

TEXTE

138/2022

Abschlussbericht

Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger im Bereich erneuerbare Wärme

**Analyse von Substitutionsfaktoren,
Jahresnutzungsgrade und Hilfsenergie**

von:

Dr. Sara Ortner, Dr. Martin Pehnt
ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg

Friedrich Seefeldt, Dominik Rau, Malek Sahnoun, Karsten Weinert
Prognos AG, Berlin

Dr. Bernadetta Winiewska, Prof. Dr. Bert Oschatz
ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung, Dresden

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 138/2022

EVUPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und
Klimaschutz

Forschungskennzahl 37EV 18 104 0

FB000826

Abschlussbericht

Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger im Bereich erneuerbare Wärme

Analyse von Substitutionsfaktoren, Jahresnutzungsgrade
und Hilfsenergie

von

Dr. Sara Ortner, Dr. Martin Pehnt
ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Friedrich Seefeldt, Dominik Rau, Malek Sahnoun, Karsten
Weinert
Prognos AG, Berlin

Dr. Bernadetta Winiewska, Prof. Dr. Bert Oschatz
ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung, Dresden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

Oktober 2021

Redaktion:

Fachgebiet V 1.5 Energieversorgung und –daten, Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe
Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)
Dr. Thomas Lauf

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger im Bereich erneuerbare Wärme

Das Umweltbundesamt (UBA) erstellt jährlich die Emissionsbilanz für erneuerbare Energien, die ausweist wie viel Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Erneuerbaren in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr eingespart wurden. Die Berechnung fußt auf den Energieverbräuchen, die durch die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) ermittelt werden und wird kontinuierlich weiterentwickelt.

Fokus im vorliegenden Forschungsvorhaben lag auf der Untersuchung zur Weiterentwicklung im Bereich erneuerbare Wärme. Ziel ist es, Substitutionsfaktoren für die verschiedenen Erneuerbaren abzuleiten und für verschiedene Technologien auf Basis von Literaturrecherche die den aktuellen Analysen zugrundeliegenden Nutzungsgrade zu aktualisieren und den notwendigen Hilfsenergieeinsatz zu bestimmen. Gemeinsam mit Informationen hinsichtlich der Emissionsfaktoren der verschiedenen Energieträger lassen sich somit die eingesparten Emissionen quantifizieren.

Abstract: Analysis on the further development of the emission balance of renewable energy sources in the field of renewable heat

The German Environment Agency (UBA) publishes an annual emissions balance for renewable energies, which shows how much greenhouse gas emissions have been saved through the use of renewables in the electricity, heating and transport sectors. The calculation is based on the energy consumptions determined by the Working Group on Renewable Energy Statistics (AGEE-Stat) and is continuously developed further.

The focus of the present research project was on the investigation of further development in the area of renewable heat. The aim is to derive substitution factors for the various renewables and to update the utilisation rates underlying the current analyses for various technologies on the basis of literature research and to determine the necessary auxiliary energy input. Together with information regarding the emission factors of the various energy sources, the emissions saved can thus be quantified.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis.....	16
Zusammenfassung.....	17
Summary	20
1 Einleitung.....	23
2 Substitutionsfaktoren.....	24
2.1 Zielsetzung und methodische Vorüberlegungen	24
2.1.1 Aktuelle Methode der Emissionsbilanzierung	25
2.1.2 Möglichkeiten zur Quantifizierung von Substitutionsfaktoren	25
2.2 Substitutionsfaktoren in Haushalten	27
2.2.1 Sektorspezifischen Fragestellungen und Herausforderungen.....	28
2.2.2 Diskussion und Festlegung der Methodik.....	28
2.2.2.1 Sonderfall Neubau	30
2.2.2.2 Sonderfall Zusatzheizungen.....	30
2.2.2.3 Vorgehen zur Bestimmung der Substitutionsfaktoren für den konventionellen Mix ..	31
2.2.3 Datenquellen.....	32
2.2.4 Ableiten der Substitutionsfaktoren	36
2.2.4.1 Substitutionsfaktoren im Neubau und für Bauabgänge.....	36
2.2.4.2 Biogene Festbrennstoffe im Bestand	40
2.2.4.3 Solarthermie	56
2.2.4.4 Oberflächennahe Geothermie, Umweltwärme.....	62
2.2.4.5 Fernwärme.....	65
2.2.4.6 Biomethan	66
2.2.5 Dynamisierung der Methodik für die Berücksichtigung von Neubau und Bestand und Gewichtung der Substitutionsfaktoren	67
2.2.5.1 Ermittlung der gewichteten Substitutionsfaktoren.....	68
2.2.6 Ergebnisse und Fazit	74
2.3 Substitutionsfaktoren in GHD und Industrie.....	76
2.3.1 Sektorspezifische Fragestellungen und Herausforderungen.....	76
2.3.2 Diskussion und Festlegung der Methodik.....	76
2.3.2.1 Branchenfachgespräche	77
2.3.2.2 Zwischenfazit Methode	80

2.3.3	Datenquellen.....	80
2.3.3.1	Amtliche Datenquellen	80
2.3.3.2	Prognos Industrie- und GHD-Datenmodell.....	82
2.3.3.3	Zwischenfazit Datenquellen.....	82
2.3.4	Ableiten der Substitutionsfaktoren	83
2.3.4.1	Feste Biomasse	83
2.3.4.2	Flüssige Biomasse	83
2.3.4.3	Gasförmige Biomasse (Biogas und Biomethan, Klärgas, Deponiegas)	84
2.3.4.4	Biogener Anteil des Siedlungsabfalls	85
2.3.4.5	Solarthermie und Umgebungswärme.....	85
2.4	Substitutionsfaktoren allgemeine Versorgung	87
2.4.1	Sektorspezifischen Fragestellungen und Herausforderungen.....	87
2.4.2	Diskussion und Festlegung der Methodik.....	87
2.4.3	Ermittlung der Substitutionsfaktoren und Abgrenzung zu anderen Sektoren	88
2.4.3.1	Gasförmige Biomasse	88
2.4.3.2	Feste Biomasse	93
2.4.3.3	Biogener Anteil Siedlungsabfall	94
2.4.3.4	Solarthermie und Umgebungswärme.....	96
2.4.3.5	Tiefengeothermie	97
2.4.3.6	Energieträgermix der Fernwärme 2018	98
2.5	Zusammenführen der sektoralen Ergebnisse	100
3	Nutzungsgrade und Hilfsenergieeinsatz.....	102
3.1	Feste Biomasse (private Haushalte und GHD)	102
3.1.1	Bisherige Annahmen.....	102
3.1.2	Analyse der verfügbaren Daten zu Einzelfeuerstätten	103
3.1.3	Vorschlag für die zukünftige Bilanzierung von Einzelfeuerstätten	111
3.1.3.1	Nutzungsgrade und Hilfsenergieverbrauch	111
3.1.3.2	Substitutionswirkung unter Berücksichtigung des Mehrverbrauchs beim Einsatz von Zusatzheizungen	112
3.1.4	Analyse der verfügbaren Daten zu Zentralfeuerungen	113
3.1.5	Vorschlag für zukünftige Bewertung von Zentralfeuerungen	115
3.2	Solarthermie	117
3.2.1	Bisherige Annahmen.....	117
3.2.2	Datenanalyse und Vorschlag für die zukünftige Bewertung.....	117

3.3	Umgebungswärme: Umweltwärme und oberflächennahe Geothermie.....	118
3.3.1	Bisherige Annahmen.....	118
3.3.2	Analyse der verfügbaren Daten zu elektrisch betriebenen Wärmepumpen (Heizungswärmepumpen).....	120
3.3.3	Analyse der verfügbaren Daten zu Brauchwasser-Wärmepumpen	122
3.3.4	Analyse der verfügbaren Daten zu gasbetriebenen Wärmepumpen.....	123
3.3.5	Vorschlag für zukünftige Bewertung von Wärmepumpen	123
3.4	Tiefe Geothermie	124
3.5	Weitere, fossile Energieträger	124
4	Quellenverzeichnis Substitutionsfaktoren	127
A	Anhang	131
A.1	Anhang zu den Substitutionsfaktoren in Haushalten	131
A.1.1	Weitere Datengrundlage	131
A.1.2	Dynamisierung der Substitutionsfaktoren.....	132
A.2	Anhang zu den Substitutionsfaktoren in GHD und Industrie.....	136
A.2.1	Vergleich Eurostat vs. AGEB.....	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überblick über die Übergangsmatrix von Heizsystemen vor dem Kesseltausch (links) und der Einsatz der verschiedenen EE-Anlagen nach dem Kesseltausch (rechts) (ohne Neubau).....	30
Abbildung 2:	Anteil der vorwiegend verwendeten primären Heizenergie in den fertiggestellten Wohngebäuden	31
Abbildung 3:	Konventioneller Heizenergiemix im Neubau ohne Berücksichtigung von erneuerbaren Energien	32
Abbildung 4:	Gegenüberstellung der Nutzfläche der neu errichteten Gebäude und der Bauabgänge	37
Abbildung 5:	Überblick über die Substitutionsfaktoren von Zentralfeuerungen mit Biomasse für den Bestand.	42
Abbildung 6:	Überblick über die Substitutionsfaktoren für Einzelfeuerungen, die auf Basis der co2online-Zusatzauswertung für 2018 abgeleitet wurden.	52
Abbildung 7:	Überblick über die Substitutionsfaktoren für Einzelfeuerungen, die auf Basis der co2online-Zusatzauswertung für 2018 abgeleitet wurden und um jenen Anteil bereinigt wurden, mit dem keine Substitutionswirkung einhergeht.	54
Abbildung 8:	Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem beim Einsatz von Solarthermieanlagen, differenziert nach Bestand und Neubau	57
Abbildung 9:	Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem bei Solarthermieanlagen, differenziert nach Art der Solaranlage .	58
Abbildung 10:	Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem bei Solarthermieanlagen, ohne der Substitution von Erneuerbaren durch Erneuerbare, differenziert nach Art der Solaranlage.....	59
Abbildung 11:	Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem beim Einsatz von Solarthermieanlagen im Jahr 2010	61
Abbildung 12:	Überblick über den Energieträgermix der Haupt-Wärmeerzeuger, die vor dem Heizungstausch eingesetzt wurden, wenn nach dem Heizungstausch Wärmepumpen eingesetzt werden.	63
Abbildung 13:	Überblick über die Substitutionsfaktoren für Fernwärme, die auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018) abgeleitet wurden.	65
Abbildung 14:	Methodenüberblick zur Identifikation von Substitutionsfaktoren im Bereich Industrie und GHD	77
Abbildung 15:	Wärmenetzeinspeisung pro Bundesland nach Energieträgern	88
Abbildung 16:	Effizienz von Kaminöfen - Prüfstand und Feldtest	105
Abbildung 17:	Effizienz von Pelletöfen - Prüfstand und Feldtest	107

Abbildung 18:	Bandbreite der möglichen Jahresnutzungsgraden von Einzelfeuerstätten in Anlehnung an (MULEWF, 08/2014)108
Abbildung 19:	Gemessene Typtagnutzungsgrade und hochgerechnete Jahresnutzungsgrade für zwei Pelletkessel jeweils ohne und mit Pufferspeicher114
Abbildung 20:	Jährliche Absatzzahlen von Wärmepumpen differenziert nach Anzahl im Wohngebäudeneubau und in Bestandsgebäuden sowie sonstigem Neubau (z. B. im GHD-Bereich).....122
Abbildung 21:	Berechnung der Leitungsverluste der Fernwärme auf Basis von (AGEB 2021).....126
Abbildung 22:	Vergleich der Energieträgerstrukturen nach Energiebilanz Deutschland und Eurostat (JAQ) (Buttermann et al., 2018)...137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick der analysierten Datenquellen zur Ermittlung der Substitutionsfaktoren in Haushalten.....	33
Tabelle 2:	Energieträgermix im Neubau und im Gebäudebestand bezogen auf die Anzahl der Gebäude aus der IWU-Erhebung 2018 (Datenstand 2016).....	36
Tabelle 3:	Energieträgermix im Neubau bezogen auf die Anzahl der Gebäude aus der IWU-Erhebung aus dem Jahr 2010 und 2018 (Datenstand 2016).....	38
Tabelle 4:	Überblick über die verwendete Heizart in fertiggestellten Wohnungen im Zeitverlauf.....	39
Tabelle 5:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralheizung im Neubau für die Jahre 2010, 2014 und 2018.	40
Tabelle 6:	Überblick über den Energieträgermix von Einzelraumheizungen / Öfen in den Jahren 2009 und 2016.....	43
Tabelle 7:	Überblick über den Energieträgermix von Einzel- oder Mehrraumöfen in Deutschland bezogen auf die bewohnten Wohnungen in Wohngebäuden (quelle: Zusatzauswertung aus (Statistisches Bundesamt, 2020)	43
Tabelle 8:	Gegenüberstellung des ursprünglichen Energieträgermix im Falle des Einsatzes von Heizungen mit Pellets bzw. Scheitholz/Stückholz	46
Tabelle 9:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren.	46
Tabelle 10:	Gegenüberstellung des mittleren Energieverbrauch je Anlage und Energieträger in den Jahren 2011 bis 2013.....	47
Tabelle 11:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren (Energiegewichtet).	47
Tabelle 12:	Ergebnisse der co2-online Befragung zu Zusatzheizungen	48
Tabelle 13:	Überblick über den Energieträgermix der Hauptheizung in der Stichprobe der co2online-Erhebung und der Datenerhebung des IWU zum Wohngebäudebestand 2016.....	49
Tabelle 14:	Überblick über den Anteil an Hauptheizungen, die eine Zusatzheizung mit Pellets oder Scheitholz/Stückholz im Jahr 2009 in Betrieb hatten und die daraus abgeleiteten Substitutionsfaktoren.....	50
Tabelle 15:	Vergleich der Daten der Analyse auf Basis co2online und INFRO	50
Tabelle 16:	Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Einzelraumfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren.....	55

