### **Handhabung der zeitlichen Veränderung der Parameter**

Das Modell MESSAGEix-GHD optimiert den Energieeinsatz im Zeitraum von 2015 bis 2050. Für die Sensitivitätsanalyse werden wie in [115] die Modellergebnisse nur für das Jahr 2050 untersucht. Die 156 gleich verteilten Eingangsparameter sind für das Jahr 2050 mit einer unteren und oberen Grenze definiert. Die Morris-Methode zieht aus den Verteilungen zufällig  $r$  Trajektorien. Der Wert für die zu untersuchenden Parameter wird im Anschluss für die Jahre zwischen 2020 und 2050 linear interpoliert. Der zeitliche Einfluss der Eingangsparameter auf den Ausgang kann mit diesem Ansatz nicht im Detail untersucht werden. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass sich der Einfluss eines Parameters in den anderen Stützjahren ähnlich verhält. [115]

Eine Möglichkeit, dies zu untersuchen, besteht darin, die sieben Stützjahre ab 2020 in die Sensitivitätsanalyse mitaufzunehmen. Dies resultiert jedoch in einem enormen Anstieg des Rechenaufwands mit 32.970 Modelldurchläufen. Ein weiterer Nachteil dieses Vorgehens ist eine nicht realistische sprunghafte Entwicklung des Parameterwertes entlang des Betrachtungszeitraums. Dieser Effekt wird durch das zufällige Ziehen des Wertes eines Parameters in jedem Stützjahr verursacht. [115]

#### **Handhabung von nicht lösbaren Modelldurchläufen**

Es ist durchaus möglich, dass eine bestimmte Kombination der Eingangsparameter zu nicht lösbaren Modelldurchläufen führen kann. Dies kann beispielsweise durch Konflikte von Restriktionen des linearen Optimierungsmodells hervorgerufen werden. Diese Durchläufe müssen vor der Morris-Analyse, der Berechnung der elementaren Effekte, identifiziert und bearbeitet

werden. Die fehlenden Modellergebnisse für diese Durchläufe werden in der Datenbank mit den Mittelwerten der Stichprobe ersetzt. Daraus folgt, dass diese Modelldurchläufe bei der Berechnung des elementaren Effekts praktisch übersprungen werden. [115]

### 6.3.3 Unsicherheitsanalyse mittels des Quasi-Monte-Carlo-Ansatzes

Die Fehlerkonvergenz der Monte-Carlo-Simulation liegt bei  $1/\sqrt{N}$  für  $N$ -Stichproben. Durch das Verwenden des Quasi-Monte-Carlo-Ansatzes kann dieser Wert auf annähernd  $1/N$  gesteigert werden, wodurch sich notwendigen Modelldurchläufe mit dem verbundenen Rechenaufwand reduzieren lassen. Für das Modell *MESSAGEix-GHD* wird daher der Quasi-Monte-Carlo-Ansatz mittels des Python-Pakets Chaospy [94] implementiert. Die Eingangsparameter werden mithilfe des Halton-Sampling-Verfahrens für die  $N$ -Durchläufe erzeugt. Die Halton-Sequenzen, die erstmals im Jahr 1960 eingesetzt wurden, werden in der Statistik für numerische Methoden verwendet, um Punkte im Raum zu erzeugen. Diese Sequenzen erscheinen als zufällig, obwohl sie deterministisch sind. Die anhand dieser Methode erzeugten Stichproben besitzen eine geringe Diskrepanz, was bedeutet, dass der Raum ohne Cluster und ohne Lücken abgebildet wird. [127]

Die prozentuale Unsicherheit  $UQ$  der Quasi-Monte-Carlo-Simulation wird für die Modellergebnisse  $x$  anhand des 95 %-Konfidenzintervalls nach:

$$UQ(x) = \frac{\frac{1}{2} \cdot \widehat{CI}}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (6.8)$$

berechnet. Die Konfidenzintervallbreite  $\widehat{CI}$  wird mittels Bootstrapping für den Modellausgang generiert. Das Konfidenzintervall des Medians  $\bar{x}$  und die resultierende Breite berechnen sich aus den Ergebnissen der Quasi-Monte-Carlo-Simulation aus einer Stichprobe von 100.000 zufällig gezogenen Ergebnissen des Modellausgangs (Ziehen mit Zurücklegen). [128]

Die Unsicherheitsanalyse wird auf Basis von 7.500 Modelldurchläufen durchgeführt. Die Zahl 7.500 wurde experimentell anhand der Variation der Durchläufe für den in *MESSAGEix-GHD* integrierten Quasi-Monte-Carlo-Ansatz ermittelt. Ziel des Experiments war es, die Anzahl der Durchläufe für eine Genauigkeit der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Form der prozentualen Unsicherheit  $UQ$  kleiner 1,5 % zu bestimmen.

### Parametrisierung

Die Verteilungen der 158 Eingangsparameter des Modells *MESSAGEix-GHD* werden auf Grundlage der zu erwartenden Kostensenkungen und Steigerungen der Effizienz der Technologien für das Modelljahr 2050 definiert. Für die Investitionskosten sowie die fixen und variablen Kosten der Technologien und Energieträger wird nach [129] die logarithmische Normalverteilung verwendet. Diese Verteilung wird auch für die Emissionsfaktoren von Strom und Fernwärme angewendet. Die Parametrisierung der logarithmischen Normalverteilung erfolgt wie in [129] mithilfe von drei Unsicherheitsniveaus. Die Kategorien unterscheiden sich in geringe Unsicherheit ( $\sigma_{low} = 0,15$ ), mittlere Unsicherheit ( $\sigma_{med} = 0,3$ ) und hohe Unsicherheit ( $\sigma_{high} = 0,6$ ). Ein geringes Unsicherheitsniveau wurde für die etablierten Technologien (z. B. Gaskessel), die Bereitstellung der Wärme und die Beleuchtung angenommen. Ein mittleres

Niveau wurde für die Technologie zur Erzeugung von Kälte und für die erneuerbaren Technologien der Wärmebereitstellung inklusive den BHKW hinterlegt. Für die Energiekosten, Emissionsfaktoren sowie Kosten der Wärmepumpe und der LED-Technologie wurde ein hohes Level an Unsicherheit gewählt. Die vollständige Liste der betrachteten Parameter ist im Anhang C einsehbar.

Für die verbleibenden Eingangsparameter wird nach dem Laplace-Kriterium die Gleichverteilung mit einer unteren und oberen Grenze gewählt. Dieses Kriterium beschreibt die Annahme, dass bei nicht ausreichendem Wissen über die Art der Verteilung die Gleichverteilung (alle Werte sind gleich wahrscheinlich) das beste Ergebnis verspricht. [115]

Die Implementation der Quasi-Monte-Carlo-Simulation in *MESSAGEix-GHD* geht davon aus, dass die Entwicklungen der Eingangsparameter unabhängig voneinander sind. Mit dieser Annahme der Vernachlässigung der Korrelation zwischen Parametern (z. B. zwischen den Investitionskosten eines Gasheizkessels und Gas-Brennwertkessels) wird die identifizierte Unsicherheit überschätzt [130].

#### **Handhabung der zeitlichen Veränderung der Parameter**

Die Eingangsparameter werden für die Quasi-Monte-Carlo-Simulation für das Stützjahr 2050 definiert (vgl. Parametrisierung). Die Werte zwischen den Stützjahren 2020 und 2050 werden exponentiell interpoliert. Die Interpolation erfolgt anhand der Formel:

$$y(x) = y_0 + A \cdot e^{-\lambda x}. \quad (6.9)$$

Der Parameter  $A$  beschreibt hierbei den Anfangswert und  $\lambda$  die Wachstumskonstante der Exponentialfunktion. Um den dritten Parameter der dargestellten Funktion bestimmen zu können, wird die Asymptote  $y_0$  um 1 % höher (niedriger) angenommen als der Wert im Jahr 2050. Dies hängt davon ab, ob der Wert im Jahr 2050 höher (niedriger) ist als der Wert im Jahr 2020. [129]

#### **Handhabung von nicht lösbaeren Modelldurchläufen**

Das Vorgehen für nicht lösbaere Modelldurchläufe entspricht dem Verfahren der Sensitivitätsanalyse dahingehend, dass für diese der Mittelwert als Lösung des Outputs verwendet wird. Die Methodik unterscheidet insofern, als die Unsicherheitsanalyse für die Modelljahre 2015 bis 2050 ausgewertet wird und daher der Mittelwert für die Stützjahre einzeln berechnet wird.

## **6.4 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse für das Referenzszenario des linearen Modells *MESSAGEix-GHD* beschrieben. Der Einfluss der Unsicherheit der Eingangsdaten wird für die vier ausgewählten Modellausgänge Kosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen, Endenergiebedarf und Elektrifizierungsgrad untersucht. Die Auswertung der Modellergebnisse erfolgt jeweils für das Jahr 2050. Die Sensitivität der Parameter wird anhand der globalen Morris-Methode analysiert. Für die Berechnung der elementaren Effekte wird die Morris-Methode

mit acht Levels ( $p = 8$ ) und 30 Trajektorien ( $r = 30$ ) parametrisiert. Daraus resultieren 4.710 Durchläufe für die 156 zu untersuchenden Eingangsparameter des Modells *MESSAGEix-GHD*.

### Interpretation der Ergebnisse

Das Ergebnis des Parameterscreenings der Morris-Methode wird nachfolgend für die gewählten Modellausgänge grafisch ausgewertet. Die Ausgabe der Analyse nach Morris wird in den Abbildungen anhand von zwei unterschiedlichen Diagrammen dargestellt (vgl. z. B. Abbildung 6.4). Der Mittelwert des absoluten elementaren Effekts  $\mu^*$  ist im oberen Diagramm der Abbildung in Form eines horizontalen Balkendiagramms dargestellt. Die schwarze horizontale Linie beschreibt das 95%-Konfidenzintervall von  $\mu^*$ . Der mithilfe von Bootstrapping berechnete Vertrauensbereich liefert einen Indikator für die Genauigkeit des ermittelten absoluten Mittelwerts des elementaren Effekts. Im unteren Diagramm ist der absolute Mittelwert  $\mu^*$  über die Standardabweichung  $\sigma$  aufgetragen. Dieser Zusammenhang wird als Variationskoeffizient *CV* bezeichnet. Der Koeffizient berechnet sich nach:

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i^*} \quad (6.10)$$

und beschreibt die Streuung eines Eingangsparameters  $X_j$ . Für die Unterstützung der grafischen Interpretation der Ergebnisse werden drei gerade Linien in das Streudiagramm eingezeichnet. Die Steigung der Geraden beträgt: 0,1; 0,5 und 1. Mithilfe dieser Gradienten wird das Diagramm in vier Bereiche eingeteilt. [115]

Die Auswahl dieser Gradienten erfolgt anhand der in den Veröffentlichungen [115, 131] beschriebenen Vorgehen zur Kategorisierung des Einflusses der Parameter. Ist der Wert des Variationskoeffizienten für einen Eingangsparameter größer eins ( $CV > 1$ ), bedeutet dies, dass sein Einfluss auf den Ausgang nicht linear ist, oder dass Wechselwirkungen mit anderen Parametern vorliegen. Der Wertebereich von  $0,5 < CV < 1$  weist auf einen fast monotonen und/oder additiven Parameter hin. Einen monotonen Effekt auf den Modellausgang haben Parameter, die im Bereich zwischen  $0,1 < CV < 0,5$  liegen. Der abschließende Wertebereich für den Variationskoeffizienten  $CV < 0,1$  identifiziert Parameter mit einem linearen Einfluss auf das Ergebnis. [115, 131]

Ferner ist im unteren Streudiagramm der Mittelwert des elementaren Effekts  $\mu$  in den Farben blau und gelb dargestellt. Die blauen Dreiecke weisen auf einen Wert größer gleich null hin. Wird der Wert dieser Parameter erhöht, steigt auch der Einfluss auf den Ausgang. Umgekehrt weisen die gelben Eingangsparameter auf einen sinkenden Einfluss bei Erhöhung der Werte dieser Parameter hin. Die Richtung des Einflusses eines Parameters, der anhand von  $\mu$  ausgedrückt wird, muss jedoch nicht dem gleichen Wert von  $\mu^*$  entsprechen.

### Kosten

Die zentrale mathematische Gleichung des linearen Optimierungsmodells *MESSAGEix-GHD* ist die Kostengleichung. Das Modell berechnet für die gewählte Parametrisierung die optimale Lösung in Form einer Minimierung der Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum.