Tabelle 17:	Überblick über die abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Einzelfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren (Energiegewichtet)	55
Tabelle 18:	Vorschlag für die Substitutionsfaktoren im Bereich Solarthermie	62
Tabelle 19:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Wärmepumpen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren.	64
Tabelle 20:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren (Energiegewichtet).	64
Tabelle 21:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Fernwärme	66
Tabelle 22:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Biogas	66
Tabelle 23:	Substitutionsfaktoren im Bestand im Zeitverlauf für Feste Biomasse (Anlagenbezogen)	68
Tabelle 24:	Substitutionsfaktoren im Neubau im Zeitverlauf (Anlagenbezogen).....	69
Tabelle 25:	Datengrundlage und Berechnung der Anteile der Anlagen, die in bereits errichteten nach der Modernisierung der Heizungsanlage eingesetzt werden (Anteil Bestand) und jene die im Neubau eingesetzt werden.....	71
Tabelle 26:	Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Wärmepumpen unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand zur Modernisierung der Heizungsanlagen eingesetzt werden sowie im Neubau.	72
Tabelle 27:	Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Biomasse in der Zentralfeuerung unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand zur Modernisierung der Heizungsanlagen eingesetzt werden sowie im Neubau.....	73
Tabelle 28:	Übersicht der durchgeführten Fachgespräche mit Vertreter:innen der jeweiligen Branchen.....	77
Tabelle 29:	Qualitative, zusammengefasste Übersicht der Energiestruktur ausgewählter Branchen basierend auf die Brancheninterviews	79
Tabelle 30:	Segmentierung von Sektoren, Branchen und Anwendungen, für die einzeln Substitutionsfaktoren abgeleitet werden	80
Tabelle 31:	Zuordnung der Energieträger zur Berechnung der Substitutionsfaktoren nach der Standard International Energy Product Classification (SIEC)	81
Tabelle 32:	Zuordnung der Sektoren und Branchen und Anwendungen nach den Zeilen der Eurostat Energiebilanz (nrg_bal_c).....	81
Tabelle 33:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Feste Biomasse GHD – Zentralfeuerung.....	83

Tabelle 34:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Feste Biomasse Industrie – Raum- und Prozesswärme.....	83
Tabelle 35:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Biodiesel / HVO im Sektor GHD	83
Tabelle 36:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren flüssige Biomasse einschl. Pflanzenöl – Industrie.....	84
Tabelle 37:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Gasförmige Biomasse in den Sektoren Industrie und GHD	84
Tabelle 38:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Biogener Anteil des Siedlungsabfalls in der Industrie	85
Tabelle 39:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Solarthermie – GHD ...	85
Tabelle 40:	Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Umgebungswärme – GHD.....	85
Tabelle 41:	Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse	89
Tabelle 42:	Verwendung der Wärmemengen aus Biogasanlagen	90
Tabelle 43:	Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Biogas..	91
Tabelle 44:	Verwendung der Wärmemengen aus Biogasmethan	92
Tabelle 45:	Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Biomethan, Klärgas, Deponiegas.....	92
Tabelle 46:	Brennstoffeinsatz der festen Biomasse in der allgemeinen Versorgung auf Bundesländerebene.....	93
Tabelle 47:	Substitutionsfaktoren für biogenen Anteil des Siedlungsabfalls in Wärmenetzen.....	94
Tabelle 48:	Substitutionsfaktoren für biogenen Anteil des Siedlungsabfalls in Wärmenetzen.....	95
Tabelle 49:	Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Tiefengeothermie in Wärmenetzen	98
Tabelle 50:	Nettowärmeerzeugung in Netzen der Allgemeinen Versorgung im Jahr 2018	98
Tabelle 51:	Substitutionsfaktoren für Fernwärme.....	99
Tabelle 52:	Zuordnung der Energieträger entsprechend der Struktur der aktuellen Emissionsbilanzierung zu den im vorliegenden Forschungsvorhaben ermittelten Substitutionsfaktoren.....	100
Tabelle 53:	Bisherige Annahmen zu den Jahresnutzungsgraden und dem Eigenstrombedarf für die Emissionsbilanzierung im Kontext der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse	102
Tabelle 54:	Kennwerte der getesteten Kaminöfen.....	105
Tabelle 55:	Entwicklung der Wirkungsgrade im stationären Betrieb für Kaminöfen, nicht hydraulisch angebunden.....	108
Tabelle 56:	Entwicklung der Wirkungsgrade im stationären Betrieb – weitere dezentrale Feuerstätten.....	109
Tabelle 57:	Entwicklung der Wirkungsgrade im stationären Betrieb – hydraulisch angebundene Feuerstätten.....	109

Tabelle 58:	Jahresnutzungsgrade für Einzelfeuerstätten, Auszug aus Schweizerischer Holzenergiestatistik 2019 (BFE, 2020)110
Tabelle 59:	Beispielhafte Berechnung der auf die Wärmeerzeugung bezogener Hilfsenergie eines Pelletofens111
Tabelle 60:	Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für die zukünftige Bewertung von Einzelfeuerstätten111
Tabelle 61:	Vorgeschlagener Wert für den Eigenstrombedarf bei Pelletöfen112
Tabelle 62:	Prozentpunkte Abzug vom Jahresnutzungsgrad durch Überheizung und sonstige zusätzlich verursachte Verluste ..112
Tabelle 63:	Gesamtbewertung von Einzelfeuerstätten unter Berücksichtigung des Jahresnutzungsgrades und des Abzugs für Überheizung und sonstige zusätzliche Verluste113
Tabelle 64:	Jahresnutzungsgrade für Biomassekessel nach (BFE, 2020) in Abhängigkeit vom Jahr der Errichtung115
Tabelle 65:	Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für handbeschickte Feuerungsanlagen, Brennstoff: Scheitholz.....115
Tabelle 66:	Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für automatisch beschickte Feuerungsanlagen, Brennstoff: Holzpellets116
Tabelle 67:	Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für automatisch beschickte Feuerungsanlagen, Brennstoff: Hackschnitzel116
Tabelle 68:	Vorschlag zum Hilfsenergieeinsatz bei Nutzung fester Biomasse in Zentralfeuerungen.....117
Tabelle 69:	Basisannahmen der bisher verwendeten Ökobilanz-Datensätze für die Wärmebereitstellung aus Solarthermie.....117
Tabelle 70:	Angaben aus (GEMIS 5.0) für Solarthermie (ab 2010)118
Tabelle 71:	Vorschlag für die zukünftige Bewertung der Wärmebereitstellung aus Solarthermie118
Tabelle 72:	Basisannahmen der bisher verwendeten Ökobilanz-Datensätze für Wärmepumpen.....119
Tabelle 73:	Bisher unterstellte Jahresarbeitszahlen Wärmepumpen.....119
Tabelle 74:	Bandbreite der in den o.g. Feldtests erreichten Jahresarbeitszahlen je nach Gebäudezustand mit Angabe des Zeitraums der durchgeführten Feldtests.....121
Tabelle 75:	Vorschlag für die zukünftige Bewertung für Wärmepumpen 124
Tabelle 76:	Nutzungsgrade der Heizungssysteme zur Erzeugung von Raumwärme auf Basis fossiler Energieträger.....125
Tabelle 77:	Überblick über die verwendete Heizart in fertiggestellten Wohnungen im Zeitverlauf.....131
Tabelle 78:	Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Biomasse in der Einzelfeuerung (Anlagenbezogen).....132
Tabelle 79:	Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Solarthermieanlagen (Anlagenbezogen).....133

Tabelle 80:	Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Wärmepumpen (Anlagenbezogen).....	134
Tabelle 81:	Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Solarthermie unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand in Kombination mit dem Hauptwärmerzeuger eingesetzt werden sowie im Neubau.	134
Tabelle 82:	Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Biomasse in der Einzelfeuerung unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand in Kombination mit dem Hauptwärmeerzeuger eingesetzt werden sowie im Neubau.	135
Tabelle 83:	Unterschied der sektoralen Aufteilung in Eurostat und AGEB basierend auf (Buttermann et al., 2018)	136

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGEE-Stat	Arbeitsgemeinschaft für Erneuerbare Energien-Statistik
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Destatis	Statistisches Bundesamt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EE	Erneuerbare Energien
EEV	Endenergieverbrauch
EFH	Einfamilienwohngebäude
EN	Europäische Norm
EWärmeG	Erneuerbare-Wärme-Gesetz
FW	Fernwärme
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
HKI	HKI Industrieverband Haus-, Heiz- Und Küchentechnik e.V.
HVO	Hydrierte Pflanzenöle (engl. Hydrogenated Vegetable Oils)
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH
INFRO	Beratungsunternehmen Informationssysteme für Rohstoffe
ITG	ITG Institut für technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung u. Anwendung GmbH
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH
JAZ	Jahresarbeitszahl
kW	Kilowatt
MFH	Mehrfamilienwohngebäude
nrg_bal_c	Eurostat Energiebilanz
η_{th}	Thermischer Nutzungsgrad
RWI	RWI – Leibniz Institut für Wirtschaftsforschung
SIEC	Internationale Bildungssysteme - Service Interacademique des Examens et Concours
StaBuA	Statistisches Bundesamt
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt
VDZ	Verband Deutscher Zementwerke
ZAE	Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Zusammenfassung

Das Umweltbundesamt (UBA) erstellt jährlich die Emissionsbilanz für erneuerbare Energien, die ausweist wie viel Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Erneuerbaren in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr eingespart wurden. Die Berechnung fußt auf den Energieverbräuchen, die durch die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) ermittelt werden und wird kontinuierlich weiterentwickelt.

Fokus im vorliegenden Forschungsvorhaben liegt auf der Untersuchung zur Weiterentwicklung im Bereich erneuerbare Wärme. Ziel ist es, Substitutionsfaktoren für die verschiedenen Erneuerbaren abzuleiten und für verschiedene Technologien auf Basis von Literaturrecherche die den aktuellen Analysen zugrundeliegenden Nutzungsgrade zu aktualisieren und den notwendigen Hilfsenergieeinsatz zu bestimmen. Gemeinsam mit Informationen hinsichtlich der Emissionsfaktoren der verschiedenen Energieträger lassen sich somit die eingesparten Emissionen quantifizieren.

Die Arbeiten im Projekt werden in drei Arbeitspaketen durchgeführt.

Arbeitspaket 1 widmet sich der Frage, wie die Substitutionsfaktoren im Bereich erneuerbare Wärme für die Sektoren private Haushalte, GHD, die Industrie und die allgemeine Versorgung abgeleitet werden können. Dabei geben die Substitutionsfaktoren an, welche konventionellen Energieträger und Technologien vor dem Einsatz von Erneuerbaren im Einsatz waren.

Arbeitspaket 2 analysiert die der Emissionsbilanzierung vorliegenden Brutto-Nutzungsgrade und ergänzt diese durch aktuellere Informationen, falls diese vorliegen. Gleichzeitig wird überprüft, ob aufgrund der Entwicklungen der erneuerbaren Energien im Wärmebereich die zu analysierenden Technologien angepasst bzw. erweitert werden müssen. Abschließend wird für alle berücksichtigten Technologien der fremdbezogene Hilfsenergieeinsatz am jeweiligen Endenergieverbrauch ermittelt.

In Arbeitspaket 3 werden die Ergebnisse aufbereitet und im Rahmen von Fachgesprächen umfangreich mit Experten im Bereich der Emissionsbilanzierung erneuerbarer Wärme diskutiert. Dabei werden einerseits die entwickelte Methodik und die angedachten Literaturquellen abgestimmt und auch die Ergebnisse der Analysen präsentiert und diskutiert.

Ergebnisse

In Arbeitspaket 1 werden die Substitutionsfaktoren für verschiedene erneuerbare Energieträger aktualisiert. Dabei erfolgt die Differenzierung analog zur jetzigen Vorgehensweise in der Emissionsbilanzierung, die vorrangig eine Unterscheidung nach Energieträger vorsieht. Im Bereich der festen Biomasse erfolgt in der aktuellen Emissionsbilanzierung des Weiteren eine Unterscheidung des Einsatzes in den Bereich private Haushalte und GHD, feste Biomasse in der Industrie und feste Biomasse in der allgemeinen Versorgung.

Da sich der Einsatz von erneuerbaren Energien substantiell für die verschiedenen Bereiche unterscheidet und der Einsatz auch mit verschiedenen Emissionswirkungen einhergeht, haben sich die Forschungsnehmenden darauf festgelegt, auch bei den anderen Energieträgern die Substitutionswirkung für die Bereiche private Haushalte, GHD und Industrie, sowie die allgemeine Versorgung separat zu analysieren.

Die Diskussionen des ersten Fachgespräches erlaubten die Festlegung der Definition der Substitutionswirkung: Um Substitutionsfaktoren abzuleiten, können prinzipiell verschiedene Ansätze verfolgt werden. Einerseits kann die Frage analysiert werden, wie viel CO₂ gegenüber einer früheren Welt eingespart werden kann. Dabei ist zu analysieren, welcher Energieträger vor dem Einsatz der erneuerbaren Energien im Einsatz war und durch erneuerbare Energien

substituiert wird. Hier wurde diskutiert, ob dabei die bereits eingesetzten erneuerbaren Energien zu berücksichtigen sind oder diese bei der Analyse der Substitutionswirkung vernachlässigt werden sollten. Darüber hinaus kann der Fokus auf der Beantwortung der Frage liegen, in welche Technologien bzw. Energieträger investiert worden wäre, wenn keine erneuerbaren Energien eingesetzt werden könnten.

Im **Bereich Haushalte** wurde festgelegt, dass die Substitutionsfaktoren von erneuerbaren Energien auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden. Die Studie von Cischinsky & Diefenbach (2018) erlaubt die Analyse von Technologie-Energieträgerkombination, die vor dem Einsatz der Erneuerbaren im Einsatz waren für die verschiedenen erneuerbaren Energieträger (Biomasse, Wärmepumpen und Fernwärme). Werden erneuerbare Energien wie im Falle von Solarthermie oder Biomasse basierten Einzelfeuerungen als Zusatzheizung eingesetzt, erlaubt die selbe Studie für Solarthermie bzw. eine Studie von co2online von Köhrer et al. (2018) für Einzelfeuerungen die Analyse, in Kombination mit welchem primären Heizungssystem der Einsatz von Erneuerbaren erfolgt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Biomasse und Wärmepumpen vermehrt Ölheizungen anstatt von Gasheizungen substituiert werden, was mit dem sinkenden Anteil von Ölheizungen im Bestand und der damit verbundenen höheren Austauschrate begründet werden kann. Der Einsatz von Solarthermie erfolgt vermehrt gekoppelt mit dem Einsatz von Gasheizungen, da deren Anteil im Gebäudebestand die letzten Jahre stark gestiegen ist.

Da sich die Substitutionsfaktoren im Bestand und im Neubau unterscheiden, schlagen die Forschungsnehmer eine differenzierte Betrachtung vor. Die Substitutionsfaktoren im Bestand werden auf Basis der eingesetzten Energieträger im Neubau abgeleitet. Da im Neubau keine Informationen über das vorher eingesetzte Heizungssystem vorliegen, kann in diesem Fall keine Differenzierung für die verschiedenen erneuerbaren Energien erfolgen.

Die Substitutionsfaktoren im **Bereich Industrie und GHD** wurden mittels Pauschalfaktoren festgelegt. Ausgangspunkt der Berechnungen ist die Energiebilanz von Eurostat, die den Sektor Landwirtschaft und Gartenbau separat ausweist. Die Energiebilanz-Daten wurden weiter differenziert mittels Informationen zu den Anwendungsbereichen Raumwärme und Warmwasser einerseits und Prozesswärme/-energie andererseits. Hierzu wurden aufbereitete Daten aus den Anwendungsenergiebilanzen herangezogen. Die Substitutionsfaktoren wurden dann als gewichtete Mittelwerte des Residualmixes bestimmt. Dieser Ansatz ist konsistent mit der Energiebilanz und differenziert genug, um Besonderheiten etwa im Bereich Prozesswärme hinreichend genau darzustellen.

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den geführten Branchenfachgesprächen, etwa die zunehmende Verwendung von biogenen Abfällen in der Zementindustrie. Der Einsatz von Stein- und Braunkohlen in der Industrie ist rückläufig, mithin ist der Substitutionsanteil dieser Energieträger sinkend. Solarthermie und Umweltwärme werden in den Sektoren Industrie und GHD derzeit hauptsächlich als Raumwärme und zur Warmwasserbereitung genutzt.

In der **allgemeinen leitungsgebundenen Wärmeversorgung** wird vor allem feste Biomasse, gasförmige Biomasse sowie der biogene Anteil des Siedlungsabfalls und Tiefengeothermie eingesetzt. Bei der Ableitung der Substitutionsfaktoren wurde analog zur Vorgehensweise in Haushalten analysiert, welche Art der Beheizung bzw. welcher Energieträger durch den Einsatz dieser Energieträger verdrängt wird. Dafür wurde versucht abzuleiten, ob durch die Erschließung der erneuerbaren Energien die Errichtung von neuen zentralen Wärmenetzstrukturen angestoßen wurde, oder diese vorrangig in bestehende Netze integriert wurden. Im ersten Fall wird angenommen, dass dadurch der dezentrale Energieträgermix vor dem Einsatz von leitungsgebundener Wärmeversorgung als Substitutionsfaktoren herangezogen

werden kann. Im zweiten Fall wird unterstellt, dass der fossile Wärmemix von Deutschland substituiert wird. Die Analysen zeigen, dass sowohl bei Tiefengeothermie als auch beim Einsatz von gasförmiger Biomasse in der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in einem Großteil der Fälle der Impuls für die Errichtung von neuen Wärmenetzen gesetzt wurde. Im Falle des Einsatzes von fester Biomasse und von Siedlungsabfällen lies die Datenlage keine Differenzierung diesbezüglich zu, weswegen als Substitutionsfaktoren der aktuelle Fernwärmemix angesetzt werden musste.

In den Analysen der **Nutzungsgrade und des Hilfsenergieeinsatzes** wird der Fokus auf die festen Biomasse in privaten Haushalten und im Sektor GHD, auf die Solarthermie und Umgebungswärme, die sich aus Umweltwärme und oberflächennaher Geothermie zusammensetzt und der Tiefengeothermie gesetzt und die Entwicklungen in der Vergangenheit diskutiert.

Summary

The German Environment Agency (UBA) produces an annual emissions balance for renewable energies, which shows how much greenhouse gas emissions have been saved through the use of renewables in the electricity, heating and transport sectors. The calculation is based on the energy consumption figures determined by the Working Group on Renewable Energy Statistics (AGEE-Stat) and is continuously developed further.

The focus of the present research project is on the investigation of further development in the area of renewable heat. The aim is to derive substitution factors for the various renewables and to update the utilisation rates underlying the current analyses for various technologies on the basis of literature research and to determine the necessary auxiliary energy input. Together with information regarding the emission factors of the different energy sources, the emissions saved can thus be quantified.

The work in the project is being carried out in three work packages.

Work package 1 is dedicated to the question of how the substitution factors in the area of renewable heat can be derived for the sectors private households, tertiary sector, industry and general supply. In this context, the substitution factors indicate which conventional energy sources and technologies were in use before the use of renewables.

Work package 2 analyses the gross utilisation rates available to the emissions accounting and supplements them with more up-to-date information, if available. At the same time, it is checked whether the technologies to be analysed need to be adapted or expanded due to developments in renewable energies in the heat sector. Finally, the external auxiliary energy use in the respective final energy consumption is determined for all technologies considered.

In work package 3, the results are processed and discussed extensively with experts in the field of emission balancing of renewable heat in expert meetings. On the one hand, the methodology developed and the literature sources considered will be discussed, and on the other hand, the results of the analyses will be presented and discussed.

Results

In work package 1, the substitution factors for different renewable energy sources are updated. The differentiation is analogous to the current procedure in the emissions balance, which primarily provides for a differentiation by energy source. In the area of solid biomass, the current emissions balance also differentiates between the use in private households and tertiary sector, solid biomass in industry and solid biomass in general supply.

Since the use of renewable energies differs substantially for the different sectors and the use is also associated with different emission effects, the research participants have decided to analyse the substitution effect for the sectors of private households, tertiary sector and industry, as well as general supply, separately for the other energy sources.

The discussions of the first expert meeting allowed for the definition of the substitution effect: In order to derive substitution factors, different approaches can be pursued in principle. On the one hand, the question of how much CO₂ can be saved compared to a previous world can be analysed. In this context, it is necessary to analyse which energy source was in use before

renewable energies were introduced and is substituted by renewable energies. Here it was discussed whether the renewable energies already in use should be taken into account or whether they should be neglected in the analysis of the substitution effect. In addition, the focus can be on answering the question of which technologies or energy sources would have been invested in if no renewable energies could be used.

In the **household sector**, it was determined that the substitution factors of renewable energies are derived on the basis of transition probabilities. The study by Cischinsky & Diefenbach (2018) allows the analysis of technology-energy carrier combinations that were in use before the deployment of renewables for the different renewable energy carriers (biomass, heat pumps and district heating). If renewables are used as supplementary heating, as in the case of solar thermal or biomass-based individual furnaces, the same study for solar thermal or a study by co2online by Köhrer et al. (2018) for individual furnaces allows the analysis of in which combination with which primary heating system renewables are used.

The results show that, in the case of biomass and heat pumps, oil heating systems are increasingly being substituted compared to gas heating systems, which can be explained by the decreasing proportion of oil heating systems in the existing stock and the associated higher replacement rate. The use of solar thermal energy is increasingly coupled with the use of gas heating, as its share in the building stock has risen sharply in recent years.

Since the substitution factors in the existing and new building stock differ, the research participants propose a differentiated consideration. The substitution factors in the existing building stock are derived on the basis of the energy sources used in new buildings. Since no information is available on the previously used heating system in new buildings, no differentiation can be made for the various renewable energies in this case.

The substitution factors in the **industry and tertiary sector** were determined using standard factors. The starting point for the calculations is the Eurostat energy balance, which reports the agriculture and horticulture sector separately. The energy balance data were further refined by adding information on the application areas of space heating and hot water on the one hand and process heat/energy on the other. For this purpose, preprocessed data from the application energy balances were used. The substitution factors were then determined as weighted averages of the residual mix. This approach is consistent with the energy balance and differentiated enough to represent special features, for example in the area of process heat, with sufficient precision.

The results confirm the findings from the expert interviews held with the industry, such as the increasing use of biogenic waste in the cement industry. The use of hard coal and lignite in industry is declining, so the substitution share of these energy sources is decreasing. Solar thermal energy and environmental heat are currently mainly used for space heating and water heating.

In the **general grid-bound heat supply**, mainly solid biomass, gaseous biomass as well as the biogenic share of municipal waste and deep geothermal energy are used. In deriving the substitution factors, it was analysed analogously to the procedure in households which type of heating or which energy source is displaced by the use of these energy sources. For this purpose, an attempt was made to determine whether the development of renewable energies triggered the construction of new central heating network structures or whether these were primarily

integrated into existing networks. In the first case, it is assumed that as a result the decentralised energy source mix can be used as a substitution factor before the use of grid-bound heat supply. In the second case, it is assumed that the fossil heat mix of Germany is substituted. The analyses show that in the case of both deep geothermal energy and the use of gaseous biomass in grid-bound heat supply, the impetus for the construction of new heat grids was set in a large number of cases. In the case of the use of solid biomass and municipal waste, the data situation did not allow any differentiation in this respect, which is why the current district heating mix had to be used as substitution factors.

In the analyses of the **utilisation rates and the auxiliary energy input**, the focus is placed on solid biomass in private households and in the tertiary sector, on solar thermal energy and ambient heat, which is composed of environmental heat and near-surface geothermal energy, and on deep geothermal energy, and the developments in the past are discussed.

1 Einleitung

Die seit zwölf Jahren veröffentlichten Daten zur Treibhausgas (THG)-Minderung durch erneuerbare Energien sind eine wichtige Referenzpublikation des Umweltbundesamtes. Neben den THG-Minderungen durch Strom und Kraftstoffe aus erneuerbaren Energieträgern werden auch die Minderungseffekte für Wärme aus erneuerbaren Energien (im Folgenden: EE-Wärme) quantifiziert. In diese Berechnungen gehen unterschiedliche Parameter ein:

- ▶ Wie dynamisch verläuft der Ausbau der EE-Wärme? (Aktivitätsrate),
- ▶ Welche konventionellen Heizungssysteme werden ersetzt? (Substitutionseffekt)
- ▶ Wie ist die THG-Vorkette der EE-Wärme? (spezifischer Emissionsfaktor)
- ▶ Welche THG-Intensität haben die konventionellen Heizungssysteme? (spezifischer Emissionsfaktor) Hierfür müssen Nutzungsgrade der ersetzten Technologien sowie die eingesetzte Hilfsenergie zu Grunde gelegt werden.

Für die Quantifizierung müssen daher sowohl vielfältige Datenquellen genutzt als auch methodische Vorgaben gemacht werden.

Für die Quantifizierung der Dynamik des EE-Ausbaus wird auf Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energie-Statistik (AGEE-Stat), geleitet und koordiniert durch das Umweltbundesamt (UBA), zurückgegriffen. Darin werden regelmäßig die Entwicklungen der erneuerbaren Energien in den unterschiedlichen Sektoren ermittelt und veröffentlicht.

Um die eingesparten Emissionen aus erneuerbaren Energien quantifizieren zu können, sind des Weiteren Annahmen zu den durch erneuerbare Energien substituierten Energieträger wichtig. Aufgrund verschiedener Einsatzfelder und auch Restriktionen der verschiedenen Wärmequellen ist dafür eine wärmequellenspezifische sowie sektorale und anwendungsspezifische Betrachtung notwendig. Während Solarthermie vor allem in Gebäuden zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser eingesetzt wird, wird Biomasse zusätzlich auch in der Industrie für die Bereitstellung von Prozesswärme genutzt. Je nach sektoraler Anwendung werden durch die einzelnen Wärmequellen unterschiedliche (fossile) Energieträger ersetzt.

Darüber hinaus müssen für die Quantifizierung spezifische Emissionsfaktoren für die THG-Vorkette der erneuerbaren Wärme zugrunde gelegt werden. Zu deren Ermittlung werden sowohl die Nutzungsgrade der EE-Systeme als auch die für den Betrieb notwendige Hilfsenergie benötigt.

Aufgrund der stärkeren Durchdringung der erneuerbaren Energien sowie Änderungen in der Wärmeversorgung und technologischen Fortschritten werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die bisher angesetzten Faktoren überprüft und bei Bedarf aktualisiert.

Vor diesem Hintergrund werden in diesem Forschungsvorhaben sowohl die Substitutionsfaktoren für erneuerbare Wärme als auch die für verschiedene EE-Systeme notwendige Hilfsenergie und deren Nutzungsgrade ermittelt. Die Ermittlung der Substitutionsfaktoren in Kapitel 2 erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Herausforderungen und Datenbasis separat für Haushalte, die Sektoren GHD und Industrie sowie die allgemeine Versorgung. In Kapitel 3 werden die Nutzungsgrade und der Hilfsenergieeinsatz für die verschiedenen EE-Wärmequellen und möglichen Technologien ermittelt.

2 Substitutionsfaktoren

2.1 Zielsetzung und methodische Vorüberlegungen

Ziel ist die Aktualisierung der Substitutionsfaktoren von erneuerbarer Wärme in Haushalten, GHD, Industrie und der zentralen Versorgung. Dabei geben die Substitutionsfaktoren Auskunft darüber, welcher Mix an konventionellen Energieträger durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger ersetzt wird.

Die Ermittlung von Substitutionsfaktoren im Bereich erneuerbare Wärme in Haushalten erfolgte bisher auf Basis der regelmäßig aktualisierten Haushaltsumfrage des RWI/Forsa. Da einerseits diese Umfrage mit den Berichtsjahren 2011 bis 2013 eingestellt wurde und sich andererseits die Rahmenbedingungen kontinuierlich ändern, werden die Möglichkeiten der Weiterentwicklung der Substitutionsfaktoren hinsichtlich der Aktualisierung der Faktoren sowie der Erschließung neuer Datenquellen überprüft.

Die Substitutionsfaktoren im Bereich Industrie und GHD wurden bisher auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamts sowie Ergänzungen durch weitere Untersuchungen speziell im Bereich Biomasse ermittelt. Dies wird mit dem laufenden Projekt um eine umfassende branchenspezifische Analyse ergänzt.

Für die Ermittlung der Substitutionsfaktoren werden in der aktuellen Emissionsbilanzierung folgende Energieträger und Anwendungsfälle unterschieden:

- ▶ Feste Biomasse in privaten Haushalten und GHD
 - Einzelfeuerungen
 - Zentralfeuerungen
- ▶ Feste Biomasse in der Industrie
- ▶ Feste Biomasse in der allgemeinen Versorgung
- ▶ Flüssige Biomasse
 - Pflanzenöl
 - Flüssige Biomasse (Industrie)
 - Biodiesel / HVO (Landwirtschaft)
- ▶ Gasförmige Biomasse
- ▶ Biogener Anteil des Siedlungsabfalls
- ▶ Solarthermie
- ▶ Umgebungswärme und Umweltwärme
- ▶ Tiefengeothermie

Eine weitere Differenzierung der Energieträger und Anwendungsfälle werden im Rahmen des Projekts ebenfalls geprüft.

In den folgenden Abschnitten findet sich ein Überblick über die aktuelle Vorgehensweise, sowie erste Vorüberlegungen: Einerseits wird das aktuelle Vorgehen zur Emissionsbilanzierung kurz

dargestellt, da die Substitutionsfaktoren direkt in die Emissionsbilanzierung einfließen (Abschnitt 2.1.1). Des Weiteren werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Quantifizierung von Substitutionsfaktoren beschrieben (Abschnitt 2.1.2). Aufgrund der verfügbaren Datenquellen und methodischen Herausforderungen erfolgt die Einordnung der Methodik sowie die Analysen getrennt für die Sektoren Haushalte, Industrie und GHD sowie die allgemeine Versorgung mittels Fernwärme.

Abschließend erfolgt die Einordnung der Ergebnisse und ein Vorschlag, wie die Substitutionsfaktoren für die verschiedenen Energieträger zu gewichten sind, falls keine Differenzierung dieser in der Emissionsbilanzierung ausgewiesen wird.