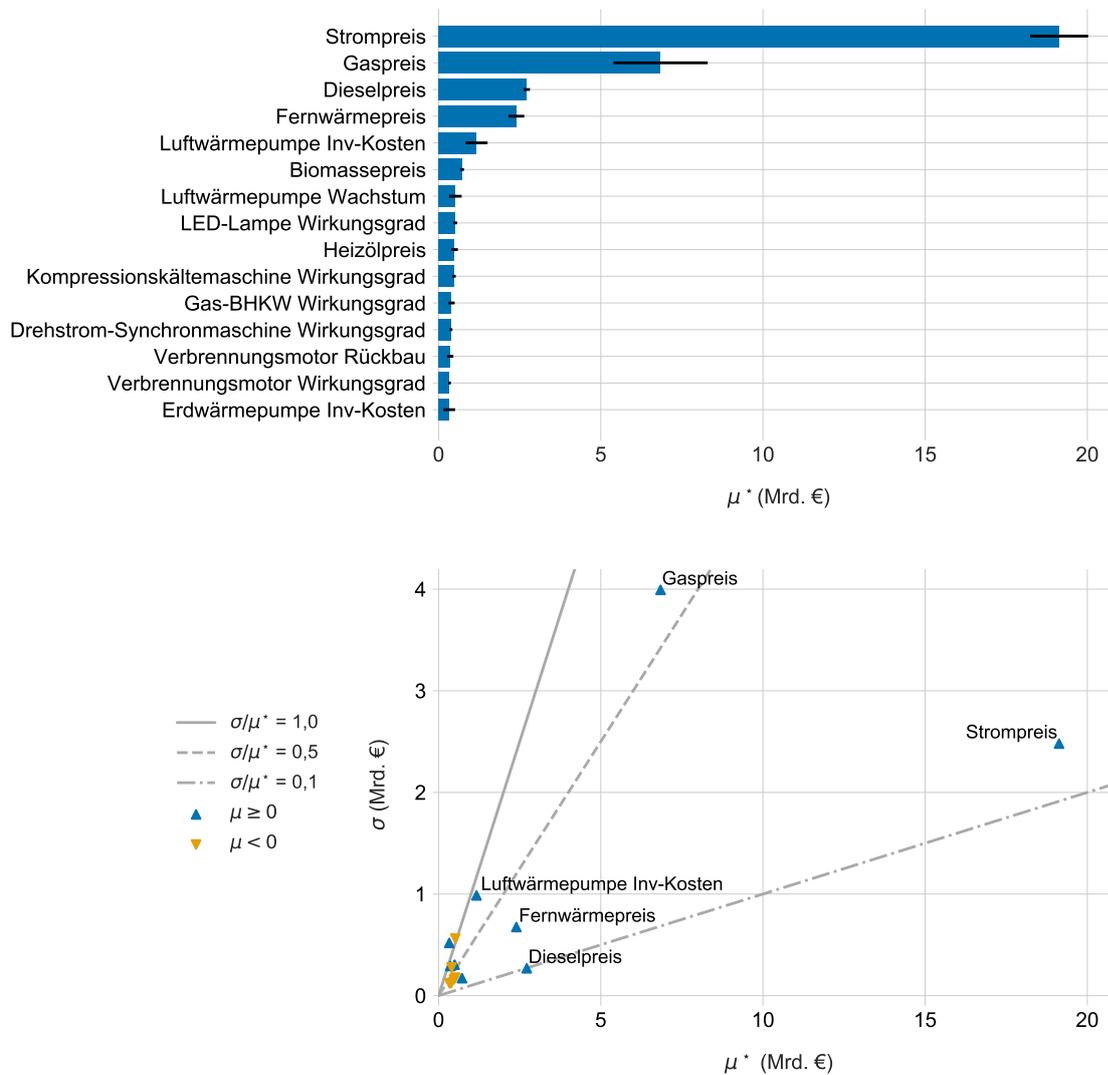


Abbildung 6.4: Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber den Kosten im Jahr 2050. (oben) Darstellung der 15 einflussreichsten Eingangsparameter basierend auf dem absoluten elementaren Effekt  $\mu^*$  der Morris-Methode. (unten) Gegenüberstellung dieses Effekts mit den korrespondierenden Standardabweichungen  $\sigma$ .

Die 15 einflussreichsten Parameter auf die Kosten der Energiebereitstellung und zur Deckung der Nutzenergie sind für das Jahr 2050 in Abbildung 6.4 dargestellt. Die Betrachtung von  $\mu^*$  zeigt, dass nur wenige Eingangsparameter einen deutlichen Einfluss auf die Kosten haben. Die vier einflussreichsten Parameter sind Strom-, Gas-, Diesel- und Fernwärmepreise. Daraus lässt sich schließen, dass die Unsicherheit der Energiepreise der Endenergieträger eine hohe Variation der Kosten verursacht.

Der mit Abstand einflussreichste Parameter ist der Strompreis mit einem Wert für  $\mu^*$  von 19,1 Mrd. €, gefolgt vom Gaspreis mit 6,9 Mrd. €. Die Variation dieser Parameter im Vergleich zum Referenzszenario um  $\pm 50\%$  führen zu einer Variation der gesamten Kosten von 53,1 % bedingt durch den Strompreis und um 19,0 % durch die Veränderung des Gaspreises.

Der Variationskoeffizient  $CV$  des Strompreises liegt im Bereich zwischen  $0,1 < CV < 0,5$  und weist ein positives  $\mu$  auf. Dieser Zusammenhang deutet auf einen positiven monotonen Einfluss des Parameters auf die Kosten hin. Der positive Wert von  $\mu$  des Gaspreises und der Wert von  $CV$ , der im Bereich zwischen  $0,5 < CV < 1$  liegt, lassen auf einen annähernd monotonen und positiven Einfluss des Gaspreises auf die Kosten schließen.

### CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Betrachtung der möglichen Pfade zur Dekarbonisierung des GHD-Sektors stellt einen zentralen Aspekt dieser Arbeit dar. Basierend auf der Szenarioanalyse werden die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die aufgrund des Energieeinsatzes im Sektor GHD verursacht werden, für unterschiedliche Entwicklungen untersucht. Die Ergebnisse der Morris-Methode für die Emissionen sind in Abbildung 6.5 ersichtlich.

Den größten Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem  $\mu^*$  von 19,4 Mt CO<sub>2</sub> wird durch die Variation des Gaspreises hervorgerufen. Dies entspricht 54,0 % der im Sektor GHD verursachten Emissionen im Referenzszenario. Der Einfluss dieses Parameters auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen ist aufgrund des Mittelwerts von  $\mu$  kleiner null und einem Variationskoeffizienten von 0,41 negativ monoton. Eine höhere Bepreisung des Gaspreises führt somit zu sinkenden Emissionen. Die geringe Standardabweichung des absoluten elementaren Effekts weist darauf hin, dass ein steigender Preis die Emission reduziert, unabhängig von den Preisen der anderen Energieträger. Der gegenteilige Effekt ist für den Strompreis ersichtlich. Der positive Wert von  $\mu$  weist darauf hin, dass ein Anstieg des Strompreises zu einem annähernd monotonen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt.

Der Einfluss der Investitionskosten der Luftwärmepumpe mit 5,2 Mt CO<sub>2</sub> und der Ausbaugeschwindigkeit mit 2,5 Mt CO<sub>2</sub> liegt an dritter und vierter Stelle. Der Variationskoeffizient ist für beide Eingangsparameter größer eins und legt nahe, dass diese Parameter mit anderen interagieren. Das bedeutet, dass Anreize in Form von Förderungen der Luftwärmepumpe nicht zwangsläufig zu einer Dekarbonisierung der Wärmebereitstellung im Sektor GHD führen. Für eine erfolgreiche Integration von Luftwärmepumpen im Sektor und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bedarf es weiterführender Szenarioanalysen. Im Gegensatz dazu erweisen sich die Erhöhung des Gaspreises bzw. die Senkung des Strompreises als robuste und unabhängige Maßnahmen hinsichtlich der sektoralen Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

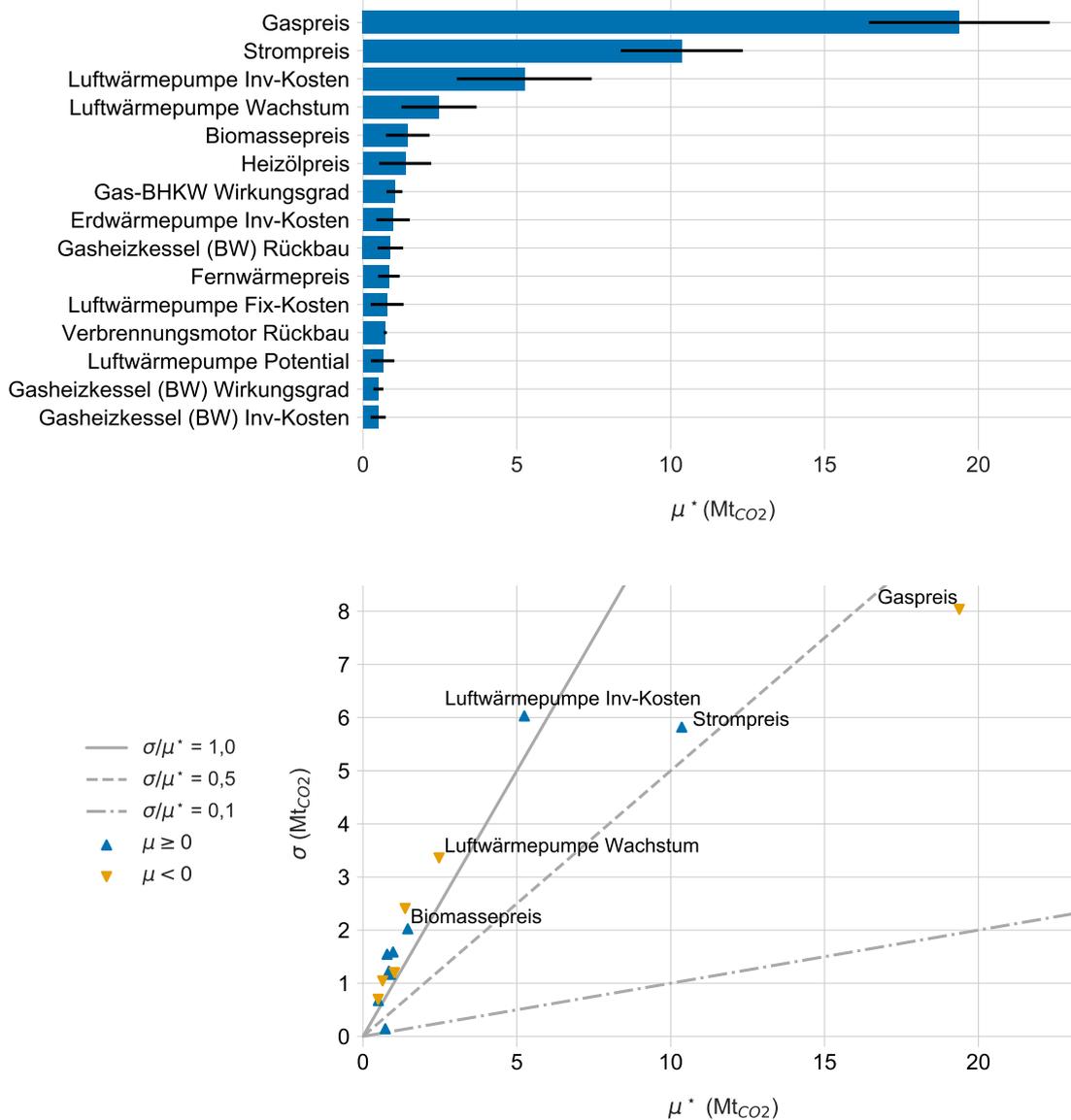


Abbildung 6.5: Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber den  $\text{CO}_2$ -Emissionen im Jahr 2050. (oben) Darstellung der 15 einflussreichsten Eingangsparameter basierend auf dem absoluten elementaren Effekt  $\mu^*$  der Morris-Methode. (unten) Gegenüberstellung dieses Effekts mit den korrespondierenden Standardabweichungen  $\sigma$ .

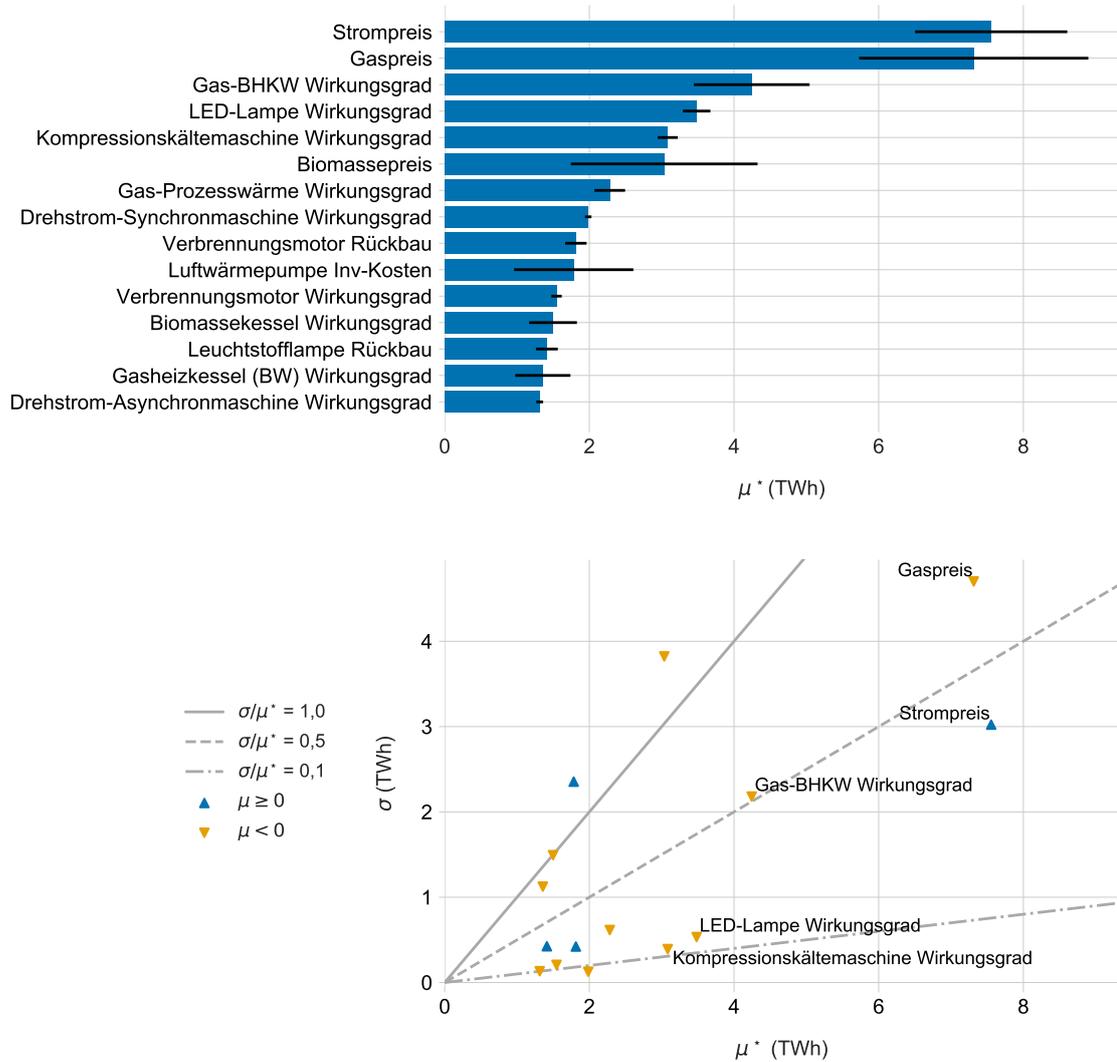


Abbildung 6.6: Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber dem Endenergiebedarf im Jahr 2050. (oben) Darstellung der 15 einflussreichsten Eingangsparameter basierend auf dem absoluten elementaren Effekt  $\mu^*$  der Morris-Methode. (unten) Gegenüberstellung dieses Effekts mit den korrespondierenden Standardabweichungen  $\sigma$ .