2.1.1 Aktuelle Methode der Emissionsbilanzierung

Da die Substitutionsfaktoren ermittelt werden um in die Emissionsbilanzierung einzufließen und die vermiedenen Emissionen durch den Einsatz von erneuerbaren Energien zu ermitteln, wird im Folgenden kurz das Vorgehen der Emissionsbilanzierung skizziert.

Die Substitutionsfaktoren geben laut Definition der Emissionsbilanzierung an, welche Anteile der konventionellen Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien verdrängt werden (Lauf et al. (2019)). In der jährlichen Emissionsbilanzierung werden analog der Energieträger- und Anwendungsdifferenzierung, die in Abschnitt 2.1 dargestellt ist, die netto vermiedenen Emissionen durch den Einsatz von erneuerbaren Energien als Differenz der brutto vermiedenen Emissionen sowie der Emissionen aus der Bereitstellung von erneuerbaren Energien berechnet. Bei der Berechnung der brutto vermiedenen Emissionen $E_{v,brutto}[t]$ werden die Substitutionsfaktoren entsprechend folgender Formel berücksichtigt.

Formel 1: Brutto vermiedene Emissionen durch den Einsatz von erneuerbaren Energien in der Wärmeversorgung

$$E_{v,brutto} = EEV_{ern} \cdot ngd_{ern} * \sum SF_m * \frac{EF_{fossil,direkt} + EF_{fossil,Vorkette,Hilfsenergie}}{ngd_{fossil}}$$

Dabei wird der Endenergieverbrauch der erneuerbaren Energien EEV_{ern} auf Basis der Daten der AGEE-Stat (AGEE-Stat, 2020b) mit dem entsprechenden Nutzungsgrad der Erneuerbaren ngd_{ern} multipliziert. Die Substitutionfaktoren SF_m für die konventionellen Energieträger werden mit den direkten $EF_{fossil,direkt}$ und indirekten Emissionen $EF_{fossil,Vorkette,Hilfsenergie}$ unter Berücksichtigung des fossilen Nutzungsgrades ngd_{fossil} multipliziert und für die substituierten konventionellen Energieträger summiert. Eine detaillierte Darstellung der Methodik findet sich in Lauf et al. (2019), Seite 19 ff.

Eine grundlegende Adaption des Vorgehens der Emissionsbilanzierung sowie eine Anpassung der Klassifizierung der Daten zum Endenergieverbrauch bzw. der Emissionsfaktoren ist nicht Ziel dieses Vorhabens.

2.1.2 Möglichkeiten zur Quantifizierung von Substitutionsfaktoren

Die Quantifizierung von Substitutionsfaktoren kann auf mehrere Arten geschehen, wobei die Wahl der Vorgehensweise direkten Einfluss auf die Fragestellung hat, die damit beantwortet werden kann. Des Weiteren kann aufgrund der beschränkten Datenverfügbarkeit nicht jede Vorgehensweise uneingeschränkt angewandt werden.

Im Folgenden werden die verschiedenen Herangehensweisen mit den zugehörigen Fragestellungen, die damit beantwortet werden können, dargestellt. Des Weiteren werden Kriterien definiert, die für die Festlegung der Methodik herangezogen werden. Da sich die

Festlegung für die Sektoren Haushalte, GHD und Industrie sowie allgemeinen Versorgung aufgrund der Datenverfügbarkeit und sektorspezifischen Herausforderungen unterscheiden können, erfolgt eine sektorspezifische Einordnung in den entsprechenden Abschnitten (2.2.2, 2.3.2 und 2.4.2).

- **Substitutionsfaktoren auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten (aktuelle Vorgehensweise in der Emissionsbilanzierung):** Bei der Analyse der Substitutionsfaktoren auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten wird ermittelt, welche Energieträger bzw. Heizungstechnologien vor dem Einsatz von erneuerbaren Energien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme eingesetzt wurden. Das Ziel ist die Darstellung von Substitutionsfaktoren, die angeben, welche konventionellen Energieträger durch den Einsatz von Erneuerbaren ersetzt werden. Vor diesem Hintergrund werden EE-basierte Heizsysteme, die vor dem Einsatz der neuen EE-Technologie im Einsatz waren, von der Analyse ausgenommen und darauf aufbauend die Substitutionsfaktoren abgeleitet. Dieses Vorgehen wurde bisher bei der Ermittlung der Substitutionsfaktoren für die Emissionsbilanzierung im Bereich Haushalte verfolgt und ist besonders im Bestand geeignet, wenn der Anteil von erneuerbaren Energien gering ist.¹

Bei dieser Vorgehensweise wird die Frage beantwortet, welche Emissionen gegenüber einer früheren Welt eingespart werden, in der keine erneuerbaren Energien eingesetzt werden.

- **Substitutionsfaktoren auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung des Einsatzes von erneuerbaren Energien:** Perspektivisch steigt der Anteil von erneuerbaren Energien an der Wärmeversorgung in Haushalten an, was bereits bei der Versorgung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs im Neubau ersichtlich ist². Ohne Berücksichtigung der erneuerbaren Energien, die bereits vor der Modernisierung der Anlage im Einsatz waren, können jedoch die durch den Einsatz von erneuerbaren Energien vermiedenen Emissionen überschätzt werden. Eine mögliche Adaption der Methodik kann erfolgen, in dem die Substitutionsfaktoren analog zum vorher genannten Vorgehen auf Basis des vorher installierten Heizsystems ermittelt werden, jedoch auch die erneuerbaren Energieträger, die bereits im Einsatz waren, bei der Quantifizierung berücksichtigt werden.

Auf Basis dieses Vorgehens kann die Frage beantwortet werden, wie viel CO₂ gegenüber einer früheren Welt tatsächlich eingespart werden.

- **Substitutionsfaktoren auf Basis eines kontrafaktischen Szenarios (analog zum Vorgehen im Stromsektor):** Bei der Ermittlung der Substitutionsfaktoren im Stromsektor wird in einem aktuellen Forschungsvorhaben ein kontrafaktisches Szenario modelliert.³ Ausgehend vom Kraftwerkpark in Deutschland im Jahr 2006 werden jene Anlagen ermittelt, in die in einer Welt ohne Erneuerbaren mit gleichen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen investiert worden wäre und in weiterer Folge deren jährlicher Energieeinsatz ermittelt, um die Substitutionsfaktoren abzuleiten. Dabei dient das Jahr 2006 als jenes Jahr, in dem noch ausreichend Daten für die Abbildung der Realität verfügbar sind und der Anteil von

¹ Im Jahr 2016 wurden 5,3 % der Wohngebäude mit Holz/Biomasse geheizt, in 6,4 % der Gebäude wurde Fernwärme eingesetzt, in 3,2 % der Gebäude Wärmepumpen (Cischinsky & Diefenbach, 2018).

² Der Anteil von Wärmepumpen im Neubau stieg von 0,1 % im Jahr 1994 auf 41,1 % im Jahr 2018 (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018). Für eine ausführlichere Darstellung wird auf Abschnitt 2.2.4.1 verwiesen.

³ Für Details zum Projekt SeEiS – Substitutionseffekte erneuerbarer Energien im Stromsektor wird auf den Teilbericht zur Methodik und Datengrundlage verwiesen (Kunze et al., 2019).

fluktuierenden erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung sehr gering war⁴. Die Analogie im Wärmebereich könnte durch die Berücksichtigung des fossilen Kaufmixes abgebildet werden. Auf Basis verschiedener Datenquellen, wie beispielsweise der BDH Marktstatistik⁵ und Informationen zu den Neuanschlüssen von Haushalten an Wärmenetze, könnten somit die Substitutionsfaktoren abgeleitet werden.

Dieses Vorgehen würde die Frage beantworten, wie viel CO₂ gegenüber einer fiktiven Welt ohne EE eingespart wird.

► **Pauschalfaktoren:**

Eine weitere Möglichkeit der Ableitung von Substitutionsfaktoren für erneuerbare Wärme wäre die Ermittlung von Pauschalfaktoren auf Basis der Energiebilanzen. Durch den tatsächlich eingesetzten Energieträgermix in den jeweiligen Jahren könnten somit durch Multiplikation mit dem Endenergieverbrauch an erneuerbarer Wärme die Frage beantwortet werden, wie viel Emissionen tatsächlich durch den Einsatz von erneuerbaren Energien eingespart werden. Dieses Verfahren ist im Wärmemarkt deshalb einfacher anzuwenden, da die Diskrepanz zwischen den verschiedenen substituierten Energieträgern (Wärme aus Erdgas und Heizöl) deutlich geringer ist als beispielsweise die Substitutionsfaktoren im Stromsektor (Strom aus Erdgas, Steinkohle oder Braunkohle).

Bei der Festlegung der Methodik sind neben den verschiedenen Zielsetzungen auch weitere Kriterien für eine Bewertung und die Auswahl heranzuziehen. Folgende relevante Kriterien wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens und eines durchgeführten Fachgesprächs mit externen Experten im Bereich erneuerbare Energien identifiziert:

- **Fortschreibbarkeit:** In wie fern können die Daten für die einzelnen Jahre fortgeschrieben werden?
- **Differenzierbarkeit:** In wie fern kann eine Differenzierung für die einzelnen erneuerbaren Energieträger erfolgen?
- **Datenbelastbarkeit:** Wie belastbar sind die entsprechenden Datenquellen und mit welchen Unsicherheiten und welcher Unschärfe gehen die Analysen einher?

Eine Diskussion der auszuwählenden Methodik für die unterschiedlichen Sektoren erfolgt in Abschnitt 2.2.2 für Haushalte, im Abschnitt 2.3.2 für GHD und Industrie und im Abschnitt 2.4.2 für die allgemeine Versorgung.

2.2 Substitutionsfaktoren in Haushalten

Erneuerbare Energien in Haushalten werden vorrangig in Form von Biomasse, Solarthermie sowie Umgebungswärme eingesetzt. Umgebungswärme umfasst laut Definition des Umweltbundesamtes „sowohl Umweltwärme als auch oberflächennahe Geothermie. Umweltwärme schließt die in bodennahen Luftschichten („aerothermische Umweltwärme“) und in Oberflächengewässern („hydrothermische Umweltwärme“) entnommene und technisch nutzbar gemachte Wärme ein. Oberflächennahe Geothermie bezeichnet die im oberflächennahen Erdreich bis zu einer Tiefe von 400 Metern gespeicherte Wärme („geothermische Umgebungswärme“). Dazu zählt auch die Wärme im Grundwasser. Beide Energiequellen sind zu kalt, um sie zum Heizen von Gebäuden unmittelbar nutzen zu können, weshalb Wärmepumpen

⁴ Die bereits verfügbare Wasserkraft wurde im kontrafaktischen Szenario durch konventionelle Energieträger ersetzt.

⁵ https://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Marktentwicklung_2008-2018_DE.pdf

eingesetzt werden“ (UBA 2022). Im Bereich Biomasse wird unterschieden, ob diese in Einzel- oder Zentralfeuerungen eingesetzt wird. In der Emissionsbilanzierung wird zusätzlich noch ausgewiesen, welcher Endenergieverbrauch auf Pellets zurückzuführen ist. Bei Solarthermieanlagen kann unterschieden werden, ob diese Anlagen rein zur Warmwasserbereitung in Haushalten oder zur Warmwasserbereitung und zusätzlichen Heizungsunterstützung eingesetzt werden.

2.2.1 Sektorspezifischen Fragestellungen und Herausforderungen

Im Bereich der Haushalte sind im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens folgende relevante Fragestellungen identifiziert worden:

- ▶ In wie fern ist die Methodik anzupassen, um den Entwicklungen im Bereich erneuerbare Wärme gerecht zu werden?
- ▶ Ist eine weitere Differenzierung der Energieträger und Anwendungsfälle notwendig?
- ▶ Sind signifikante Unterschiede zwischen Neubau und Bestand zu beobachten?
- ▶ Welche Unterschiede ergeben sich bei der Gegenüberstellung der Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf?

Die benannten Fragestellungen werden auf Basis einer konsistenten Zusammenführung und Auswertung verschiedener Datenquellen beantwortet. Darüber hinaus werden Empfehlungen für eine Anpassung der Methodik erarbeitet sowie Vorschläge für die aktualisierten Substitutionsfaktoren dargestellt.

2.2.2 Diskussion und Festlegung der Methodik

Im Folgenden werden die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten Möglichkeiten zur Quantifizierung von Substitutionsfaktoren mit Blick auf die sektorspezifischen Herausforderungen und Datenquellen im Bereich Haushalte bewertet. Dabei werden die bereits eingeführten Kriterien Fortschreibbarkeit, Differenzierbarkeit und Datenbelastbarkeit herangezogen.

Die Variante der **Pauschalfaktoren** geht mit dem Vorteil einher, dass mit der Energiebilanz eine Datenbasis verfügbar ist, die regelmäßig aktualisiert und fortgeschrieben wird. Da die AG Energiebilanzen e.V. die vorhandenen Statistiken aus allen Gebieten der Energiewirtschaft nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten auswertet, ist die Datenbelastbarkeit auch als sehr hoch einzustufen. Jedoch ist eine Differenzierbarkeit der Substitutionsfaktoren für einzelne Energieträger nicht möglich.

Bei der Ermittlung der **Substitutionsfaktoren auf Basis eines kontrafaktischen Szenarios** analog zum Stromsektor kann u. a. auf die Daten der BDH-Marktstatistik zurückgegriffen werden, die angibt, welche Heizungstechnologien jedes Jahr neu in Gebäuden installiert werden. Da auch diese Statistik jährlich erstellt wird, ist die Fortschreibbarkeit gegeben. Da in dieser Statistik jedoch die Heizungstechnologien in Haushalten und im Bereich Gewerbe und Industrie zusammengefasst werden, wäre eine Aufbereitung der Daten für die verschiedenen Sektoren notwendig, was die Datenbelastbarkeit mit Blick auf die Fragestellung des vorliegenden Forschungsvorhabens etwas einschränkt.

Die Methodik zur Ermittlung der Substitutionsfaktoren auf Basis von **Übergangswahrscheinlichkeiten** ist vor allem mit Blick auf das Kriterium Differenzierbarkeit für die einzelnen erneuerbaren Energien hervorzuheben. Auf Basis verschiedener Datenquellen (z.B. der IWU-Wohngebäudeerhebung die in den Jahren 2010 und 2016 erstellt wurde

(Cischinsky & Diefenbach, 2018; Diefenbach et al., 2010) können somit Substitutionsfaktoren abgeleitet werden, die für jeden erneuerbaren Energieträger angeben, was vor der Installation eingesetzt wurde. Mit Blick auf die Fortschreibbarkeit sind aktuell zwei Erhebungen und Publikationen verfügbar, die dafür verwendet werden können. Auch wenn eine regelmäßige Fortschreibung aktuell nicht sichergestellt ist, ist diese dennoch möglich. Die Datenbelastbarkeit ist im Rahmen von Analysen zu bewerten (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.3 und 2.2.4). Da für die einzelnen EE-Technologien analysiert wird, welcher (konventionelle) Energieträger im Vorfeld im Einsatz war, können auch technologiespezifische Unterschiede berücksichtigt werden. Dieses Kriterium wird aus Sicht des Umweltbundesamtes für die Emissionsbilanzierung als zentrales Kriterium gewertet.

Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der aktuellen Definition der Substitutionsfaktoren im Bereich Haushalte („Welche konventionellen Energieträger werden durch den Einsatz von erneuerbaren Energien ersetzt?“) wird analog zur bisherigen Vorgehensweise in den folgenden Abschnitten analysiert, welche konventionellen Energieträger vor dem Einsatz von erneuerbaren Energien im Einsatz waren. Bei der Ermittlung der vermiedenen Emissionen fließt direkt auch der Endenergieverbrauch, der von der AGEE-Stat ermittelt wird, ein. Dadurch wird eine etwaige Substitution von erneuerbaren Energieträgern durch Erneuerbare bereits in gewissem Umfang berücksichtigt. Dies liegt daran, dass die Ermittlung des Endenergieverbrauchs für manche Energieträger auf Basis des Endenergieeinsatzes ermittelt wird⁶, ⁷. Im Falle der Ermittlung des Endenergieverbrauchs für erneuerbare Wärme auf Basis von Anlagenzahlen (z.B. im Falle von Wärmepumpen und Solarthermieanlagen) wird im Folgenden überprüft, ob eine Adaption der Methodik in diesem Fall notwendig ist und abweichend von der bisherigen Vorgehensweise die Substitution von Erneuerbaren zu berücksichtigen ist.

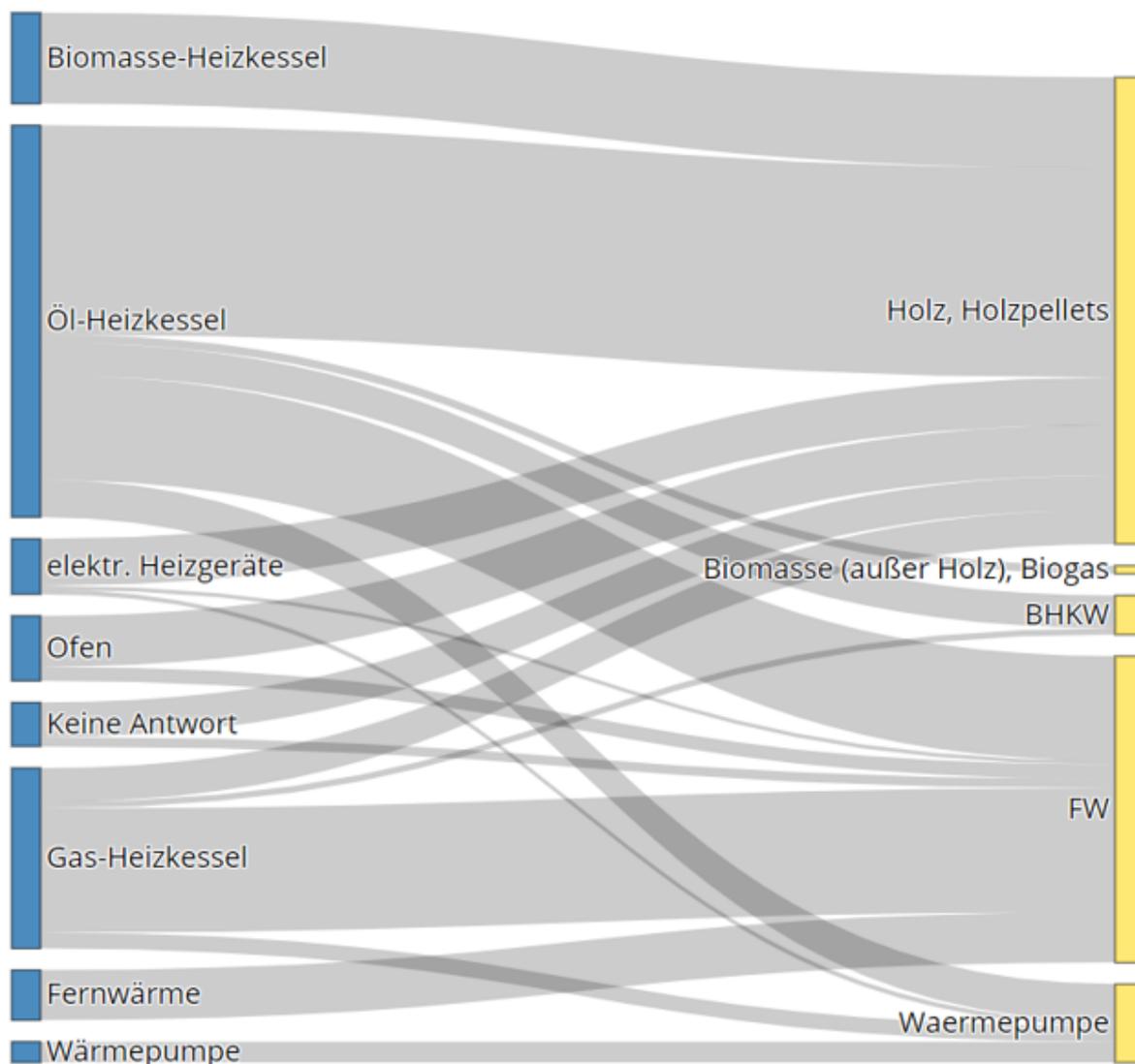
Eine ganzheitliche Darstellung der ausgewählten Vorgehensweise zur Aktualisierung der Substitutionsfaktoren auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten ist in Abbildung 1 angeführt. Dabei wird dargestellt, welche Energieträger vor dem Ersatz des Heizungssystems im Einsatz waren (linke Seite) und welche erneuerbaren Energien eingesetzt werden (rechte Seite)⁸.

⁶ Beispielsweise steigt der Einsatz von Biomasse im Falle einer Substitution einer bestehenden Biomasseheizung nicht. Vielmehr kann es im Zuge eines kombinierten Austausches des Heizungssystems mit einer thermischen Sanierung des Gebäudes zu einer Reduktion des Biomasseeinsatzes und des Endenergieverbrauchs kommen.

⁷ Für Details wird u.a. auf AGEE-Stat (2020a) verwiesen.

⁸ Das Bild zeigt nur jene Anlagen, die durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Im Gesamtbild wären auf der rechten Seite noch die neu installierten gas- und ölbetriebenen Anlagen zu ergänzen, welche in jenen Gebäuden, die ab 2019 den Haupt-Wärmeerzeuger getauscht haben, mit rd. 87 % (68 % Erdgas+18 % Öl) dominieren. (Quelle: Cischinsky & Diefenbach, 2018)

Abbildung 1: Überblick über die Übergangsmatrix von Heizsystemen vor dem Kesseltausch (links) und der Einsatz der verschiedenen EE-Anlagen nach dem Kesseltausch (rechts) (ohne Neubau).



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018)

Im **Bestand** wird somit analysiert, welches Heizsystem vor dem Einsatz der EE-basierten Technologie im Einsatz war und die Substitutionsfaktoren auf Basis einer Übergangsmatrix entsprechend abgeleitet.

2.2.2.1 Sonderfall Neubau

Das Vorgehen im **Neubau** wird entsprechend angepasst. Da im Neubau keine Erfahrungswerte dazu vorliegen, welcher Energieträger im Vorfeld im Einsatz war, wird der durchschnittliche Energieträgermix des Neubaus berücksichtigt.

2.2.2.2 Sonderfall Zusatzheizungen

Bei Zusatzheizungen (Solaranlagen und Einzelfeuerungen mit Biomasse) muss die Methodik ebenso adaptiert werden, da die Zusatzheizungen keinen vorhandenen Wärmeerzeuger vollständig ersetzen, sondern lediglich den Einsatz von Brennstoffen in diesen Wärmeerzeugern reduzieren – beispielsweise ein Sonnenkollektor, der einen Teil der Wärmeerzeugung eines

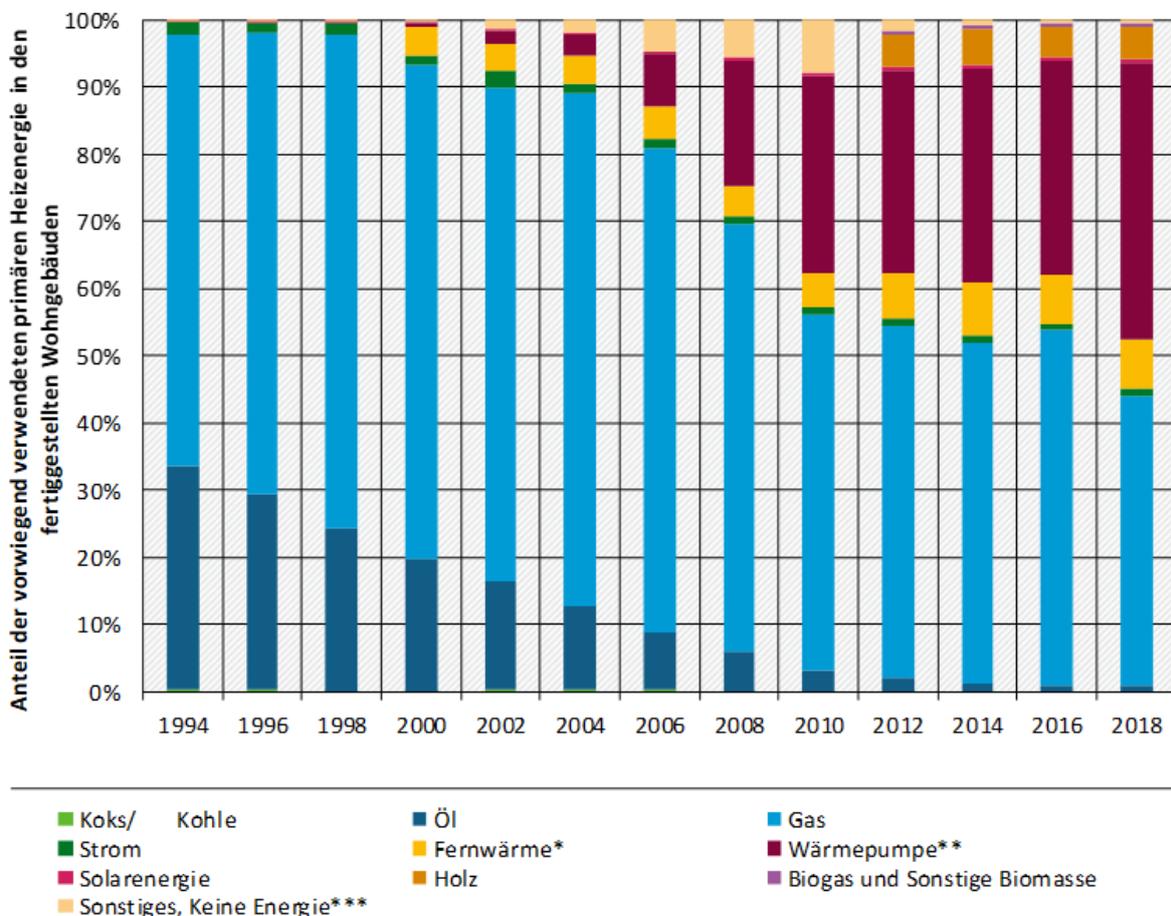
Gaskessels ersetzt. Im Fall der Zusatzheizung wird also untersucht, welcher fossile Energieträgermix durch die Anlagen substituiert wird. Bei Solaranlagen wird eine Differenzierung in Anlagen zur Warmwasserbereitung und Kombianlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung vorgenommen.

2.2.2.3 Vorgehen zur Bestimmung der Substitutionsfaktoren für den konventionellen Mix

Da sowohl im Neubau als auch im Bestand zu gewissen Anteilen bereits erneuerbare Energieträger im Einsatz sind, muss bei den Analysen entsprechend der festgelegten Definition der Substitutionsfaktoren dieser Anteil vernachlässigt werden. Die Fallzahlen der verschiedenen Datenquellen hinsichtlich des Einsatzes von erneuerbaren Energien werden somit eliminiert und der konventionelle Energieträgermix auf 100 % skaliert. In den Analysen erfolgt immer eine transparente Darstellung der Daten der Primärquellen inklusive Berücksichtigung von erneuerbaren Energien, die durch den Einsatz von Erneuerbaren substituiert werden würden und die abgeleiteten Substitutionsfaktoren, die rein die Substitution von konventionellen Technologien berücksichtigen.

Eine Veranschaulichung des Vorgehens ist am Beispiels des Neubaus in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt, was jedoch direkt auf die Vorgehensweise im Bestand übertragen werden kann.