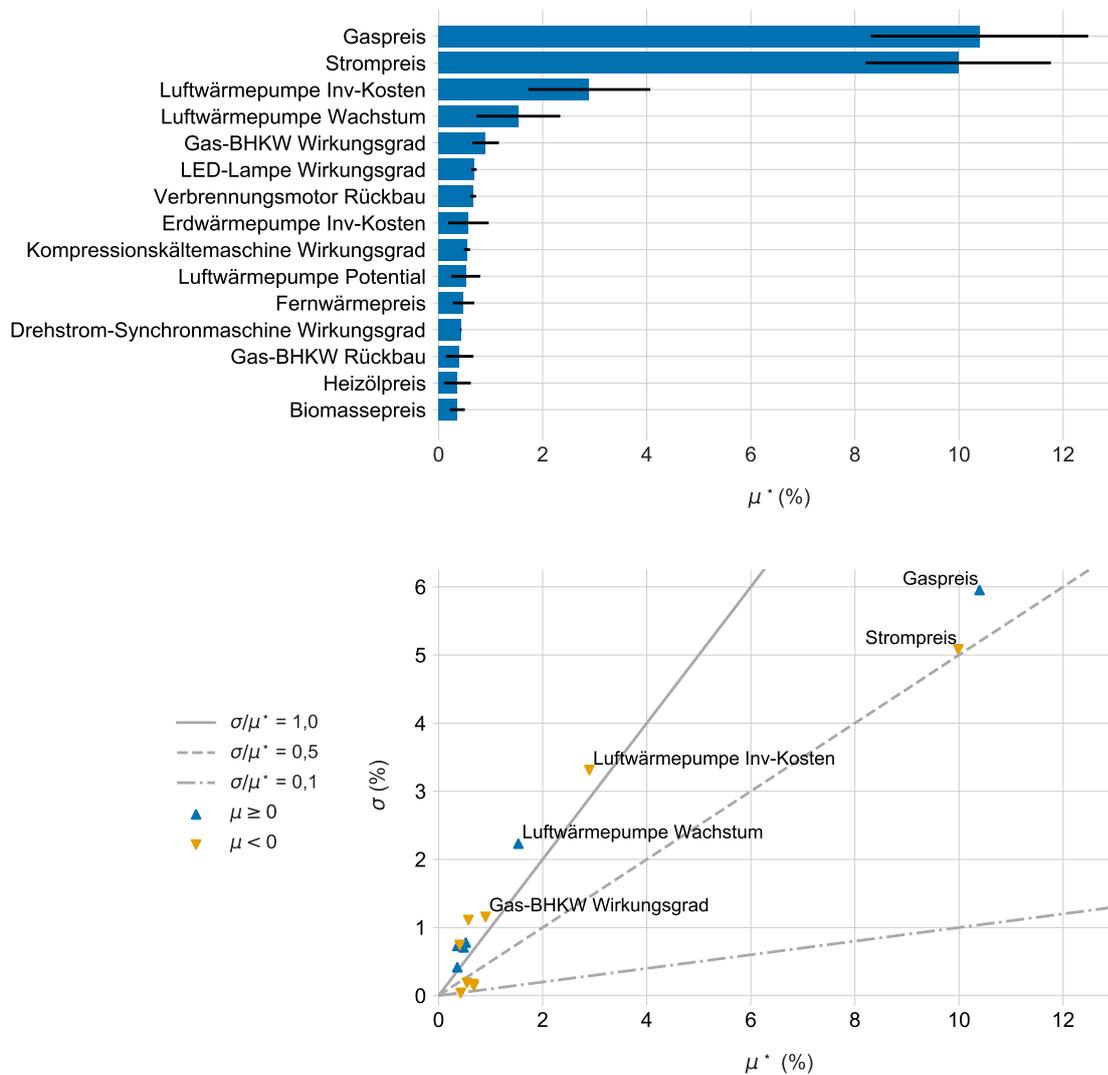


Abbildung 6.7: Sensitivität der Eingangsdaten gegenüber der Elektrifizierung im Jahr 2050. (oben) Darstellung der 15 einflussreichsten Eingangsparameter basierend auf dem absoluten elementaren Effekt  $\mu^*$  der Morris-Methode. (unten) Gegenüberstellung dieses Effekts mit den korrespondierenden Standardabweichungen  $\sigma$ .

### Endenergiebedarf

Abbildung 6.6 gibt einen Überblick über die 15 einflussreichsten Parameter auf den Endenergiebedarf. Ein steigender (sinkender) Bedarf aufgrund der Veränderung des Eingangsparameters führt dazu, dass die Endenergieeffizienz im Modell *MESSAGEix-GHD* sinkt (steigt). Die Energiepreise von Strom und Gas haben mit rund 7,4 TWh den größten Einfluss auf den Endenergieeinsatz im Sektor GHD. Die Variation dieser Preise ruft eine Veränderung des gesamten Endenergiebedarfs um 2,7 % hervor. Steigende Strompreise resultieren in einem monotonen Anstieg des Bedarfs und in einer Verschlechterung der Energieeffizienz des Sektors. Gegenteilig dazu führt ein steigender Gaspreis zu einem sinkenden Bedarf. Die Steigerung der Wirkungsgrade des Gas-BHKW, der LED-Lampe und der Kompressionskältemaschine bringt eine Reduktion des Endenergiebedarfs mit sich. Der Variationskoeffizient liegt für die beschriebenen Energieträger und Technologien unter eins. Somit haben diese Parameter einen monotonen bzw. annähernd monotonen Einfluss auf den sektoralen Endenergiebedarf und interagieren nicht mit anderen Parametern.

### Elektrifizierung

Der Einfluss der Parametrisierung des Modells auf den Anteil der Elektrifizierung des Endenergiebedarfs ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Der Anteil des Strombedarfs wird überwiegend durch die Variation des Gaspreises und Strompreises annähernd monoton beeinflusst. Die Auswirkung der beiden Parameter steht jedoch in einer Wechselwirkung. Dies bedeutet, dass steigende Gaspreise und sinkende Strompreise eine Erhöhung der Elektrifizierung bewirken.

*Tabelle 6.2: Parameterranking des absoluten elementaren Effekts  $\mu^*$ . Darstellung der zehn einflussreichsten Parameter für die  $CO_2$ -Emissionen und das resultierende Ranking dieser Parameter für die Modellausgänge Kosten, Endenergiebedarf und Elektrifizierung.*

Eingangsparameter	Modellausgang			
	$CO_2$ -Emissionen	Kosten	Endenergie	Elektrifizierung
Gaspreis	1	2	2	1
Strompreis	2	1	1	2
Luftwärmepumpe Inv-Kosten	3	43	7	3
Luftwärmepumpe Wachstum	4	10	23	4
Biomassepreis	5	3	24	7
Heizölpreis	6	5	5	23
Gas-BHKW Wirkungsgrad	7	4	16	12
Erdwärmepumpe Inv-Kosten	8	23	32	8
Gasheizkessel (BW) Rückbau	9	6	12	24
Fernwärmepreis	10	24	3	13

### Parameterranking der untersuchten Modellausgänge

Die Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse sind für alle Modellausgänge in Tabelle 6.2 in Form eines Parameterrankings von  $\mu^*$  zusammengefasst. Die Auswahl und Sortierung der Eingangsparameter wird von den zehn einflussreichsten Parametern auf die verursachten

CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmt. Das Ranking der einzelnen Parameter unterscheidet sich für die unterschiedlichen Modellausgänge, mit Ausnahme der Energiepreise für Gas und Strom, deutlich. Diese Parameter belegen für alle Modellausgänge abwechselnd die Plätze 1 und 2. Dies verdeutlicht den signifikanten Einfluss der mit einer hohen Unsicherheit behafteten Entwicklung der zukünftigen Energiepreise für alle Modellergebnisse.

## 6.5 Ergebnisse Unsicherheitsanalyse

Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse sind in den Abbildungen 6.8 bis 6.11 dargestellt. Die Abbildungen zeigen die möglichen zeitlichen Entwicklungen, die auf Basis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation für 7.500 Durchläufe des Modells *MESSAGEix-GHD* berechnet wurden. Die Darstellungen beinhalten den Median der Entwicklung sowie unterschiedliche Quantile. Das 95 %-Quantil weist den Ergebnisraum aus, in dem 95 % der Modelldurchläufe liegen. Dieser Zusammenhang gilt analog für die 20 %-, 40 %-, 60 %- und 80 %-Quantile.

### Kosten

Abbildung 6.8 illustriert den möglichen Verlauf der Kostenentwicklung. Der Median der Kosten liegt im Jahr 2050 bei 29,9 Mrd. € und weist eine Unsicherheit von  $\pm 0,8\%$  auf. In diesem Jahr liegen 60 % der Modellergebnisse im Bereich zwischen 40,1 Mrd. € und 22,9 Mrd. €. Der dargestellte Lösungsraum wird durch die Annahme der logarithmischen Normalverteilung der Kostenparameter und der exponentiellen Entwicklung im Zeitraum zwischen 2020 und 2050 aufgespannt. Der Kostenrückgang im Zeitschritt zwischen 2015 und 2020 erklärt sich durch den rückläufigen Wärmebedarf und die Verringerung von historischen Überkapazitäten der Wärmebereitstellung bedingt durch Förderungen (vgl. Unterkapitel 5.1).

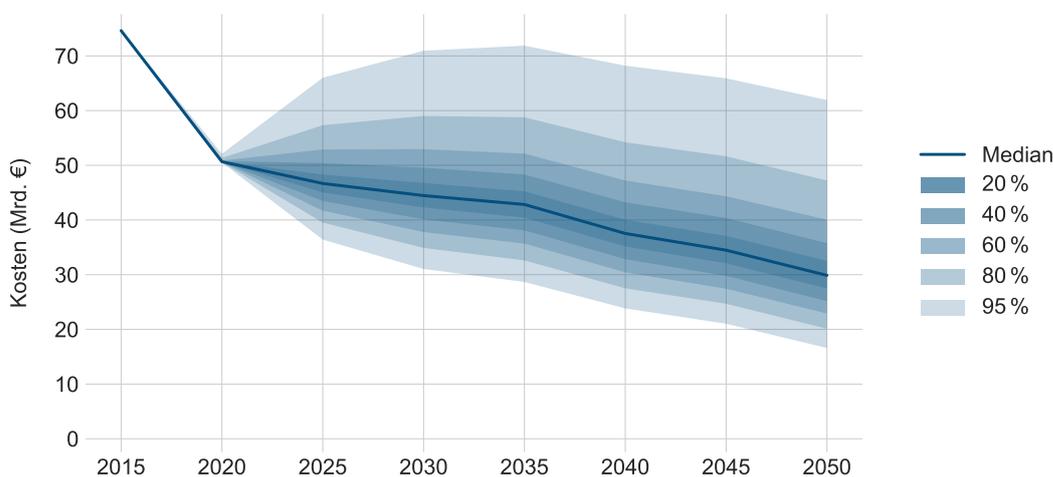


Abbildung 6.8: Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation für die Kosten im Zeitraum zwischen 2015 und 2050. Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Medians und der ausgewählten Quantile.

## CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die möglichen Transformationspfade zur Dekarbonisierung des GHD-Sektors sind für das Referenzszenario in Abbildung 6.9 dargestellt. Der Sektor verursacht im Jahr 2050 mit einer Unsicherheit von  $\pm 1,2\%$  im Mittel 36,7 Mt CO<sub>2</sub> an direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dieser Wert entspricht einer Reduktion von 82,4 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emission gegenüber dem Basisjahr 1990. Die Streubreite des 60 %-Quantils liegt im Bereich zwischen 25,5 Mt CO<sub>2</sub> (87,8 %) und 45,8 Mt CO<sub>2</sub> (78,0 %). Das 95 %-Reduktionsziel wird in keinem der 7.500 Modelldurchläufe im Jahr 2050 erreicht. Die Anzahl der Durchläufe, die eine Reduktion der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 93,2 % erreichen, liegt lediglich bei 0,1 %. Allgemein ist eine stetige Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Jahr 2015 ersichtlich. Dies wird zum einen erreicht, indem im Sektor GHD vermehrt effizientere strombasierte Technologien eingesetzt werden. Zum anderen dadurch, dass die Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme aufgrund der voranschreitenden Energiewende Deutschlands sinken.

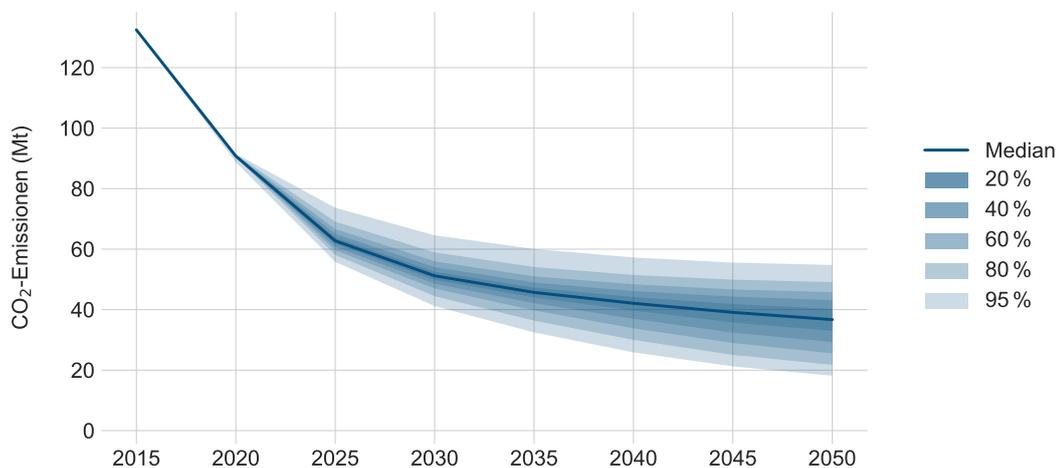


Abbildung 6.9: Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation für die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum zwischen 2015 und 2050. Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Medians und der ausgewählten Quantile.