Abbildung 2: Anteil der vorwiegend verwendeten primären Heizenergie in den fertiggestellten Wohngebäuden

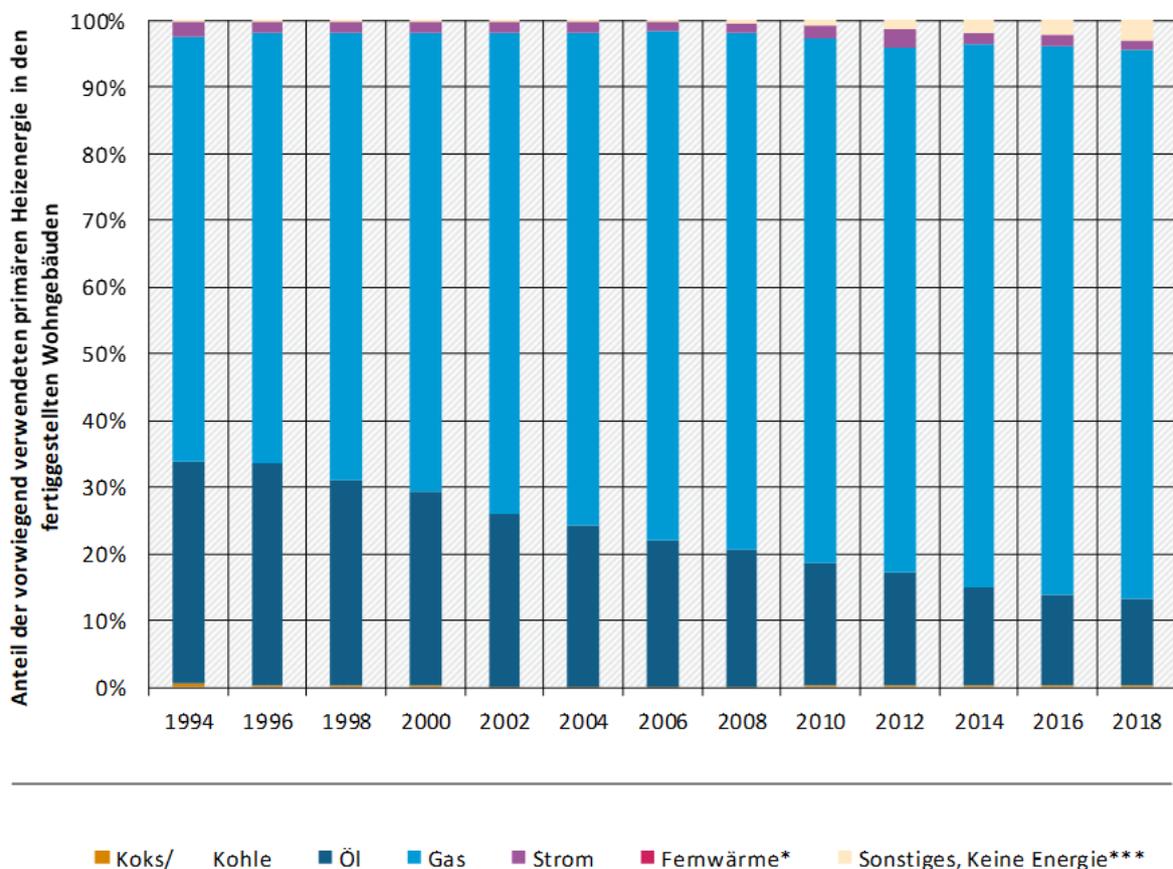


*Erst ab 2000 erfasst, ** enthält ab 2012 Informationen zu Geothermie und sonstiger Umwelthermie; *** Bis 2010 inklusive Holz, Biogas und sonstiger Biomasse

Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Statistisches Bundesamt (Destatis), (2019)

Abbildung 2 zeigt auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes (Destatis, 2019) die verwendete Heizenergieart im Neubau von 1994 bis 2018 auf. Es ist ersichtlich, dass der Anteil von erneuerbaren Energien im Jahr 1994 sehr gering war (0,1 % Wärmepumpen und 0,3 % sonstige Energieträger [vor allem Biomasse] oder keine Energie). Im Zeitverlauf erhöht sich der Anteil der erneuerbaren Energie (2018: 41% Fernwärme, 0,6 % Solarenergie, 5% Holz, 0,5 % Biogas und sonstige Biomasse). Da die Substitutionsfaktoren angeben, welche konventionellen Energieträger substituiert werden, werden die erneuerbaren Wärmequellen bei der zugrundeliegenden Entwicklung vernachlässigt. Die entsprechende Darstellung ist in Abbildung 3 aufgezeigt. Die Anteile der zugrundeliegenden konventionellen Energieträger werden entsprechend normiert, sodass sich die Anteile der Energieträger ohne Erneuerbare wieder auf 100 % summieren.

Abbildung 3: Konventioneller Heizenergiemix im Neubau ohne Berücksichtigung von erneuerbaren Energien



*Erst ab 2000 erfasst; *** Bis 2010 inklusive Holz, Biogas und sonstiger Biomasse

Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019

2.2.3 Datenquellen

Für die Analyse werden verschiedene Datenquellen ausgewertet, die in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt sind und nachfolgend ausführlicher beschrieben werden.

Als primäre Datenquelle für die Ermittlung der Substitutionsfaktoren auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten, wird die IWU Studie „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016“ herangezogen (Cischinsky & Diefenbach, 2018). Aufbauend auf dieser Erhebung kann auf Basis einer Sonderauswertung der Auswertungsdatenbank zum Projekt „Datenerhebung

Wohngebäudebestand 2016 – Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand“ des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) Darmstadt eine vertiefte Analyse hinsichtlich der Substitutionswirkung durchgeführt werden. Ebenso wird die Vorgängerstudie „Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand“ mittels einer Sonderauswertung für das Jahr 2009/2010 ausgewertet (Diefenbach et al., 2010). Darüber hinaus werden weitere Datenquellen erschlossen, um die Rolle von Zusatzheizungen auf Basis von Biomasse in den Gebäuden zu analysieren (Köhrer et al., 2018; Döring et al., 2020).

Tabelle 1: Überblick der analysierten Datenquellen zur Ermittlung der Substitutionsfaktoren in Haushalten

Bezeichnung	Herausgeber	Kurzbeschreibung zur Verwendung im Projekt
Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016	IWU	Primäre Datenquelle für den Bestand
Datenbasis Gebäudebestand 2010	IWU	Ergänzende Information zu Zusatzheizungen und Aufzeigen von Entwicklung der Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf
Die Zusatzheizung - Nutzung ergänzender Heizsysteme im Gebäudebereich	co2online	Studie zur Ableitung der Substitutionsfaktoren bei Zusatzheizungen
Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2018 – Marktvolumen und verwendete Sortimente, Rohstoffmonitoring Holz	INFRO	Studie zur Ableitung der Substitutionsfaktoren bei Zusatzheizungen
Mikrozensus	Destatis	Information zur Energieträgerentwicklung in Gebäuden zum Abgleich der Ergebnisse
Baugenehmigungen und Baufertigstellungen	Statistisches Bundesamt (Destatis)	Substitutionsfaktoren im Neubau

Bis 2015 wurde regelmäßig eine repräsentative Zusatzerhebung zum Energieverbrauch der privaten Haushalte des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung und der forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbh durchgeführt (RWI/forsa (2011), RWI/forsa (2015)). Eine Sonderauswertung auf Basis der Umfrageergebnisse erlaubte das Ableiten der Substitutionsfaktoren. Da die Erhebungen nicht mehr durchgeführt werden, kann diese Datenquelle nicht mehr für das Ableiten der Substitutionsfaktoren erschlossen werden, jedoch werden die bereits vorliegenden Substitutionsfaktoren mit den aktualisierten in den jeweiligen Abschnitten verglichen.

Im Folgenden werden die verschiedenen Datenquellen kurz beschrieben und die Datenquellen allgemein hinsichtlich der Repräsentativität eingeordnet. Da keine Vollerhebung vorliegt, die für das Vorhaben verwendet werden kann, muss auf Befragungen auf Basis von Stichproben zurückgegriffen werden, deren Repräsentativität im Vergleich zu einer Vollerhebung eingeschränkt sein kann. Die letzte Vollerhebung zum Gebäudebestand, die Gebäude- und Wohnungszählung 2011 im Rahmen des Zensus 2011 erhält keine Information über die

Übergangswahrscheinlichkeiten der Heizungstechnologien im Gebäudebestand und kann somit nicht herangezogen werden.

Eine Analyse der Datenqualität für das Ableiten der Substitutionsfaktoren erfolgt direkt im Rahmen der Analysen in Abschnitt 2.2.4.

Datenerhebung Wohngebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand (IWU, Diefenbach et al. 2010):

Um Daten- und Informationslücken des deutschen Wohngebäudebestands zu schließen, wurden im Rahmen der Erhebung repräsentative HauseigentümerInnen bzw. VertreterInnen der Eigentümer (MitarbeiterInnen von Wohnungsunternehmen oder HausverwalterInnen) durch SchornsteinfegerInnen hinsichtlich der Gebäude und Haustechnik befragt. Dafür wurde ein umfangreicher Fragebogen mit relevanten Angaben zur Energieeffizienz in Gebäuden und der Beheizung von Gebäuden erstellt. Der Fragebogen enthält neben Fragen zum primären Heizungssystem auch Fragen zu ergänzenden Wärmeerzeugern und ob die Wärmeerzeuger kürzlich ersetzt wurden. Wenn diese ersetzt wurden, wird auch die Frage nach dem ursprünglichen Wärmeerzeuger gestellt. Im Rahmen einer Zusatzauswertung erlaubt das IWU weitere Analysen auf Basis der Ergebnisse durchzuführen.

Bewertung der Repräsentativität: Um eine repräsentative Grundgesamtheit zu erlangen, wurden die Kehrbezirke der SchornsteinfegerInnen auf Basis der Bundeslandzugehörigkeit ausgewählt um somit eine regionale Ausgewogenheit sicherzustellen. Anschließend wurden verschiedene Gebäudetypen berücksichtigt und sichergestellt, dass ausreichend viele Befragungen je Gebäudetyp durchgeführt wurden, um statistische Aussagen ableiten zu können. Die Datenerhebung erfolgte zwischen Herbst 2009 und Frühjahr 2010. Insgesamt liegen den Autoren rd. 7.500 auswertbare Datensätze vor, auf Basis derer detaillierte Auswertungen über den Zustand und die Modernisierungstrends deutscher Wohngebäude durchgeführt wurden. Die Repräsentativität wurde im Rahmen des Vorhabens explizit bewertet und ist somit mit Blick auf eine Stichprobenerhebung als hoch einzuordnen.

Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 – Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand (IWU, Cischinsky & Diefenbach, 2018):

Um über das Jahr 2010 hinaus belastbare Daten zum Gebäudebestand, dessen Wärmeversorgung und zur Beschreibung der energetischen Gebäudequalität zu erlangen, wurde von August 2016 bis November 2017 eine weitere Befragung durch das IWU durchgeführt. Im Unterschied zu jener Befragung aus dem Jahr 2010 wurden zufallsgesteuert kommunale Grundsteuerstellen ausgewählt, die in weiterer Folge die Eigentümer der Stichprobengebäude recherchierten und diese direkt befragten. Ein gekürzter und adaptierter Fragebogen im Vergleich zur Erhebung aus den Jahre 2009 und 2010 wurde erstellt. Dieser enthielt ebenso Fragen zu den eingesetzten Wärmeerzeugern, angefallenen Modernisierungsmaßnahmen und lässt das Ableiten von Substitutionsfaktoren zu.

Bewertung der Repräsentativität: Insgesamt wurden im Rahmen der Befragung rd. 92.000 Fragebögen verschickt, wovon 16.982 ausgefüllt wurden und verwertbar für die Auswertungen waren (18 %). Die Datenaufnahme im Bereich der Wohngebäude wurde analog zur Studie aus dem Jahr 2009 auf Repräsentativität im statistischen Sinne ausgelegt. Die Autoren wollten gewährleisten, dass anhand der stichprobenartig erhobenen Gebäudedaten Rückschlüsse auf die unbekanntes Verhältnisse im Gebäudebestand gezogen werden können. Auf Basis eines dreistufigen Vorgehens konnte eine gute räumliche Verteilung der teilnehmenden Kommunen und eine repräsentative Datenbasis erarbeitet werden. Aus den Ergebnissen wurde eine

Auswertungsdatenbank aufgebaut, auf die mittels Zusatzauswertungen zurückgegriffen werden kann.

Die Zusatzheizung – Nutzung ergänzender Heizsysteme im Gebäudebereich (co2online; (Köhler et al., 2018)):

In der Studie wurde mit Fokus auf Einzelraumfeuerungsanlagen in Ein- und Zweifamilienwohngebäuden auf Basis von Recherchen und Interviews Informationen über den Verbrauch und das Nutzerverhalten ermittelt, um den Endenergieverbrauch sekundärer Heizsysteme sowie deren Einfluss auf die Gebäudeenergiebilanz ausweisen zu können. Neben 23.000 Verbrauchsdaten aus dem Online-Ratgeber „Heizcheck“ wurden die Ergebnisse zweier Online-Befragungen unter rd. 1.600 Verbrauchern und 19 Schornsteinfegern ausgewertet. Für die Analyse der Substitutionsfaktoren kann auf eine Sonderauswertung der Zahlen aus dem Heizcheck zurückgegriffen, die von co2online für das Vorhaben zur Verfügung gestellt wurden. Zu den Zusatzheizungen wurden im Zeitraum von 01.04.2017 bis 17.07.2018 rd. 25.000 Online-Beratungen durchgeführt, bei denen unter anderem der Energieträger des primären Heizsystems erfasst wurde und der verwendete Energieträger für die Zusatzheizung, sofern diese vorhanden ist. Eine detaillierte Darstellung findet sich in (Köhler et al., 2018, Seite 45). Der resultierende Datensatz nach der Datenaufbereitung umfasst rd. 23.000 Einträge.

Bewertung der Repräsentativität: Da die Datenbank auf Basis des Online-Ratgeber „Heizchecks“ erhoben wurde und im Sinne der statistischen Relevanz kein Einfluss auf die Stichprobe genommen werden konnte, muss die Repräsentativität der Datenbasis kritisch beleuchtet werden. In der Publikation des Umweltbundesamtes von Metzger et al. (2019) wurde die Repräsentativität der Datenbasis untersucht und einem Referenzdatensatz auf Basis von destatis Daten gegenübergestellt. Auf Ebene der Gebäudetypen (Mehrfamilienhaus und Ein- sowie Zweifamilienhaus) zeigen sich nur geringe Abweichungen der Anteile je Gebäudetyp im Vergleich der co2online-Datenbank und des Referenzdatensatzes (< 2 %). Bei einer hoch aufgelösten Analyse auf Basis der Bundesländer bzw. der Anteile der Gebäude je Baualtersklasse zeigen sich etwas größere Unterschiede von bis zu 5 % je Kategorie. Die größten Unterschiede zeigen sich bei einer nach Energieträgern differenzierten Betrachtung. Hier ist der Einsatz von Heizöl stark überrepräsentiert (es wird um rd. 10 % mehr Öl in der co2online Datenbank ausgewiesen als im Referenzdatensatz) und jener von Gas geringer. Im Rahmen des Projekts wurde eine Gewichtung der Daten durchgeführt, um somit im Nachhinein einen repräsentativen Datensatz zu erhalten. Da die von co2online zur Verfügung gestellten Daten für dieses Vorhaben nicht gewichtet wurden, muss dies im vorliegenden Forschungsvorhaben ebenso durchgeführt werden.

Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2018 – Marktvolumen und verwendete Sortimente, Rohstoffmonitoring Holz (Infro, (Döring et al., 2020)):

In der Studie des Infro wird regelmäßig der Brennholzverbrauch in privaten Haushalten erhoben. In der vorliegenden Studie aus dem Jahr 2018 wurden rd. 10.100 Haushalte über ein Mailpanel befragt und der energetische Holzverbrauch der Haushalte nach Bewohnergruppe (Eigentümer oder Mieter), Gebäudeart und dem Heizungstyp unterschieden. Auch wenn in dieser Befragung die Analyse des primären Energieträgers, der gemeinsam mit Holzzusatzheizungen eingesetzt wird, nicht im Vordergrund stand, konnte für das Forschungsvorhaben eine Sonderauswertung zur Verfügung gestellt werden.

Bewertung der Repräsentativität: Im Rahmen der Studie wurden zur Erhöhung der Repräsentativität direkt Gewichtungsfaktoren angewandt um beispielsweise Aussagen von Befragtengruppen, die in der Stichprobe überrepräsentiert waren, auszugleichen. Mit Blick auf die Nutzung in der Analyse der Substitutionsfaktoren ist darauf zu achten, dass der Fragebogen nicht explizit auf die Auswertung dieser Fragestellung hin konzipiert wurde.

Mikrozensus (Statistisches Bundesamt, 2006, 2009, 2016, 2019b):

Alle vier Jahre (2006, 2008, 2014 und 2018) werden die Mikrozensus-Erhebung durch eine Zusatzerhebung im Bereich Bauen und Wohnen ergänzt und der Bestand und Struktur der Wohneinheiten veröffentlicht. Die Hochrechnung erfolgt auf Basis der Gebäude und Wohnungszählung 2011.

Bauen und Wohnen: Baugenehmigungen, Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach Art der Beheizung und nach Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihe ab 1980 (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019a):

In der jährlichen Publikation des Statistischen Bundesamt werden die fertiggestellten Wohn- und Nichtwohngebäude nach Art der Beheizung und nach Art der verwendeten Heizenergie ausgewiesen. Dies dient im Projekt als Grundlage für die Analyse des Energieträgermix im Neubau.

2.2.4 Ableiten der Substitutionsfaktoren

2.2.4.1 Substitutionsfaktoren im Neubau und für Bauabgänge

Jährlich wurden in Deutschland im Zeitraum von 1993 bis 2018 im Durchschnitt rd. 147.000 neue Wohngebäude errichtet (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019a). Dies entspricht im Mittel 1,8 % des gesamten Wohngebäudebestands (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019b). Zudem unterscheidet sich der Energieträgermix im Neubau wesentlich vom Mix des Wohnungsbestands, wie in Tabelle 2 ersichtlich wird. Die wesentlichen Unterschiede ergeben sich beim Anteil von Öl (weniger als 1 % im Neubau und zwischen 24 und 31 % im Bestand) sowie bei Wärmepumpen (rd. 41 % im Neubau und zwischen 5 und 6 % im Bestand).

Tabelle 2: Energieträgermix im Neubau und im Gebäudebestand bezogen auf die Anzahl der Gebäude aus der IWU-Erhebung 2018 (Datenstand 2016)

Energieträgermix Neubau	Energieträgermix im Neubau (Baujahr ab 2010)	Energieträgermix Bestand (Baujahr bis 1978))	Energieträgermix Bestand (Baujahr 1979- 2009)
Fernwärme	7,1 %	6,7 %	5,9 %
Gas	42,9 %	49,9 %	57,6 %
Öl	0,8 %	31,2 %	23,8 %
Biomasse	7,2 %	5,8 %	4,4 %
Strom	41,0 %	4,7 %	5,8 %
davon Wärmepumpen	39 %	3,9 %	0,6 %
Flüssiggas	1,1 %	1,1 %	2,4 %
Kohle	0,0 %	0,5 %	0,1 %

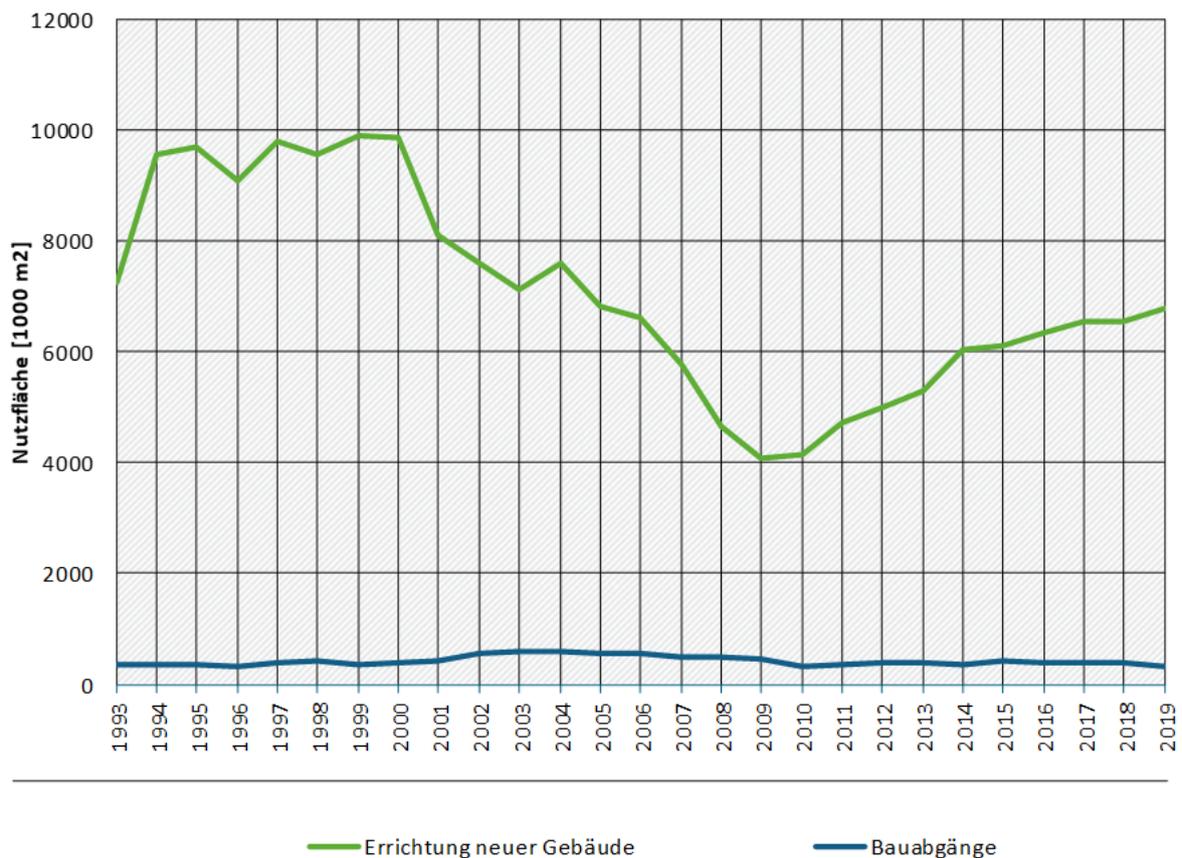
Quelle: Cischinsky & Diefenbach (2018)

Vor diesem Hintergrund ist eine differenzierte Betrachtung von Neubau und Bestand zu analysieren.

Darüber hinaus wurde im durchgeführten Online-Fachgespräch diskutiert, in wie fern Bauabgänge zu berücksichtigen sind. Abbildung 4 stellt die Nutzfläche der neu errichteten Gebäude und der Bauabgänge im Zeitverlauf von 1993 bis 2019 gegenüber. Es ist ersichtlich,

dass sich die Nutzfläche der Bauabgänge im einstelligen Prozentbereich der neu errichteten Gebäude bewegt (im Mittel rd. 6 %), mit Ausnahme der Jahre 2008 und 2009, in diesem Jahr lag der Anteil der Nutzfläche der Bauabgänge an der Nutzfläche von neu errichteten Gebäuden bei rd. 10 bzw. 11 %. Vor diesem Hintergrund wurde festgelegt, dass aufgrund der geringeren Relevanz der Bauabgänge diese nicht explizit in der Analyse berücksichtigt werden, da aufgrund der Unsicherheit bezüglich der verfügbaren Daten kein Erkenntnisgewinn erwartet wird.

Abbildung 4: Gegenüberstellung der Nutzfläche der neu errichteten Gebäude und der Bauabgänge



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019a und Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019b

Für die Analyse der Substitutionsfaktoren im Neubau⁹ wird entgegen der Vorgehensweise zur Ermittlung der Faktoren auf Basis der der Übergangswahrscheinlichkeiten im Bestand die Heizenergieart der Gebäude bei der Fertigstellung der Gebäude betrachtet. Dafür werden drei Datenquellen miteinander verglichen:

- ▶ Die IWU-Erhebung aus dem Jahr 2010 (Diefenbach et al., 2010)
- ▶ Die IWU-Erhebung aus dem Jahr 2016 (Cischinsky & Diefenbach, 2018)

⁹ Diese Analyse bezieht sich nicht auf die Analyse von Substitutionsfaktoren für Solarthermie – aufgrund einer breiteren Datenbasis kann hier eine vertiefte Differenzierung vorgenommen werden. Siehe hierzu Abschnitt 2.2.4.3.

- Die jährliche lange Zeitreihe ab dem Jahr 1980 zu Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie. (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019)

Der Energieträgermix des Neubaus auf Basis der IWU-Erhebungen ist in Tabelle 3 für die Erhebung aus den Jahren 2010 und 2018 dargestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass der Anteil an Fernwärme von rd. 4 % im Jahr 2009 auf rd. 7 % im Jahr 2016 steigt. Ebenso steigt der Anteil von Strom (Wärmepumpen und direktelektrisch) von rd. 21 % im Jahr 2009 auf 41 % im Jahr 2017. Davon betrug im Jahr 2016 der Anteil von elektrischen Wärmepumpen im Neubau 39 % und rd. 19 % im Jahr 2009. Der Anteil von Gas, Öl und Biomasse im Bestand verlor hingegen an Bedeutung: Der Anteil von Gas reduzierte sich von 60 % im Jahr 2009 auf 43 % im Jahr 2016, jener von Öl von 6 % (2009) auf 1 % (2016); jener von Biomasse von 9 % (2009) auf 7 % (2016).

Tabelle 3: Energieträgermix im Neubau bezogen auf die Anzahl der Gebäude aus der IWU-Erhebung aus dem Jahr 2010 und 2018 (Datenstand 2016)

Energieträgermix Neubau	Anteil Gebäudebestand 2009 (Neubau ab 2005)	Anteil Gebäudebestand 2016 (Neubau ab 2010)
Fernwärme	3,6 %	7,1 %
Gas	60,1 %	42,9 %
Öl	5,9 %	0,8 %
Biomasse	9,2 %	7,2 %
Strom	21,1 %	41,0 %
Davon Wärmepumpen	19,4 %	39 %
Flüssiggas	-	1,1 %

Quellen: Köhrer et al. (2018) und Cischinsky & Diefenbach (2018)

Darüber hinaus ist die statistische Datenlage aufgrund der Datenbasis zu den Baugenehmigungen und Anzeigen der Baufertigstellungen besser als jene im Bestand, wo keine regelmäßigen Erhebungen zur verwendeten Heizenergieart durchgeführt werden können¹⁰. Das Statistische Bundesamt veröffentlicht jährlich die Baugenehmigungen und Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie als lange Reihe seit 1980. Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorliegenden Analysen wird auf das Datenjahr 2018 zurückgegriffen (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019a). Die Ergebnisse der eingesetzten Heizart in fertiggestellten Wohnungen im Zeitverlauf von 2009 bis 2019 sind in Tabelle 4 dargestellt, eine Darstellung der Jahre vor 2009 findet sich im Anhang in Tabelle 77.

¹⁰ Die letzte Vollerhebung, die Gebäude- und Wohnungszählung wurde im Rahmen des Zensus im Jahr 2011 durchgeführt und ist für das Jahr 2021 wieder vorgesehen.

Tabelle 4: Überblick über die verwendete Heizart in fertiggestellten Wohnungen im Zeitverlauf

Jahr	Gesamt	Öl	Gas	Strom	Fernwärme	Wärmepumpe*	Solar-energie	Holz**	Biogas und sonstige Biomasse	Sonst.
	Anzahl	Anteil [%]								
2009	82.567	4,2	56,7	1,3	5,4	25,1	0,8			6,5
2010	84.029	3,2	52,8	1,2	5,2	29	0,8			7,8
2011	96.549	2,4	52,6	1,4	6	29,3	0,6	4,1	0,4	3,2
2012	100.816	1,9	52,4	1,2	6,7	30,2	0,5	4,8	0,5	1,8
2013	103.331	1,6	50,6	1,1	7,1	32,2	0,6	5	0,5	1,3
2014	108.908	1,2	50,7	0,9	7,9	31,8	0,6	5,5	0,5	0,9
2015	105.568	1,1	51,5	0,9	7,8	31,4	0,6	5,5	0,5	0,7
2016	109.990	1	52,9	0,9	7,1	31,8	0,5	4,7	0,6	0,5
2017	110.051	1	47,4	0,9	7,1	37,2	0,6	4,9	0,6	0,3
2018	107.581	0,9	43,1	1	7,4	41,1	0,6	4,9	0,5	0,5

*Bis zum Jahr 2010 wurden die Wärmepumpen gesamt angeführt, ab dem Jahr 2011 wurde differenziert nach Geothermie und sonstige Umwelthermie. In der vorliegenden Darstellung ist dies zusammengefasst

**Holz, Biogas und sonstige Biomasse wurden erst seit dem Jahr 2011 ausgewiesen und ist ansonsten bei sonstige zusammengefasst.

Quellen: Eigene Darstellung auf Basis von Statistisches Bundesamt (Destatis), (2020)

Auch wenn es im Vergleich zu den Daten der IWU-Erhebung leichte Unterschiede zu den Anteilen der verschiedenen Heizarten im Neubau gibt (Tabelle 3), zeigt sich ein ähnlicher Trend: Der Einsatz von Öl und Gas im Neubau geht zurück, jener von Fernwärme und Wärmepumpen steigt jedoch erheblich. Im Folgenden werden die Substitutionsfaktoren im Neubau aufgrund der guten Datenverfügbarkeit auf Basis der Daten in Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019a) abgeleitet. Die Substitutionsfaktoren unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien können somit direkt aus Tabelle 4 abgeleitet werden und unterscheiden sich aufgrund der Vorgehensweise nicht für die einzelnen Energieträger.

Hier ist darauf hinzuweisen, dass die Bezeichnung Substitutionsfaktoren etwas irreführend ist, da im Neubau aufgrund des nicht Vorhandenseins bestehender Anlagen nicht von Substitution gesprochen werden kann. Vielmehr handelt es sich hierbei um einen kontrafaktischen Energieträgermix im Neubau. Um im gesamten Vorhaben gleiche Bezeichnungen zu verwenden, wird dennoch in weiterer Folge von Substitutionsfaktoren gesprochen.

Um Substitutionsfaktoren abzuleiten, die angeben, welche konventionellen Energieträger im Bestand substituiert werden, werden die Anteile der erneuerbaren Energien und sonstige Energieträger (Wärmepumpe, Solarenergie, Holz, Biogas und sonstige Biomasse) vernachlässigt und der Energieträgermix entsprechend auf 100 % normiert. Für die Jahre 2010, 2014 und 2018 ergeben sich somit folgende Substitutionsfaktoren im Neubau, die in Tabelle 5 dargestellt sind.

Tabelle 5: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralheizung im Neubau für die Jahre 2010, 2014 und 2018.

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren im Neubau für das Jahr 2010	5,1	84,6	0	0	8,3	1,9
Substitutionsfaktoren im Neubau für das Jahr 2014	2,0	83,5	0	0	13,0	1,5
Substitutionsfaktoren im Neubau für das Jahr 2018	1,7	82,2	0	0	14,2	1,9

Da die Auswertungen des statistischen Bundesamtes jährlich veröffentlicht werden, können die Substitutionsfaktoren im Neubau jährlich neu ermittelt werden und somit regelmäßig fortgeschrieben werden.