## Endenergiebedarf

Ein Rückgang des sektoralen Endenergiebedarfs bis zum Jahr 2050 lässt sich auch aus Abbildung 6.10 ableiten. Diese Entwicklung wird vor allem durch die Annahmen der Nutzenergieprojektion des Referenzszenarios hervorgerufen (vgl. Unterkapitel 5.1.2), aber auch durch die Steigerung der Effizienz des Energieeinsatzes. Die Streuung des Endenergiebedarfs bis zum Jahr 2050 ist sehr gering. Der Median liegt in diesem Jahr bei 272,9 TWh mit einer Unsicherheit von 0,07 %. Das 60 %-Quantil liegt im schmalen Bereich zwischen 267,3 TWh und 279,2 TWh.

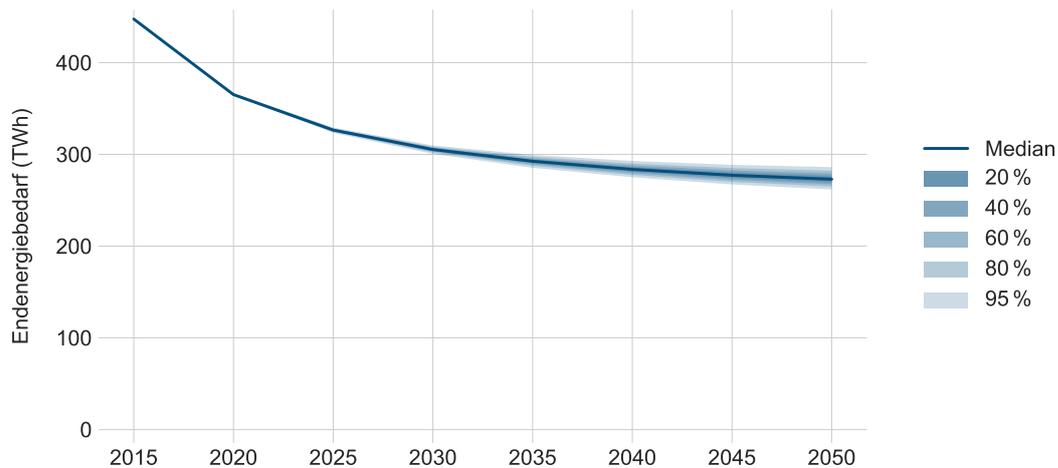


Abbildung 6.10: Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation für den Endenergiebedarf im Zeitraum zwischen 2015 und 2050. Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Medians und der ausgewählten Quantile.

### Elektrifizierung

Die Entwicklung der prozentualen Elektrifizierung des Endenergiebedarfs ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Der Trend lässt einen Anstieg des Elektrifizierungsgrads des Sektors bis zum Jahr 2050 erkennen und liegt bei 32,6 %. Die mithilfe von Bootstrapping berechnete Unsicherheit liegt bei 0,6 %. Die möglichen Entwicklungspfade der Elektrifizierung unterscheiden sich ab dem Jahr 2020 deutlich. Dies zeigt sich auch in der Streuung des 60 %-Quantils im Jahr 2050 des elektrischen Anteils des Endenergiebedarfs im Bereich zwischen 28,7 % und 41,8 %.

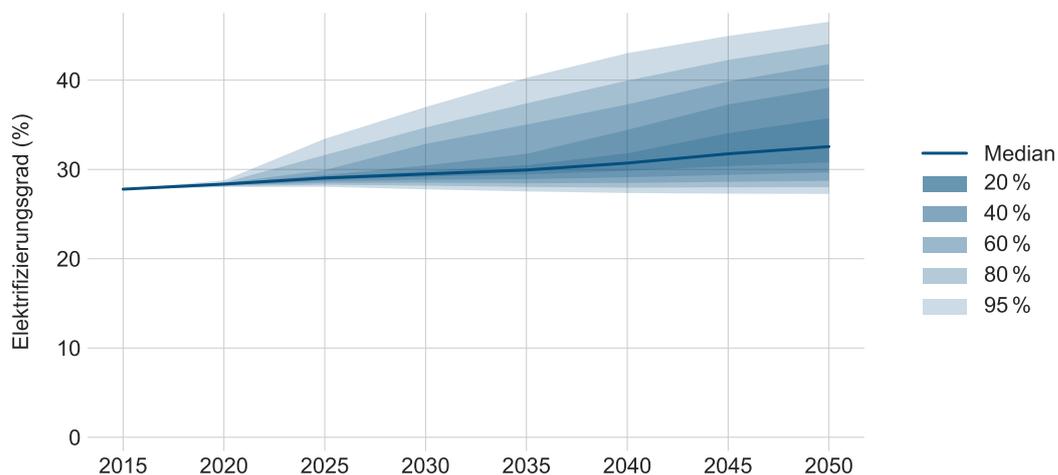


Abbildung 6.11: Ergebnis der Quasi-Monte-Carlo-Simulation für Elektrifizierung des Endenergiebedarfs im Zeitraum zwischen 2015 und 2050. Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Medians und der ausgewählten Quantile.



# Kapitel 7

## Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde in Entwicklungsszenarien der zukünftige Energieeinsatz im energetisch kleinsten Endverbrauchssektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) bis zum Jahr 2050 untersucht. Für eine detaillierte Betrachtung des Potenzials zur Dekarbonisierung des Sektors wurde dieser in 13 Branchen (z. B. Bürobetriebe, Handel und Gastgewerbe) und sieben Bedarfe in Form von Anwendungsbereichen (z. B. Wärme, Kälte und Beleuchtung) abgebildet. Ziel dieser Arbeit war die Analyse der möglichen technologischen Transformationspfade hin zu einer klimafreundlichen Energieversorgung des Sektors. Dabei wurden sowohl Auswirkungen struktureller Veränderungen des Sektors GHD als auch Einflüsse des Klimas auf den Dekarbonisierungspfad berücksichtigt.

### Konzept der Modellierung

Die in dieser Arbeit entwickelte modulare Architektur zur Modellierung des heterogenen Sektors GHD beinhaltet die Nutzenergieprojektion, die Optimierung der Energiebereitstellung sowie die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse. Das konzipierte Framework erlaubt somit die Beantwortung einer Vielzahl energiewirtschaftlicher Fragestellungen für den Sektor GHD.

Die Nutzenergieprojektion ermöglicht die Abbildung struktureller Veränderungen des Sektors sowie die Betrachtung des Klimaeinflusses auf zukünftige Bedarfe der einzelnen Branchen. Die Berechnung erfolgte anhand eines Simulationsmodells. Dieses Modell berechnet unter Berücksichtigung von ausgewählten Parametern wie z. B. Klimaszenarien oder Branchentrends den jährlichen Nutzenergiebedarf der 13 Branchen für sieben Anwendungsbereiche im Zeitraum zwischen 2015 und 2050.

Die technologische Pfadentwicklung und damit auch die Entwicklung des Endenergiebedarfs wurde anhand des Modells *MESSAGEix-GHD* für 13 definierte Branchen des Sektors GHD untersucht. Dieses lineare Optimierungsmodell wurde auf Basis von *MESSAGEix* entwickelt. Das Modell berechnet auf Grundlage der verfügbaren Technologien die kostenoptimale Deckung der Bedarfe der sieben Anwendungsbereiche in Form einer Einsatz- und Ausbauplanung. Ferner erlaubt die in *MESSAGEix-GHD* integrierte Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse die Charakterisierung der Auswirkungen der Unsicherheit von Eingangsparametern auf die Modellergebnisse.

Die globale Sensitivitätsanalyse ermöglicht die Bewertung von Maßnahmen (Technologieoptionen) im Hinblick auf ihren Einfluss und ihre Robustheit bezüglich der Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sektor GHD. Die Unsicherheitsanalyse zeigt den möglichen Erwartungsbereich der Modellergebnisse im Betrachtungszeitraum zwischen 2015 und 2050 auf. Dieser Ergebnisraum wird durch die mit Unsicherheit behaftete Parametrisierung von *MESSAGEix-GHD* hervorgerufen.

Das modulare Framework bietet somit drei grundlegende Möglichkeiten zur Beantwortung von Forschungsfragen: (i) Abbildung des heterogenen GHD-Sektors im Zeitraum von 2015 bis 2050 anhand konsistenter Szenarien. (ii) Bewertung von technologischen Entwicklungen sowie mögliche Wechselwirkungen. (iii) Analyse der Bedarfsveränderung der Endverbraucher auf der Nutzenergieebene. Das Framework erlaubt somit die Identifikation robuster technologischer Dekarbonisierungsmaßnahmen sowie die Feststellung möglicher Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen für 13 Branchen und sieben Anwendungsbereiche des Sektors GHD.

### **Analyse des Sektors GHD**

Das für diese Arbeit entwickelte Referenzszenario erreicht im Jahr 2050 eine Reduktion von 82,8% der direkten und indirekten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990. Auf Basis des Referenzszenarios wurden unterschiedliche Entwicklungen (z. B. Veränderung der Erwerbstätigenzahl einzelner Branchen) und äußere Einflüsse (z. B. Klima oder Emissionsfaktoren) in Form von 13 Szenarien untersucht. Die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Reduktionen dieser Szenarien unterlagen dabei einer Schwankung von  $\pm 2,5\%$  um die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion des Referenzszenarios im Jahr 2050. Diese Varianz ist vor allem durch die Entwicklungspfade der Emissionsfaktoren von Strom und Fernwärme bedingt.

Unter den aktuellen politischen Rahmenbedingungen wird das Klimaziel für 2050 (Reduktion von 95% gegenüber 1990) unter der Annahme einer kostenoptimalen Transformation der Energieversorgung im Sektor GHD nicht erreicht. Für die Erreichung dieses Ziels bedarf es zusätzlicher Anstrengungen in allen Bereichen der Energiebereitstellung und der Energieanwendung.

Aufgrund der hohen sektoralen Bedeutung der Wärmebereitstellung muss ein besonderer Fokus (z. B. in Förderprogrammen) auf die Dekarbonisierung dieses Anwendungsbereichs gelegt werden, um das definierte Klimaziel zu erreichen. Überdies ist zur Zielerreichung eine weitere Steigerung der Energieeffizienz in allen Anwendungsbereichen des GHD-Sektors notwendig. Das größte Potenzial der kostengetriebenen Dekarbonisierung im GHD-Sektor wird durch eine Erhöhung des Gaspreises oder die Senkung des Strompreises erreicht. Eine Kostensteigerung des fossilen Energieträgers Gas kann z. B. mit der Einführung einer Bepreisung der CO<sub>2</sub>-Emissionen umgesetzt werden. Förderungen, die Technologien direkt adressieren, benötigen Ausgestaltungen insbesondere hinsichtlich einer komplexeren Integration in die bestehenden Preisstrukturen. So kann z. B. die Technologie Wärmepumpe einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des Sektors unter der Annahme einer zunehmenden erneuerbaren Bereitstellung von Strom leisten. Eine Förderung dieser Technologie allein reicht jedoch nicht aus, da der Einsatz der Wärmepumpe in hohem Maße von der Preisstruktur der Wärmebereitstellung abhängt. Für die erfolgreiche Implementierung dieser Technologie im Sektor GHD ist daher eine gesamthafte Betrachtung und Abstimmung der Maßnahmen notwendig.

Neben der Wahl der politischen Fördermechanismen ist auch der Zeitpunkt der Umsetzung einer Dekarbonisierungsmaßnahme entscheidend. Denn obwohl alle betrachteten Szenarien im Jahr 2050 eine ähnliche CO<sub>2</sub>-Reduktion gegenüber 1990 aufweisen, unterscheiden sie sich in den kumulierten Emissionen über den Zeitraum von 2015 bis 2050.

### **Einschränkungen**

Für die Abbildung des komplexen Energiesystems des GHD-Sektors wurden Vereinfachungen vorgenommen. So wurde in dieser Arbeit ausschließlich der Sektor GHD betrachtet. Dies hat zur Folge, dass mögliche Wechselwirkungen mit dem Umwandlungssektor und den Endverbrauchssektoren nicht berücksichtigt werden. Die Modellierung des sektoralen Energiebedarfs erfolgte auf Basis von Jahresenergiemengen aufgeteilt nach 13 Branchen. Aufgrund der gewählten zeitlichen Auflösung wurden keine Flexibilitätsoptionen betrachtet, die durch die zunehmende Integration erneuerbarer Energien an Bedeutung gewinnen.

Ferner ist zu beachten, dass der entwickelte Ansatz der Modellierung des zukünftigen Nutzenergiebedarfs und des kostenoptimalen Energieeinsatzes für die Deckung dieses Bedarfs einigen allgemeinen Annahmen unterliegt. Dieses Vorgehen war aufgrund der heterogenen Zusammensetzung des GHD-Sektors, der teilweise lückenhaften Daten sowie der Lösbarkeit des komplexen Optimierungsproblems in einer überschaubaren Rechenzeit notwendig.

### **Ausblick**

Das Framework eignet sich für die Analyse und Bewertung der sektoralen Entwicklung der Energiebereitstellung im Zeitraum zwischen 2015 und 2050. In den betrachteten Szenarien wird eine Reduktion von 95 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2050 nicht erreicht. Somit wird auch das ambitionierte Klimaziel der Bundesregierung (Reduktion um 95 % gegenüber dem Jahr 1990) verfehlt. Um zusätzliche Hebel der Dekarbonisierung zu identifizieren, ist es daher essenziell, weitere Analysen für den Sektor GHD sowie Untersuchungen zu den möglichen Wechselwirkungen mit dem Umwandlungssektor und den Endverbrauchssektoren durchzuführen.

Das Modell *MESSAGEix-GHD* könnte für die Untersuchung weiterer Forschungsfragen im Bereich der Wärmebereitstellung erweitert werden. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die Technologie Wärmepumpe entlang des Transformationsprozesses hin zu einer klimaneutralen Bereitstellung der Wärme eine bedeutende Rolle im Sektor GHD einnehmen kann. Für die Verbesserung der Ergebnisse besteht hier weiterer Forschungsbedarf insbesondere in der Ausweisung des gebäudespezifischen Potenzials zur Anwendung dieser Technologien innerhalb einzelner Branchen. Abschließend könnte das Framework zur Erhebung des Dekarbonisierungspotenzials sowie der Integration synthetischer Kraftstoffe im Sektor GHD genutzt werden.



## Anhang A

# Ergebnisse der Nutzenergieprojektion

Tabelle A.1: Ergebnis der Nutzenergieprojektion nach Anwendungsbereichen und Branchen des Referenzszenarios in TWh. Die Berechnung erfolgte auf der Datengrundlage nach [11, 13, 60].

Branchen	Anwendungsbereiche	Stützjahre							
		2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bäder	Klimakälte	0,020	0,021	0,022	0,023	0,026	0,029	0,033	0,037
	IKT	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Beleuchtung	0,077	0,078	0,079	0,079	0,079	0,080	0,079	0,079
	Mechanische Energie	0,754	0,764	0,773	0,774	0,776	0,777	0,775	0,772
	Prozesskälte	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Prozesswärme	1,670	1,714	1,756	1,782	1,808	1,834	1,852	1,871
	Wärme	1,472	1,308	1,217	1,157	1,123	1,105	1,089	1,079
Baugewerbe	Klimakälte	0,248	0,243	0,241	0,234	0,249	0,264	0,285	0,306
	IKT	0,305	0,286	0,272	0,253	0,238	0,223	0,213	0,202
	Beleuchtung	0,564	0,528	0,502	0,467	0,440	0,412	0,393	0,374
	Mechanische Energie	1,182	1,107	1,053	0,979	0,922	0,865	0,824	0,784
	Prozesskälte	0,087	0,085	0,084	0,082	0,087	0,092	0,099	0,107
	Prozesswärme	0,077	0,073	0,071	0,067	0,064	0,060	0,058	0,056
	Wärme	10,082	8,262	7,208	6,351	5,791	5,330	5,024	4,746
Bürobetriebe	Klimakälte	2,593	2,694	2,806	2,903	3,259	3,659	4,094	4,580
	IKT	10,972	10,920	10,898	10,799	10,721	10,642	10,530	10,418
	Beleuchtung	4,181	4,161	4,153	4,115	4,085	4,055	4,013	3,970
	Mechanische Energie	0,869	0,865	0,863	0,856	0,849	0,843	0,834	0,825
	Prozesskälte	1,416	1,471	1,532	1,585	1,780	1,998	2,236	2,501
	Prozesswärme	0,347	0,349	0,353	0,355	0,357	0,359	0,359	0,360
	Wärme	58,298	50,490	46,050	43,152	41,417	40,299	39,408	38,721
Gartenbau	Klimakälte	0,026	0,026	0,026	0,026	0,029	0,031	0,034	0,036
	IKT	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Beleuchtung	0,105	0,102	0,098	0,094	0,090	0,086	0,083	0,079
	Mechanische Energie	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005
	Prozesskälte	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009	0,010	0,010	0,011
	Prozesswärme	1,076	1,060	1,030	0,995	0,967	0,938	0,913	0,886
	Wärme	0,282	0,246	0,220	0,201	0,188	0,177	0,169	0,161
Gastgewerbe	Klimakälte	0,784	0,829	0,876	0,916	1,037	1,175	1,325	1,494
	IKT	0,978	0,991	1,002	1,004	1,006	1,007	1,004	1,001
	Beleuchtung	1,689	1,711	1,730	1,733	1,736	1,739	1,734	1,729
	Mechanische Energie	3,282	3,325	3,363	3,369	3,375	3,380	3,370	3,360
	Prozesskälte	5,122	5,417	5,720	5,982	6,776	7,676	8,654	9,757
	Prozesswärme	8,219	8,435	8,642	8,769	8,897	9,027	9,116	9,206
	Wärme	31,664	28,145	26,168	24,885	24,158	23,755	23,428	23,210

Branchen	Anwendungsbereiche	Stützjahre							
		2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Handel	Klimakälte	1,554	1,554	1,573	1,590	1,753	1,933	2,132	2,351
	IKT	1,909	1,829	1,773	1,717	1,675	1,632	1,592	1,553
	Beleuchtung	3,409	3,266	3,167	3,066	2,991	2,915	2,844	2,773
	Mechanische Energie	1,446	1,386	1,343	1,301	1,269	1,237	1,206	1,176
	Prozesskälte	8,553	8,555	8,658	8,752	9,654	10,641	11,740	12,944
	Prozesswärme	0,597	0,580	0,569	0,559	0,552	0,545	0,538	0,532
	Wärme	32,325	26,959	23,891	21,880	20,634	19,714	19,009	18,408
Herstellungsbetriebe	Klimakälte	0,060	0,063	0,067	0,070	0,079	0,090	0,101	0,114
	IKT	0,424	0,429	0,434	0,435	0,436	0,436	0,435	0,434
	Beleuchtung	0,600	0,608	0,615	0,616	0,617	0,618	0,616	0,614
	Mechanische Energie	1,080	1,094	1,106	1,108	1,110	1,112	1,109	1,105
	Prozesskälte	0,063	0,067	0,070	0,074	0,083	0,094	0,107	0,120
	Prozesswärme	1,345	1,380	1,414	1,435	1,456	1,477	1,492	1,507
	Wärme	12,840	11,286	10,409	9,846	9,526	9,347	9,207	9,115
Krankenhäuser	Klimakälte	1,060	1,120	1,179	1,236	1,407	1,603	1,830	2,090
	IKT	0,613	0,621	0,626	0,628	0,633	0,637	0,644	0,650
	Beleuchtung	0,569	0,576	0,581	0,583	0,587	0,591	0,597	0,603
	Mechanische Energie	1,136	1,149	1,160	1,164	1,172	1,180	1,192	1,204
	Prozesskälte	0,145	0,154	0,162	0,170	0,193	0,220	0,251	0,287
	Prozesswärme	1,947	1,996	2,040	2,074	2,116	2,158	2,208	2,259
	Wärme	8,700	7,811	7,302	6,995	6,850	6,785	6,786	6,815
Landwirtschaft	Klimakälte	1,277	1,199	1,167	1,144	1,235	1,331	1,446	1,568
	IKT	0,161	0,145	0,135	0,127	0,121	0,115	0,111	0,106
	Beleuchtung	0,417	0,375	0,350	0,328	0,314	0,299	0,287	0,275
	Mechanische Energie	6,252	5,624	5,244	4,923	4,701	4,479	4,303	4,126
	Prozesskälte	0,230	0,216	0,210	0,206	0,222	0,240	0,260	0,282
	Prozesswärme	1,647	1,501	1,417	1,348	1,304	1,258	1,224	1,189
	Wärme	12,499	9,933	8,556	7,650	7,095	6,644	6,318	6,023
Nahrungsmittelgewerbe	Klimakälte	0,074	0,078	0,082	0,086	0,097	0,110	0,124	0,140
	IKT	0,039	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
	Beleuchtung	0,040	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
	Mechanische Energie	0,091	0,092	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093
	Prozesskälte	0,348	0,368	0,389	0,407	0,461	0,522	0,588	0,663
	Prozesswärme	0,793	0,814	0,834	0,846	0,858	0,871	0,880	0,888
	Wärme	0,800	0,715	0,667	0,636	0,619	0,609	0,601	0,595
Schulen	Klimakälte	0,119	0,126	0,133	0,141	0,161	0,183	0,209	0,237
	IKT	0,439	0,444	0,450	0,454	0,459	0,463	0,466	0,469
	Beleuchtung	0,914	0,926	0,938	0,946	0,956	0,965	0,972	0,978
	Mechanische Energie	0,088	0,089	0,090	0,091	0,092	0,093	0,093	0,094
	Prozesskälte	0,086	0,091	0,096	0,101	0,115	0,132	0,150	0,171
	Prozesswärme	0,206	0,211	0,217	0,221	0,226	0,232	0,236	0,241
	Wärme	15,764	13,826	12,763	12,142	11,842	11,714	11,644	11,633
Sonstige	Klimakälte	0,854	0,838	0,853	0,865	0,952	1,047	1,148	1,259
	IKT	5,390	5,068	4,942	4,801	4,670	4,540	4,405	4,269
	Beleuchtung	2,455	2,308	2,251	2,186	2,127	2,068	2,006	1,944
	Mechanische Energie	12,200	11,472	11,186	10,866	10,572	10,277	9,970	9,663
	Prozesskälte	6,122	6,010	6,117	6,204	6,826	7,504	8,232	9,023
	Prozesswärme	1,652	1,573	1,554	1,529	1,507	1,484	1,458	1,431
	Wärme	13,303	10,900	9,722	8,936	8,409	8,014	7,685	7,398
Wäschereien	Klimakälte	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003
	IKT	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
	Beleuchtung	0,029	0,029	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,029
	Mechanische Energie	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Prozesskälte	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
	Prozesswärme	0,453	0,465	0,476	0,483	0,490	0,497	0,502	0,507
	Wärme	0,174	0,161	0,154	0,149	0,146	0,145	0,143	0,142

## Anhang B

# Eingangsdaten MESSAGEix-GHD

Tabelle B.1: Inputs und Outputs sowie Levels ausgewählter Technologien.

Technologie	Commodity Input	Level Input	Commodity Output 1	Level Output 1	Commodity Output 2	Level Output 2
Glühlampe	Strom	Endenergie	Beleuchtung	Nutzenergie		
Halogenlampe	Strom	Endenergie	Beleuchtung	Nutzenergie		
Leuchtstofflampe	Strom	Endenergie	Beleuchtung	Nutzenergie		
Natriumdampflampe	Strom	Endenergie	Beleuchtung	Nutzenergie		
LED-Lampe	Strom	Endenergie	Beleuchtung	Nutzenergie		
Gasheizkessel (NT)	Gas	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Gasheizkessel (BW)	Gas	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Ölheizkessel (NT)	Heizöl	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Ölheizkessel (BW)	Heizöl	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Fernwärme	Fernwärme	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Elektroheizung	Strom	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Kohlekessel	Heizkohle	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Biomassekessel	Biomasse	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Erdwärmepumpe	Strom	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Luftwärmepumpe	Strom	Endenergie	Wärme	Nutzenergie		
Gas-BHKW	Gas	Endenergie	Strom	Endenergie	Wärme	Nutzenergie
Öl-BHKW	Diesel	Endenergie	Strom	Endenergie	Wärme	Nutzenergie
Biogas-BHKW	Biogas	Endenergie	Strom	Endenergie	Wärme	Nutzenergie
Solarthermie	Solar	Erneuerbar	Wärme	Nutzenergie		
zentrale Klimaanlage	Strom	Endenergie	Klimakälte	Nutzenergie		
mobile Klimakleingeräte	Strom	Endenergie	Klimakälte	Nutzenergie		
Gasmotor-Wärmepumpe	Gas	Endenergie	Klimakälte	Nutzenergie		
dezentrale Split-Klimageräte	Strom	Endenergie	Klimakälte	Nutzenergie		
Kompressionskältemaschine	Strom	Endenergie	Prozesskälte	Nutzenergie		
Gaskältemaschine	Gas	Endenergie	Prozesskälte	Nutzenergie		
Gleichstrommotor	Strom	Endenergie	Mech. Energie	Nutzenergie		
Wechselstrommotor	Strom	Endenergie	Mech. Energie	Nutzenergie		
Drehstrom-Asynchronmaschine	Strom	Endenergie	Mech. Energie	Nutzenergie		
Drehstrom-Synchronmaschine	Strom	Endenergie	Mech. Energie	Nutzenergie		
Verbrennungsmotor	Diesel	Endenergie	Mech. Energie	Nutzenergie		
Elektrische-Prozesswärme	Strom	Endenergie	Prozesswärme	Nutzenergie		
Gas-Prozesswärme	Gas	Endenergie	Prozesswärme	Nutzenergie		
Öl-Prozesswärme	Heizöl	Endenergie	Prozesswärme	Nutzenergie		
Biomasse-Prozesswärme	Biomasse	Endenergie	Prozesswärme	Nutzenergie		
Fernwärme-Prozesswärme	Fernwärme	Endenergie	Prozesswärme	Nutzenergie		
IKT	Strom	Endenergie	IKT	Nutzenergie		

Tabelle B.2: Technologische und ökonomische Parameter ausgewählter Technologien.

Technologie	Investitions- kosten (€/kW)	fixe Kosten (€/kW)	variable Kosten (€/kWh)	Lebens- dauer (a)	Wirkungs- grad (-)	$\Delta\eta$ p.a. (%)	Betriebs- faktor (-)	Kosten- senkung (%)
Glühlampe	20 [45]			1 [45]	0,05 [45]		0,01 [13]	
Halogenlampe	70 [45]			2 [45]	0,10 [45]		0,02 [13]	
Leuchtstofflampe	450 [45]			16 [45]	0,35 [45]	0,08 [13]	0,06 [13]	
Natriumdampflampe	2.750 [45]			13 [45]	0,40 [45]		0,08 [13]	
LED-Lampe	1.100 [45]			20 [45]	0,40 [45]	0,10 [13]	0,08 [13]	-30
Gasheizkessel (NT)	137	7,5 [36]		22 [36]	0,75 [132]		0,14 [26]	
Gasheizkessel (BW)	144 [36]	7,5 [36]		22 [36]	0,95 [132]		0,21 [26]	
Ölheizkessel (NT)	175	6,2 [36]		20 [36]	0,75 [132]		0,30 [26]	
Ölheizkessel (BW)	184 [36]	6,2 [36]		22 [36]	0,95 [132]		0,40 [26]	
Fernwärme	252 [36]	6,2 [36]		30 [36]	0,98 [36]		0,16 [26]	
Elektroheizung	638 [36]	11,0 [36]		30 [36]	0,96 [132]		0,25 [26]	
Kohlekessel	196 [132]	9,8 [132]		20	0,80 [132]		0,05 [26]	
Biomassekessel	371 [36]	13,5 [36]		20 [36]	0,67 [36]		0,32 [26]	-8 [133]
Erdwärmepumpe	1.090 [36]	20,0 [36]		20 [36]	3,60 [36]	0,09 [36]	0,14 [26]	-13 [133]
Luftwärmepumpe	769 [36]	12,3 [36]		20 [36]	3,10 [36]	0,10 [36]	0,14 [26]	-13 [133]
Gas-BHKW	929 [27]		0,02 [27]	15 [132]	0,36/0,54 [27]		0,48 [26]	
Öl-BHKW	1.001 [27]		0,02 [27]	15 [132]	0,39/0,29 [27]		0,49 [26]	
Biogas-BHKW	920 [27]		0,02 [27]	15 [132]	0,38/0,40 [27]		0,56 [26]	
Solarthermie	700 [36]	16,4 [36]		25 [132]	1,00		0,06 [26]	-15 [133]
zentrale Klimaanlage	769 [36]	12,3 [36]		20 [36]	3,01 [36]		0,17 [13]	
mobile Klimakleingeräte	203 [132]	14,2		20 [134]	1,01 [132]		0,08 [13]	
Gasmotor-Wärmepumpe	769 [36]	12,3 [36]		20 [36]	1,39 [13]		0,10 [13]	
dezentrale Split-Klimageräte	336 [132]	16,8		20 [134]	2,96 [132]		0,17 [13]	
Kompressionskältemaschine	100 [132]	2,0		15 [132]	2,00 [132]		0,34 [26]	
Gaskältemaschinen	500 [132]	6,0		15 [132]	1,00 [132]		0,34 [26]	
Gleichstrommotor	1.500	2,3		15 [46]	0,80 [13]		0,11 [26]	
Wechselstrommotor	1.500	2,3		15 [46]	0,52 [13]		0,28 [26]	
Drehstrom-Asynchronmaschine	1.500	2,3		15 [46]	0,73 [13]		0,13 [26]	
Drehstrom-Synchronmaschine	1.500	2,3		15 [46]	0,78 [13]		0,29 [26]	
Verbrennungsmotor	1.500	2,3		30	0,28 [13]		0,03 [26]	
Elektrische-Prozesswärme	1.500	15,0		20	0,94 [13]		0,17 [26]	
Gas-Prozesswärme	1.500	15,0		20	0,63 [13]		0,25 [26]	
Öl-Prozesswärme	1.500	15,0		22	0,63 [13]		0,16 [26]	
Biomasse-Prozesswärme	1.500	15,0		22	0,63 [13]		0,62 [26]	
Fernwärme-Prozesswärme	1.500	15,0		20	0,63 [13]		0,09 [26]	
IKT	1			1	1,00		1,00	

## Anhang C

# Parameter für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse

Table C.1: Parameter der Energiebereitstellung und Beleuchtung für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse.

Bezeichnung	Technologie	MESSAGE-Parameter
Biogaspreis	Biogas-Bereitstellung	var_cost
Biomassepreis	Biomasse-Bereitstellung	var_cost
Dieselpreis	Diesel-Bereitstellung	var_cost
Fernwärmepreis	Fernwärme-Bereitstellung	var_cost
Gaspreis	Gas-Bereitstellung	var_cost
Heizkohlepreis	Heizkohle-Bereitstellung	var_cost
Heizölpreis	Heizöl-Bereitstellung	var_cost
Strompreis	Strom-Bereitstellung	var_cost
Emissionsfaktor Fernwärme <sup>†</sup>	Fernwärme-Bereitstellung	emission_factor
Emissionsfaktor Strom <sup>†</sup>	Strom-Bereitstellung	emission_factor
Glühlampe Inv-Kosten	Glühlampe	inv_cost
Glühlampe Rückbau	Glühlampe	growth_activity_lo
Glühlampe Wachstum	Glühlampe	growth_activity_up
Glühlampe Wirkungsgrad	Glühlampe	input
Halogenlampe Inv-Kosten	Halogenlampe	inv_cost
Halogenlampe Rückbau	Halogenlampe	growth_activity_lo
Halogenlampe Wachstum	Halogenlampe	growth_activity_up
Halogenlampe Wirkungsgrad	Halogenlampe	input
LED-Lampe Inv-Kosten	LED-Lampe	inv_cost
LED-Lampe Rückbau	LED-Lampe	growth_activity_lo
LED-Lampe Wachstum	LED-Lampe	growth_activity_up
LED-Lampe Wirkungsgrad	LED-Lampe	input
Leuchtstofflampe Inv-Kosten	Leuchtstofflampe	inv_cost
Leuchtstofflampe Rückbau	Leuchtstofflampe	growth_activity_lo
Leuchtstofflampe Wachstum	Leuchtstofflampe	growth_activity_up
Leuchtstofflampe Wirkungsgrad	Leuchtstofflampe	input
Natriumdampflampe Inv-Kosten	Natriumdampflampe	inv_cost
Natriumdampflampe Rückbau	Natriumdampflampe	growth_activity_lo
Natriumdampflampe Wachstum	Natriumdampflampe	growth_activity_up
Natriumdampflampe Wirkungsgrad	Natriumdampflampe	input

<sup>†</sup> Parameter werden nur in der Unsicherheitsanalyse berücksichtigt.

Tabelle C.2: Parameter der Wärmebereitstellung für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse.

Bezeichnung	Technologie	MESSAGE-Parameter
BHWK Einspeisevergütung	BHWK-Einspeisung	var_cost
Biogas-BHKW Inv-Kosten	Biogas-BHKW	inv_cost
Biogas-BHKW Rückbau	Biogas-BHKW	growth_activity_lo
Biogas-BHKW Var-Kosten	Biogas-BHKW	var_cost
Biogas-BHKW Wachstum	Biogas-BHKW	growth_activity_up
Biogas-BHKW Wirkungsgrad	Biogas-BHKW	input
Biomassekessel Fix-Kosten	Biomassekessel	fix_cost
Biomassekessel Inv-Kosten	Biomassekessel	inv_cost
Biomassekessel Rückbau	Biomassekessel	growth_activity_lo
Biomassekessel Wachstum	Biomassekessel	growth_activity_up
Biomassekessel Wirkungsgrad	Biomassekessel	input
Elektroheizung Fix-Kosten	Elektroheizung	fix_cost
Elektroheizung Inv-Kosten	Elektroheizung	inv_cost
Elektroheizung Rückbau	Elektroheizung	growth_activity_lo
Elektroheizung Wachstum	Elektroheizung	growth_activity_up
Elektroheizung Wirkungsgrad	Elektroheizung	input
Erdwärmepumpe Fix-Kosten	Erdwärmepumpe	fix_cost
Erdwärmepumpe Inv-Kosten	Erdwärmepumpe	inv_cost
Erdwärmepumpe Potenzial	Erdwärmepumpe	bound_new_capacity_up
Erdwärmepumpe Wachstum	Erdwärmepumpe	growth_activity_up
Erdwärmepumpe Wirkungsgrad	Erdwärmepumpe	input
Fernwärme Fix-Kosten	Fernwärme	fix_cost
Fernwärme Inv-Kosten	Fernwärme	inv_cost
Fernwärme Rückbau	Fernwärme	growth_activity_lo
Fernwärme Wachstum	Fernwärme	growth_activity_up
Fernwärme Wirkungsgrad	Fernwärme	input
Gas-BHKW Inv-Kosten	Gas-BHKW	inv_cost
Gas-BHKW Rückbau	Gas-BHKW	growth_activity_lo
Gas-BHKW Var-Kosten	Gas-BHKW	var_cost
Gas-BHKW Wachstum	Gas-BHKW	growth_activity_up
Gas-BHKW Wirkungsgrad	Gas-BHKW	input
Gasheizkessel (BW) Fix-Kosten	Gasheizkessel (BW)	fix_cost
Gasheizkessel (BW) Inv-Kosten	Gasheizkessel (BW)	inv_cost
Gasheizkessel (BW) Potenzial	Gasheizkessel (BW)	bound_new_capacity_up
Gasheizkessel (BW) Rückbau	Gasheizkessel (BW)	growth_activity_lo
Gasheizkessel (BW) Wachstum	Gasheizkessel (BW)	growth_activity_up
Gasheizkessel (BW) Wirkungsgrad	Gasheizkessel (BW)	input
Gasheizkessel (NT) Fix-Kosten	Gasheizkessel (NT)	fix_cost
Gasheizkessel (NT) Inv-Kosten	Gasheizkessel (NT)	inv_cost
Gasheizkessel (NT) Rückbau	Gasheizkessel (NT)	growth_activity_lo
Gasheizkessel (NT) Wirkungsgrad	Gasheizkessel (NT)	input
Kohlekessel Fix-Kosten	Kohlekessel	fix_cost
Kohlekessel Inv-Kosten	Kohlekessel	inv_cost
Kohlekessel Rückbau	Kohlekessel	growth_activity_lo
Kohlekessel Wirkungsgrad	Kohlekessel	input
Luftwärmepumpe Fix-Kosten	Luftwärmepumpe	fix_cost
Luftwärmepumpe Inv-Kosten	Luftwärmepumpe	inv_cost
Luftwärmepumpe Potenzial	Luftwärmepumpe	bound_new_capacity_up
Luftwärmepumpe Wachstum	Luftwärmepumpe	growth_activity_up
Luftwärmepumpe Wirkungsgrad	Luftwärmepumpe	input
Öl-BHKW Inv-Kosten	Öl-BHKW	inv_cost
Öl-BHKW Rückbau	Öl-BHKW	growth_activity_lo
Öl-BHKW Var-Kosten	Öl-BHKW	var_cost
Öl-BHKW Wachstum	Öl-BHKW	growth_activity_up
Öl-BHKW Wirkungsgrad	Öl-BHKW	input
Ölheizkessel (BW) Fix-Kosten	Ölheizkessel (BW)	fix_cost
Ölheizkessel (BW) Inv-Kosten	Ölheizkessel (BW)	inv_cost
Ölheizkessel (BW) Rückbau	Ölheizkessel (BW)	growth_activity_lo
Ölheizkessel (BW) Wirkungsgrad	Ölheizkessel (BW)	input
Ölheizkessel (NT) Fix-Kosten	Ölheizkessel (NT)	fix_cost
Ölheizkessel (NT) Inv-Kosten	Ölheizkessel (NT)	inv_cost
Ölheizkessel (NT) Rückbau	Ölheizkessel (NT)	growth_activity_lo
Ölheizkessel (NT) Wirkungsgrad	Ölheizkessel (NT)	input
Solarthermie Fix-Kosten	Solarthermie	fix_cost
Solarthermie Inv-Kosten	Solarthermie	inv_cost
Solarthermie Potential	Solarthermie	bound_new_capacity_up
Solarthermie Wachstum	Solarthermie	growth_activity_up

Tabelle C.3: Parameter der Klima- und Prozesskälte, mechanischen Energie und Prozesswärme für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse.

Bezeichnung	Technologie	MESSAGE-Parameter
dezentrale Split-Klimageräte Fix-Kosten	dezentrale Split-Klimageräte	fix_cost
dezentrale Split-Klimageräte Inv-Kosten	dezentrale Split-Klimageräte	inv_cost
dezentrale Split-Klimageräte Wachstum	dezentrale Split-Klimageräte	growth_activity_up
dezentrale Split-Klimageräte Wachstum Initial	dezentrale Split-Klimageräte	initial_activity_up
dezentrale Split-Klimageräte Wirkungsgrad	dezentrale Split-Klimageräte	input
Gasmotor-Wärmepumpe Fix-Kosten	Gasmotor-Wärmepumpe	fix_cost
Gasmotor-Wärmepumpe Inv-Kosten	Gasmotor-Wärmepumpe	inv_cost
Gasmotor-Wärmepumpe Rückbau	Gasmotor-Wärmepumpe	growth_activity_lo
Gasmotor-Wärmepumpe Wachstum	Gasmotor-Wärmepumpe	growth_activity_up
Gasmotor-Wärmepumpe Wachstum Initial	Gasmotor-Wärmepumpe	initial_activity_up
Gasmotor-Wärmepumpe Wirkungsgrad	Gasmotor-Wärmepumpe	input
mobile Klimakleingeräte Fix-Kosten	mobile Klimakleingeräte	fix_cost
mobile Klimakleingeräte Inv-Kosten	mobile Klimakleingeräte	inv_cost
mobile Klimakleingeräte Wachstum	mobile Klimakleingeräte	growth_activity_up
mobile Klimakleingeräte Wachstum Initial	mobile Klimakleingeräte	initial_activity_up
mobile Klimakleingeräte Wirkungsgrad	mobile Klimakleingeräte	input
zentrale Klimaanlage Fix-Kosten	zentrale Klimaanlage	fix_cost
zentrale Klimaanlage Inv-Kosten	zentrale Klimaanlage	inv_cost
zentrale Klimaanlage Wachstum	zentrale Klimaanlage	growth_activity_up
zentrale Klimaanlage Wachstum Initial	zentrale Klimaanlage	initial_activity_up
zentrale Klimaanlage Wirkungsgrad	zentrale Klimaanlage	input
Gaskältemaschine Fix-Kosten	Gaskältemaschine	fix_cost
Gaskältemaschine Inv-Kosten	Gaskältemaschine	inv_cost
Gaskältemaschine Wachstum	Gaskältemaschine	growth_activity_up
Gaskältemaschine Wachstum Initial	Gaskältemaschine	initial_activity_up
Gaskältemaschine Wirkungsgrad	Gaskältemaschine	input
Kompressionskältemaschine Fix-Kosten	Kompressionskältemaschine	fix_cost
Kompressionskältemaschine Inv-Kosten	Kompressionskältemaschine	inv_cost
Kompressionskältemaschine Rückbau	Kompressionskältemaschine	growth_activity_lo
Kompressionskältemaschine Wachstum	Kompressionskältemaschine	growth_activity_up
Kompressionskältemaschine Wachstum Initial	Kompressionskältemaschine	initial_activity_up
Kompressionskältemaschine Wirkungsgrad	Kompressionskältemaschine	input
Drehstrom-Asynchronmaschine Rückbau	Drehstrom-Asynchronmaschine	growth_activity_lo
Drehstrom-Asynchronmaschine Wachstum	Drehstrom-Asynchronmaschine	growth_activity_up
Drehstrom-Asynchronmaschine Wirkungsgrad	Drehstrom-Asynchronmaschine	input
Drehstrom-Synchronmaschine Rückbau	Drehstrom-Asynchronmaschine	growth_activity_lo
Drehstrom-Synchronmaschine Wachstum	Drehstrom-Asynchronmaschine	growth_activity_up
Drehstrom-Synchronmaschine Wirkungsgrad	Drehstrom-Asynchronmaschine	input
Gleichstrommotor Rückbau	Gleichstrommotor	growth_activity_lo
Gleichstrommotor Wachstum	Gleichstrommotor	growth_activity_up
Gleichstrommotor Wirkungsgrad	Gleichstrommotor	input
Verbrennungsmotor Rückbau	Verbrennungsmotor	growth_activity_lo
Verbrennungsmotor Wachstum	Verbrennungsmotor	growth_activity_up
Verbrennungsmotor Wirkungsgrad	Verbrennungsmotor	input
Wechselstrommotor Rückbau	Wechselstrommotor	growth_activity_lo
Wechselstrommotor Wachstum	Wechselstrommotor	growth_activity_up
Wechselstrommotor Wirkungsgrad	Wechselstrommotor	input
Biomasse-Prozesswärme Rückbau	Biomasse-Prozesswärme	growth_activity_lo
Biomasse-Prozesswärme Wachstum	Biomasse-Prozesswärme	growth_activity_up
Biomasse-Prozesswärme Wirkungsgrad	Biomasse-Prozesswärme	input
Elektrische-Prozesswärme Rückbau	Elektrische-Prozesswärme	growth_activity_lo
Elektrische-Prozesswärme Wachstum	Elektrische-Prozesswärme	growth_activity_up
Elektrische-Prozesswärme Wirkungsgrad	Elektrische-Prozesswärme	input
Fernwärme-Prozesswärme Rückbau	Fernwärme-Prozesswärme	growth_activity_lo
Fernwärme-Prozesswärme Wachstum	Fernwärme-Prozesswärme	growth_activity_up
Fernwärme-Prozesswärme Wirkungsgrad	Fernwärme-Prozesswärme	input
Gas-Prozesswärme Rückbau	Gas-Prozesswärme	growth_activity_lo
Gas-Prozesswärme Wachstum	Gas-Prozesswärme	growth_activity_up
Gas-Prozesswärme Wirkungsgrad	Gas-Prozesswärme	input
Öl-Prozesswärme Rückbau	Öl-Prozesswärme	growth_activity_lo
Öl-Prozesswärme Wirkungsgrad	Öl-Prozesswärme	input



# Anhang D

## Akronyme

**AGEB** Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.

**BHKW** Blockheizkraftwerk

**BIP** Bruttoinlandsprodukt

**CORDEX** Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

**DWD** Deutscher Wetterdienst

**GAMS** General Algebraic Modeling System

**GEA** Global Energy Assessment

**GHD** Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

**IAM** Integrated Assessment Model

**IIASA** International Institute for Applied Systems Analysis

**IKT** Informations- und Kommunikationstechnologie

**IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change

**LP** lineare Programmierung

**MESSAGE** Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact

**OAT** One-at-a-Time

**RCP** repräsentative Konzentrationspfade (engl. Representative Concentration Pathways)

**RES** Referenzenergiesystem (engl. Reference Energy System)

**SSP** Shared Socioeconomic Pathway

**WACC** Weighted Average Cost of Capital

**WCRP** World Climate Research Programme

**YAML** Yet Another Multicolumn Layout



# Literatur

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change. *The Paris Agreement*. 22. Okt. 2015.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). *Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin, 1. Nov. 2016, S. 92.
- [3] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2017*. Juli 2018.
- [4] R. Harthan u. a. *Sektorale Abgrenzung der deutschen Treibhausgasemissionen mit einem Schwerpunkt auf die verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen*. Arbeitspapier. Berlin: Öko-Institut e.V, Okt. 2017.
- [5] K. Wohlfarth u. a. *Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie*. Bericht. 2016.
- [6] S. Pfenninger, A. Hawkes und J. Keirstead. „Energy Systems Modeling for Twenty-First Century Energy Challenges“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (1. Mai 2014), S. 74–86. ISSN: 1364-0321. DOI: [10.1016/j.rser.2014.02.003](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.003).
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). *Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende - Die Energie der Zukunft*. Berichtsjahr 2016. Berlin, Juni 2018, S. 194.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). *Klimaschutzbericht 2018 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung*. 6. Feb. 2019.
- [9] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2017*. Juli 2019.
- [10] Umweltbundesamt. *Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen*. 30. Apr. 2019. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren> (besucht am 30.04.2019).
- [11] B. Schlomann u. a. *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013*. Schlussbericht. Feb. 2015.
- [12] Statistisches Bundesamt (Destatis). *Klassifikation der Wirtschaftszweige*. 2008.

- [13] D. A. Kemmler u. a. *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014*. Abschlussbericht 01/2017. Dessau-Roßlau: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Jan. 2017, S. 314.
- [14] H.-J. Ziesing u. a. *Energie in Zahlen: Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen*. OCLC: 906058439. Berlin: AG Energiebilanzen e. V., 2012. ISBN: 978-3-9814271-2-7.
- [15] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. *Bilanzen 1990-2016*. 2019. URL: <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.html> (besucht am 14.05.2019).
- [16] B. Geiger, H. Kleeberger und L. Hardi. *Erstellen der Anwendungsbilanzen 2013 bis 2017 für den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)*. Okt. 2018.
- [17] Statistisches Bundesamt (Destatis), Hrsg. *Datenreport 2018: ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung, 2018. 461 S. ISBN: 978-3-8389-7179-7.
- [18] Statistisches Bundesamt (Destatis). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Inlandsproduktberechnung Lange Reihen ab 1970*. 2017.
- [19] Umweltbundesamt. *Energieproduktivität*. 3. Mai 2019. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieproduktivitaet> (besucht am 03.05.2019).
- [20] Wissenschaftlichen Dienst des Deutschen Bundestags. *Verlauf der Finanzkrise - Entstehungsgründe, Verlauf und Gegenmaßnahmen*. Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags. Deutscher Bundestag, 11. Mai 2009.
- [21] W. Koehrsen. *Visualizing Data with Pairs Plots in Python*. 6. Apr. 2018. URL: <https://towardsdatascience.com/visualizing-data-with-pair-plots-in-python-f228cf529166> (besucht am 08.05.2019).
- [22] M. Waskom u. a. *Seaborn: Statistical Data Visualization*. 16. Juli 2018. URL: <https://seaborn.pydata.org/index.html> (besucht am 08.05.2019).
- [23] M. Wietschel u. a. *Energietechnologien 2050: Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*. ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale. Stuttgart: Fraunhofer Verl, 2010. ISBN: 978-3-8396-0102-0.
- [24] D. Huppmann u. a. „The MESSAGE Integrated Assessment Model and the Ix Modeling Platform (Ixmp): An Open Framework for Integrated and Cross-Cutting Analysis of Energy, Climate, the Environment, and Sustainable Development“. In: *Environmental Modelling & Software* 112 (Feb. 2019), S. 143–156. ISSN: 13648152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2018.11.012](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.11.012).
- [25] G. Strandberg u. a. *CORDEX Scenarios for Europe from the Rossby Centre Regional Climate Model RCA4*. 1. Jan. 2014.
- [26] I. Walch. „Erhebung des historischen Technologiebestandes im Sektor GHD als Input für MESSAGEix“. Seminararbeit (unveröffentlicht). Betreuer: T. Zipperle. München: Technische Universität München, März 2019. 46 S.
- [27] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. *BHKW-Kenndaten 2014/2015*. 2015.

- [28] B. Schlomann u. a. *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010: Sonderbericht zu erneuerbaren Energien im Sektor GHD*. Sonderbericht. Karlsruhe, München, Nürnberg, März 2013, S. 119.
- [29] S. Gores u. a. *KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit der Anreize im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten*. Abschlussbericht. Dessau-Roßlau, Feb. 2014.
- [30] S. Gores, W. Jörß und C. Zell-Ziegler. *Aktueller Stand der KWK-Erzeugung (Dezember 2015)*. Studie. 17. Dez. 2015.
- [31] Fachverband Biogas e.V. *Branchenzahlen 2017 und Prognose der Branchenentwicklung 2018*. Mai 2018.
- [32] M. Beer u. a. *CO<sub>2</sub>-Verminderung in Deutschland Endbericht*. München: FfE, 2009. ISBN: 978-3-941802-02-5.
- [33] B. Schlomann u. a. *Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)*. Abschlussbericht. Apr. 2004.
- [34] H. Kleeberger, P. Tzscheutschler und B. Geiger. *Erstellen der Anwendungsbilanz 2009 und 2010 für den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)*. Sep. 2011.
- [35] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V. *Marktentwicklung Wärmeerzeuger 2005-2015*. 2016.
- [36] M. Hofmeister und M. Guddat. *Techno-Economic Projections until 2050 for Smaller Heating and Cooling Technologies in the Residential and Tertiary Sectors in the EU*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. ISBN: 978-92-79-76014-3.
- [37] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V. *Entwicklung des Heizungsmarkts: Strukturentwicklung Wärmeerzeuger 1998-2008*. 2009.
- [38] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. *BWP-Branchenstudie 2015 Szenarien und politische Handlungsempfehlungen*. 2015.
- [39] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. *Absatzzahlen von Warmwasserwärmepumpen in Deutschland von 2010-2016*. 2017.
- [40] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. *Absatzzahlen von Wärmepumpen*. 12. Mai 2019. URL: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatzzahlen/> (besucht am 13.05.2019).
- [41] C. Fiedler, S. Greif und T. Schmid. „Oberflächennahe Geothermie im außerstädtischen Wohngebäudebestand Potenzialanalyse zur Nutzung von Erdwärmepumpen im Gebäudebestand“. In: *BWK 7/8* (2018), S. 10–14. ISSN: 0006-9612.
- [42] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. März 2016.
- [43] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2016*. Sep. 2017.

- [44] B. Schlomann u. a. *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Endbericht. Karlsruhe, München, Nürnberg, März 2013.
- [45] G. Wemmer. (Lehrbeauftragter für Lichttechnik, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München) „Re: Typische Kosten und Eigenschaften von Beleuchtungsanlage“. E-Mail an T. Zipperle. E-mail. 15. Mai 2019.
- [46] G. Volz. *Infoblätter Fördertechnik: Elektrische Motoren und Antriebssysteme*. 2007.
- [47] Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung. *Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft*. 2017.
- [48] H. Lampel. *Landwirtschaftliches Tagebuch 2007: Was sagen die Leistungsdaten eines Traktormotors aus*. 2007.
- [49] VDMA e. V. *Traktoren-Zulassungen in Deutschland Gesamtzahl\* nach Klassen*. 2018.
- [50] Deutscher Bauernverband e.V. *Anzahl der neu zugelassenen Traktoren in Deutschland in den Jahren 2006 bis 2018\**. 2019.
- [51] W. Schellong. *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 978-3-662-49463-9. DOI: [10.1007/978-3-662-49463-9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49463-9).
- [52] S. C. Bhattacharyya und G. R. Timilsina. *Energy Demand Models for Policy Formulation : A Comparative Study of Energy Demand Models*. 2009.
- [53] L. Suganthi und A. A. Samuel. „Energy Models for Demand Forecasting—A Review“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.2 (Feb. 2012), S. 1223–1240. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2011.08.014](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.014).
- [54] P. Fortes u. a. „Integrated Technological-Economic Modeling Platform for Energy and Climate Policy Analysis“. In: *Energy* 73 (Aug. 2014), S. 716–730. ISSN: 03605442. DOI: [10.1016/j.energy.2014.06.075](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.075).
- [55] J. N. Swisher, G. de Martino Jannuzzi und R. Y. Redlinger. *Tools and Methods for Integrated Resource Planning: Improving Energy Efficiency and Protecting the Environment*. OCLC: 915945842. Conpenhague: UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment Riso National Laboratory, 1997. ISBN: 978-87-550-2332-1.
- [56] J. P. Gouveia, P. Fortes und J. Seixas. „Projections of Energy Services Demand for Residential Buildings: Insights from a Bottom-up Methodology“. In: *Energy*. Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011 47.1 (1. Nov. 2012), S. 430–442. ISSN: 0360-5442. DOI: [10.1016/j.energy.2012.09.042](https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.042).
- [57] V. Bianco, O. Manca und S. Nardini. „Electricity Consumption Forecasting in Italy Using Linear Regression Models“. In: *Energy* 34.9 (Sep. 2009), S. 1413–1421. ISSN: 03605442. DOI: [10.1016/j.energy.2009.06.034](https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.034).
- [58] M. Braun, H. Altan und S. Beck. „Using Regression Analysis to Predict the Future Energy Consumption of a Supermarket in the UK“. In: *Applied Energy* 130 (Okt. 2014), S. 305–313. ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2014.05.062](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.062).

- [59] F. Denton, D. Mountain und B. Spencer. *A Model of Energy Demand in the US Commercial Sector with Declining Rate Schedule*. QSEP Research Report No. 346. Kanada: McMaster University, Feb. 2000.
- [60] M. Schlesinger u. a. *Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose*. Endbericht. Juni 2014, S. 583.
- [61] P. Gerbert u. a. *Klimapfade für Deutschland*. The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos, 2018.
- [62] J. Repenning u. a. *Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht*. Endbericht. Berlin, 2015.
- [63] Global Administrative Areas. *GADM Database of Global Administrative Areas - Version 3.6*. 6. Mai 2018. URL: [https://gadm.org/download\\_country\\_v3.html](https://gadm.org/download_country_v3.html).
- [64] Statistisches Bundesamt (Destatis). *Bevölkerungsentwicklung in den Bundesländern bis 2060*. 2015.
- [65] U.S. Energy Information Administration (eia). *Short-Term Energy Outlook Supplement: Change in Regional and U.S. Degree-Day Calculations*. 11. Sep. 2012.
- [66] VDI-Richtlinie 3807. *Verbrauchskennwerte für Gebäude*. Juni 2013.
- [67] H.-J. Bungartz u. a. *Modellbildung und Simulation*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 400 S. ISBN: 978-3-642-37656-6.
- [68] B. Müller, F. Gardumi und L. Hülk. „Comprehensive Representation of Models for Energy System Analyses: Insights from the Energy Modelling Platform for Europe (EMP-E) 2017“. In: *Energy Strategy Reviews* 21 (Aug. 2018), S. 82–87. ISSN: 2211467X. DOI: [10.1016/j.esr.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.03.006).
- [69] S. Pfenninger u. a. „The Importance of Open Data and Software: Is Energy Research Lagging Behind?“ In: *Energy Policy* 101 (Feb. 2017), S. 211–215. ISSN: 03014215. DOI: [10.1016/j.enpol.2016.11.046](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.046).
- [70] H.-K. Ringkjøb, P. M. Haugan und I. M. Solbrekke. „A Review of Modelling Tools for Energy and Electricity Systems with Large Shares of Variable Renewables“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96 (1. Nov. 2018), S. 440–459. ISSN: 1364-0321. DOI: [10.1016/j.rser.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002).
- [71] L. M. H. Hall und A. R. Buckley. „A Review of Energy Systems Models in the UK: Prevalent Usage and Categorisation“. In: *Applied Energy* 169 (1. Mai 2016), S. 607–628. ISSN: 0306-2619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.02.044](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.044).
- [72] IIASA Energy Program. *The Integrated Assessment and Energy Systems Model MESSAGEix: liasa/Message\_ix*. 9. Mai 2019. URL: [https://github.com/iiasa/message\\_ix](https://github.com/iiasa/message_ix) (besucht am 20.05.2019).
- [73] S. Messner und L. Schrattenholzer. „MESSAGE–MACRO: Linking an Energy Supply Model with a Macroeconomic Module and Solving It Iteratively“. In: *Energy* 25.3 (März 2000), S. 267–282. ISSN: 03605442. DOI: [10.1016/S0360-5442\(99\)00063-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00063-8).
- [74] T. B. Johansson u. a., Hrsg. *Global Energy Assessment (GEA)*. Cambridge : Laxenburg, Austria: Cambridge University Press ; International Institute for Applied Systems Analysis, 2012. 1865 S. ISBN: 978-1-107-00519-8.

- [75] K. Riahi u. a. „RCP 8.5—A Scenario of Comparatively High Greenhouse Gas Emissions“. In: *Climatic Change* 109.1 (13. Aug. 2011), S. 33. ISSN: 1573-1480. DOI: [10.1007/s10584-011-0149-y](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y).
- [76] O. Fricko u. a. „The Marker Quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A Middle-of-the-Road Scenario for the 21st Century“. In: *Global Environmental Change* 42 (Jan. 2017), S. 251–267. ISSN: 09593780. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004).
- [77] S. Messner und M. Strubegger. *User's Guide for MESSAGE III*. IIASA Working Paper. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Juli 1995.
- [78] GAMS Development Corporation. *General Algebraic Modeling System (GAMS) Release 27.1.0*. 2019.
- [79] IIASA Energy Program. *The Ix Modeling Platform for Integrated and Cross-Cutting Scenario Analysis: liasa/ixmp*. 3. Mai 2019. URL: <https://github.com/iiasa/ixmp> (besucht am 21.05.2019).
- [80] L. Suhl und T. Mellouli. *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 978-3-642-38937-5. DOI: [10.1007/978-3-642-38937-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38937-5).
- [81] S. P. Boyd und L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2004. 716 S. ISBN: 978-0-521-83378-3.
- [82] M. Beller. „Reference Energy System Methodology“. In: 81. National Meeting of the American Institute of Chemical Engineers. Kansas City, MO, USA, 1. Apr. 1976.
- [83] J. Dorfner. „Open Source Modelling and Optimisation of Energy Infrastructure at Urban Scale“. Technische Universität München. München: Technische Universität München, 2016.
- [84] C. Schlenzig. „PlaNet : ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 1998.
- [85] IIASA Energy Program. *The Integrated Assessment and Energy Systems Model MESSAGEix: liasa/Message\_ix: Tutorials*. 9. Mai 2019. URL: [https://github.com/iiasa/message\\_ix/blob/master/tutorial/westeros/westeros\\_baseline.ipynb](https://github.com/iiasa/message_ix/blob/master/tutorial/westeros/westeros_baseline.ipynb) (besucht am 19.05.2019).
- [86] Python Software Foundation. *Python Language Reference, Version 3.7*. 2019. URL: <https://www.python.org/> (besucht am 27.05.2019).
- [87] T. Zipperle und C. L. Orthofer. „d2ix: A Model Input-Data Management and Analysis Tool for MESSAGEix“. In: *Energies* 12.8 (18. Apr. 2019), S. 1483. ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en12081483](https://doi.org/10.3390/en12081483).
- [88] T. Zipperle und C. L. Orthofer. *d2ix: A Model Input-Data Management and Analysis Tool for MESSAGEix: tum-ewk/d2ix*. 23. Apr. 2019. URL: <https://github.com/tum-ewk/d2ix> (besucht am 24.05.2019).
- [89] W. McKinney. „Data Structures for Statistical Computing in Python“. In: *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. 9th Python in Science Conference. Hrsg. von S. van der Walt und J. Millman. Austin, Texas, USA, 2010, S. 51–56.

- [90] S. van der Walt, S. C. Colbert und G. Varoquaux. „The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation“. In: *Computing in Science & Engineering* 13.2 (März 2011), S. 22–30. ISSN: 1521-9615. DOI: [10.1109/MCSE.2011.37](https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.37).
- [91] S. Hoyer und J. J. Hamman. „Xarray: N-D Labeled Arrays and Datasets in Python“. In: *Journal of Open Research Software* 5 (5. Apr. 2017), S. 10. ISSN: 2049-9647. DOI: [10.5334/jors.148](https://doi.org/10.5334/jors.148).
- [92] J. D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. ISSN: 1521-9615. DOI: [10.1109/MCSE.2007.55](https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55).
- [93] J. Herman und W. Usher. „SALib: An Open-Source Python Library for Sensitivity Analysis“. In: *The Journal of Open Source Software* 2.9 (10. Jan. 2017), S. 97. ISSN: 2475-9066. DOI: [10.21105/joss.00097](https://doi.org/10.21105/joss.00097).
- [94] J. Feinberg und H. P. Langtangen. „Chaospypy: An Open Source Tool for Designing Methods of Uncertainty Quantification“. In: *Journal of Computational Science* 11 (Nov. 2015), S. 46–57. ISSN: 18777503. DOI: [10.1016/j.jocs.2015.08.008](https://doi.org/10.1016/j.jocs.2015.08.008).
- [95] IBM. *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. 2019.
- [96] L. Torvalds. *Git*. 2005. URL: <https://git-scm.com/> (besucht am 27.05.2019).
- [97] GitHub, Inc. *Build Software Better, Together*. 2019. URL: <https://github.com> (besucht am 27.05.2019).
- [98] Travis CI GmbH. *Travis CI - Test and Deploy Your Code with Confidence*. 2019. URL: <https://docs.travis-ci.com/> (besucht am 27.05.2019).
- [99] Docker, Inc. *Docker Documentation*. 2019. URL: <https://docs.docker.com/> (besucht am 27.05.2019).
- [100] T. Ziade und I. Cordasco. *Flake8: Your Tool For Style Guide Enforcement*. 2019. URL: <http://flake8.pycqa.org> (besucht am 27.05.2019).
- [101] J. Lehtosalo. *Mypy - Optional Static Typing for Python*. 2019. URL: <http://www.mypy-lang.org/> (besucht am 27.05.2019).
- [102] H. Krekel u. a. *Pytest 4.5*. 2004. URL: <https://github.com/pytest-dev/pytest> (besucht am 27.05.2019).
- [103] F. Völkl. *Energieversorgung im Gewerbebereich. Interview wurde geführt mit: Dipl.-Ing. Franz Völkl. Projektingenieur bei Bayernwerk Natur*. 23. Nov. 2018.
- [104] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). *Energiedaten: Gesamtausgabe*. Aug. 2018.
- [105] B. Schmitt, D. Ritter und F. Giovannetti. *Solare Prozesswärme - Mit Solarthermie in Industrie und Gewerbe unterstützen*. 2017.
- [106] F. Böing und A. Regett. „Hourly CO2 Emission Factors and Marginal Costs of Energy Carriers in Future Multi-Energy Systems“. In: *Energies* 12.12 (13. Juni 2019), S. 2260. ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en12122260](https://doi.org/10.3390/en12122260).
- [107] H. S. Eggleston u. a. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. OCLC: 192005769. 2006. ISBN: 978-4-88788-032-0.

- [108] F. Giovannetti u. a. *Technologiebericht 1.4 Solare Wärme und Kälte*. Technologiebericht. Wuppertal Institut, ISI, IZES, 2018, S. 61.
- [109] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. *Branchenstudie 2018: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen*. 4. Dez. 2018.
- [110] D. T. Luc. „Pareto Optimality“. In: *Pareto Optimality, Game Theory And Equilibria*. Hrsg. von A. Chinchuluun u. a. Bearb. von P. M. Pardalos. Bd. 17. New York, NY: Springer New York, 2008, S. 481–515. ISBN: 978-0-387-77247-9. DOI: [10.1007/978-0-387-77247-9\\_18](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77247-9_18).
- [111] I. Wernicke und D. Jochen. *Methodische Änderungen in der Energiebilanz 2012*. Mai 2014.
- [112] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. *Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland*. Nov. 2005.
- [113] Handelsverband Deutschland (HDE). *Handelsreport Lebensmittel - Fakten zum Lebensmitteleinzelhandel*. 2018.
- [114] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. März 2019.
- [115] W. Usher. „The Value of Learning about Critical Energy System Uncertainties“. Dissertation. London (UK): University College London, 20. Juli 2016.
- [116] S. Tennøe, G. Halmes und G. T. Einevoll. „Uncertainpy: A Python Toolbox for Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis in Computational Neuroscience“. In: *Frontiers in Neuroinformatics* 12 (14. Aug. 2018). ISSN: 1662-5196. DOI: [10.3389/fninf.2018.00049](https://doi.org/10.3389/fninf.2018.00049).
- [117] A. Saltelli, Hrsg. *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. Hoboken, NJ: Wiley, 2004. 219 S. ISBN: 978-0-470-87093-8.
- [118] A. Saltelli, Hrsg. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. OCLC: ocn180852094. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley, 2008. 292 S. ISBN: 978-0-470-05997-5.
- [119] D. M. Hamby. „A Review of Techniques for Parameter Sensitivity Analysis of Environmental Models“. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 32.2 (Sep. 1994), S. 135–154. ISSN: 1573-2959. DOI: [10.1007/BF00547132](https://doi.org/10.1007/BF00547132).
- [120] I. M. Sobol'. „On Sensitivity Estimation for Nonlinear Mathematical Models“. In: *Matematičeskoe Modelirovanie* 2 (1990), S. 112–118. ISSN: 0234-0879.
- [121] M. Flechsig u. a. *The Multi-Run Simulation Environment SimEnv: User Guide for Version 3.01*. 10. Juli 2012.
- [122] A. Saltelli und P. Annoni. „How to Avoid a Perfunctory Sensitivity Analysis“. In: *Environmental Modelling & Software* 25.12 (Dez. 2010), S. 1508–1517. ISSN: 13648152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2010.04.012](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.012).
- [123] M. D. Morris. „Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments“. In: *Technometrics* 33.2 (Mai 1991), S. 161–174. ISSN: 0040-1706, 1537-2723. DOI: [10.1080/00401706.1991.10484804](https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804).

- [124] F. Campolongo, J. Cariboni und A. Saltelli. „An Effective Screening Design for Sensitivity Analysis of Large Models“. In: *Environmental Modelling & Software* 22.10 (Okt. 2007), S. 1509–1518. ISSN: 13648152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2006.10.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.10.004).
- [125] A. D. Kiureghian und O. Ditlevsen. „Aleatory or Epistemic? Does It Matter?“ In: *Structural Safety* 31.2 (März 2009), S. 105–112. ISSN: 01674730. DOI: [10.1016/j.strusafe.2008.06.020](https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020).
- [126] C. Lemieux. *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Sampling*. Springer Series in Statistics. OCLC: 305125383. New York: Springer, 2009. 373 S. ISBN: 978-0-387-78165-5.
- [127] L. Kocis und W. J. Whiten. „Computational Investigations of Low-Discrepancy Sequences“. In: *ACM Transactions on Mathematical Software* 23.2 (1. Juni 1997), S. 266–294. ISSN: 00983500. DOI: [10.1145/264029.264064](https://doi.org/10.1145/264029.264064).
- [128] A. McMurray, T. Pearson und F. Casarim. *Guidance on Applying the Monte Carlo Approach to Uncertainty Analyses in Forestry and Greenhouse Gas Accounting*. 2017.
- [129] V. Krey und K. Riahi. *Risk Hedging Strategies under Energy System and Climate Policy Uncertainties*. Interim Report IR-09-028. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2009.
- [130] G. Bourgault. „Uncertainty Correlation and Monte Carlo Sampling in LCA“. LCA XV International Conference (Vancouver, Canada). 7. Okt. 2015.
- [131] D. Garcia Sanchez u. a. „Application of Sensitivity Analysis in Building Energy Simulations: Combining First- and Second-Order Elementary Effects Methods“. In: *Energy and Buildings* 68 (Jan. 2014), S. 741–750. ISSN: 03787788. DOI: [10.1016/j.enbuild.2012.08.048](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.048).
- [132] T. Fleiter, J. Steinbach und M. Ragwitz. *Mapping and Analyses of the Current and Future (2020 - 2030) Heating/Cooling Fuel Deployment (Fossil/Renewables)*. Abschlussbericht. European Commission, Sep. 2016.
- [133] B. Pfluger, B. Tersteegen und B. Franke. *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Studie. Sep. 2017.
- [134] C. Heinrich u. a. *Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie*. Abschlussbericht. Dessau-Roßlau: Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Juli 2014.