2.2.4.2 Biogene Festbrennstoffe im Bestand

In der Statistik der Arbeitsgruppe für erneuerbare Energien wird die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse differenziert nach Einzelf Feuerungen, Zentralfeuerungen und Pellets. Für die Analyse der Substitutionsfaktoren wird die Unterteilung in Einzelf Feuerungen und Zentralheizung getroffen. Darüber hinaus wird analysiert, in wie fern sich Unterschiede bei der Ermittlung der Substitutionsfaktoren für feste Biomasse und Pellets ableiten lassen.

2.2.4.2.1 Zentralheizung

Die Substitutionsfaktoren für zentralbefeuerte Biomasseanlagen werden auf Basis einer Sonderauswertung der Auswertungsdatenbank zum Projekt „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 – Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand“ des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) Darmstadt abgeleitet (Cischinsky & Diefenbach, 2018). Um zusätzlich die Dynamik im Zeitverlauf darlegen zu können, wird darüber hinaus auch eine Sonderauswertung für die IWU-Erhebung aus dem Jahr 2010 durchgeführt (Diefenbach et al., 2010). Aufgrund der unterschiedlichen Fragebogenkonzeption in den beiden Erhebungen wird überprüft, in wie fern die Ergebnisse vergleichbar sind und die jeweiligen Ergebnisse für das Ableiten der Substitutionsfaktoren herangezogen werden können.

Auswertung der Auswertungsdatenbank „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016“: Auf Basis des Fragebogens wurden in Cischinsky & Diefenbach (2018) Gebäudeeigentümer gefragt, welcher Energieträger überwiegend für die Beheizung verwendet wird (Erdgas, Heizöl, Holz/Holzpellets, Biomasse (außer Holz)/Biogas¹¹, Flüssiggas, elektrischer Strom oder Kohle). Da in einem weiteren Schritt auch nach der Beheizungsart (Fernwärme, Blockheizung, Zentralheizung, Etagenheizung, Einzel- oder Mehrraumöfen/Raumheizgeräte, Nachtspeicherheizungen) gefragt wurde, können im Rahmen der Auswertung auch Information über Fernwärme abgeleitet werden. Die zusätzliche Frage nach dem Erzeuger (Heizkessel, Ofen/Öfen, elektrische Heizgeräte, Wärmepumpen, Blockheizkraftwerk, sonstiges) erlaubt die Auswertung für Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke (BHKW). In weiterer Folge wurde jedem/r Befragten die Frage gestellt, ob der Haupt-Wärmeerzeuger der Heizung nach dem 1.1.2010 neu eingebaut wurde oder das Gebäude nach dem 1.1.2010 erstmalig an Fernwärme angeschlossen wurde. Bei positiver Antwort konnte angegeben werden, wie die Heizwärme

¹¹ Biogas aus dem Erdgasnetz wird laut Fragebogen auch berücksichtigt, sofern der Anteil laut Liefervertrag > 50 % beträgt.

vorher überwiegend erzeugt wurde (Fernwärme, Gas-Heizkessel, Öl-Heizkessel, Biomasse-Heizkessel, Wärmepumpe, elektrische Heizgeräte wie beispielsweise Nachtspeicherheizung, Ofen/Öfen oder sonstiges [z.B. im Falle von Neubau oder wenn keines der Systeme zutreffend ist]¹²).

Im Rahmen der Sonderauswertung können die Ergebnisse der Befragung gefiltert und analysiert werden. Für die in diesem Bericht dokumentierten Analysen wurde der Datensatz auf jene Gebäude gefiltert, die vor 2010 errichtet wurden, um somit den Bestand abbilden zu können. Dies geht einher mit der Vorgehensweise der Autoren in Cischinsky & Diefenbach (2018), die bei ihren Auswertungen für den Bestand auch nur jene Wohngebäude betrachtet haben, die bis 2009 errichtet wurden. Bei Anlagen, die in Gebäuden mit Baujahr nach 2010 installiert wurden, wird davon ausgegangen, dass es sich hier um eine Erstinstallation und keinen Ersatz des Heizungssystems handelt. In diesem Falle können auch keine Informationen über den vorher eingesetzten Energieträger abgeleitet werden.

Um die Substitutionsfaktoren im Bereich Biomasse ableiten zu können, wird der Datensatz des Weiteren auf jene Gebäude reduziert, die Holz/Holzpellets bzw. Biomasse (außer Holz) und Biogas als überwiegenden Energieträger für die Beheizung verwenden. Wenn in diesen Gebäuden nun nach dem 1.1.2010 der Haupt-Wärmeerzeuger neu eingebaut wurde oder das Gebäude erstmalig an Fernwärme angeschlossen wurde (rd. 327.000 Fälle), kann analysiert werden, womit die Heizwärme vorher überwiegend erzeugt wurde.

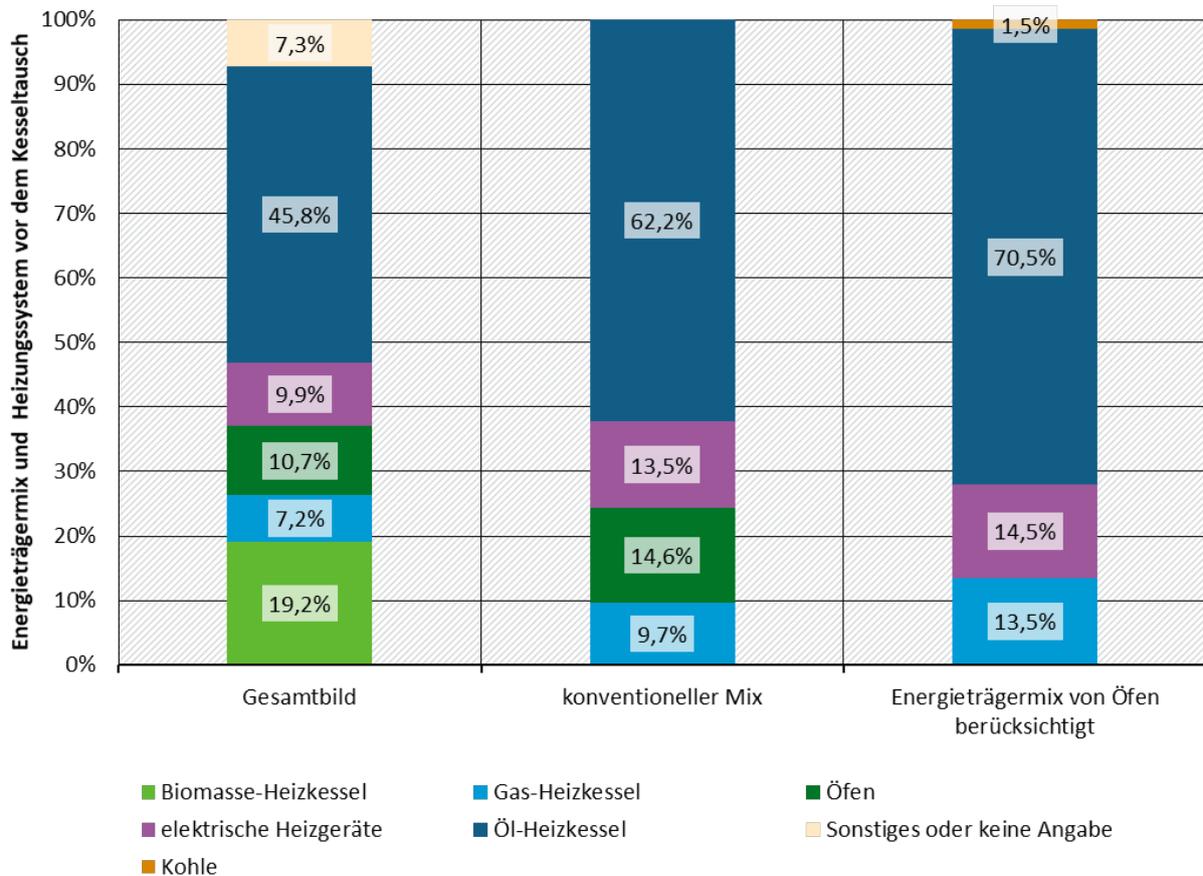
Die Analysen für die Substitutionsfaktoren für Wärmepumpen und Fernwärme (siehe Abschnitte 2.2.4.4 und 2.2.4.5) erfolgen analog und die Ergebnisse werden durch Filtern des Datensatz auf den entsprechenden Energieträger abgeleitet. Die Ausführungen zum Vorgehen bei der Auswertung sowie die Ergebnisse finden sich in den entsprechenden Abschnitten.

Ein Abgleich mit den Daten der BDH Marktstatik (BDH, 2018) und der Evaluierung des Marktanreizprogrammes (Zech et al., 2019) zeigt, dass die durchschnittlichen Fallzahlen im Jahr auf Basis der IWU-Erhebung (rd. 46.800 jährliche Neuinstallation bezogen auf den Betrachtungshorizont von 7 Jahren) die durchschnittlichen jährlichen Installationen laut BDH-Statistik bzw. Evaluation des Marktanreizprogrammes übersteigen. Die BDH-Marktstatistik weist für den gleichen Zeitraum einen jährlichen Absatz von Biomasse-Kesseln in Höhe von rd. 28.000 Kessel aus, im Jahr 2016 wurden rd. 25.500 Biomasse-Heizungsanlagen im Rahmen der BAFA-Förderung gefördert.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt, wobei die in der Studie berücksichtigten Energieträger für Holz, Holzpellets und Biomasse (außer Holz) sowie Biogas zusammengefasst wurden. Die Auswertung zeigt, dass Biomasse in der Zentralheizung in jenen Gebäuden eingesetzt wird, in denen davor entweder Biomasse, Gas, Öfen, elektrische Heizgeräte, Öl-Heizungen oder sonstige Heizungen im Einsatz waren. Laut dieser Auswertung werden keine Wärmepumpen durch Holz, Holzpellets, weitere Biomasse oder Biogas ersetzt. Im mittleren Balken werden die Ergebnisse für den substituierten konventionellen Energieträgermix dargestellt. Dabei werden die erneuerbaren Energieträger substituiert und der Anteil der konventionellen Energieträger entsprechende auf 100 % normiert.

¹² Für das Ableiten von Substitutionsfaktoren ist primär die Unterscheidung nach Energieträger relevant, die Unterscheidung nach Technologie (z.B. Kessel und Öfen) wird im Rahmen der nachfolgenden Zwischenbericht in Kapitel 2.4 bei der Herleitung von Nutzungsgraden beleuchtet.

Abbildung 5 Überblick über die Substitutionsfaktoren von Zentralfeuerungen mit Biomasse für den Bestand.



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018)

Die Ergebnisse zeigen, dass in rd. 11 % der Fälle (inkl. Substitution von EE) bzw. in rd. 15 % der Fälle (bei Berücksichtigung des rein konventionellen Mix) Öfen ersetzt werden. In Cischinsky & Diefenbach (2018) werden alle mit Brennstoff betriebenen Raumheizgeräte zu Öfen zusammengefasst. Da keine Information zum Energieträgermix im Falle von Öfen bzw. Einzelraumheizungen auf Basis der Sonderauswertung vorliegen, wird auf die Ergebnisse der statistischen Analyse für den Gebäudebestand im Jahr 2009 (Diefenbach et al., 2010) zurückgegriffen und denen aus dem Jahr 2016 gegenübergestellt (Cischinsky & Diefenbach, 2018). In Tabelle 6 wird der Anteil an Öfen und der Energieträgermix als Anteil am gesamten Bestand und für Öfen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass im Jahr 2016 mit 2,2 % schon wesentlich weniger Öfen in Gebäuden zur Wärmeerzeugung eingesetzt wurden als im Jahr 2010 (5,2 %). Auch der Mix an Energieträgern, die in Öfen eingesetzt werden, variiert sehr stark. Es zeigt sich, dass der Anteil von Öl und Kohle betriebenen Öfen sinkt und somit die Anteile der Öfen, die mit Biomasse und Gas betrieben werden, steigt. Dies liegt daran, dass Öl und Kohle betriebene Öfen vermehrt substituiert werden.

Tabelle 6: Überblick über den Energieträgermix von Einzelraumheizungen / Öfen in den Jahren 2009 und 2016

Beheizungsstruktur Gebäudebestand	Anteil 2009		Anteil 2016	
	am gesamten Bestand	an Öfen	am gesamten Bestand	an Öfen
Ofen	5,2 %	100 %	2,2 %	100 %
Davon...				
Gas	1,0 %	19,2 %	0,5 %*	22,7 %
Öl	1,2 %	23,1 %	0,4 %	18,2 %
Biomasse	2,5 %	48,1 %	1,1 %	50,0 %
Kohle	0,5 %	9,6 %	0,2 %	9,1 %

*Inklusive Flüssiggas

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Diefenbach et al. (2010) und Cischinsky & Diefenbach, (2018);

Im Rahmen einer Sonderauswertung zu Wohnungen mit Einzel- oder Mehrraumöfen aus den Ergebnissen des Mikrozensus 2018 – Zusatzerhebung Wohnen (Statistisches Bundesamt, 2020), kann der in Tabelle 6 aufgezeigte Trend bestätigt werden. Tabelle 7 stellt den Anteil der überwiegenden Energieart für jene Wohnungen dar, die mittels Einzel- oder Mehrraumöfen beheizt werden. Insgesamt wurden im Jahr 2018 5,7 % der Wohnungen mittels Einzel- oder Mehrraumöfen beheizt. Aufgrund der unterschiedlichen Abgrenzung von Einzel- oder Mehrraumöfen in den zwei Publikationen, ist die Vergleichbarkeit jedoch nur beschränkt möglich. Im Rahmen der statistischen Erhebung werden auch Nachtspeicherheizungen angeführt, die für einen Vergleich vernachlässigt werden. Der Trend hin zu Gas ist auch in der Auswertung auf Basis der Sonderauswertung des Mikrozensus ersichtlich. Jedoch zeigen sich deutliche Verschiebungen von Biomasse hin zu Heizöl und Kohle.

Tabelle 7: Überblick über den Energieträgermix von Einzel- oder Mehrraumöfen in Deutschland bezogen auf die bewohnten Wohnungen in Wohngebäuden (quelle: Zusatzauswertung aus (Statistisches Bundesamt, 2020)

Überwiegende Energieart	Anteil [%]	Anteil ohne Strom, Erd- und Umweltwärme, Abluftwärme und Sonstiges
Gas	13 %	27 %
Heizöl	13 %	27 %
Biomasse (Holz, Holzpellets)	18 %	36 %
Kohle (Briketts, Braunkohle, Koks, Steinkohle)	5 %	10 %
Strom	47 %	
Erd- und andere Umweltwärme, Abluftwärme	2 %	
Sonstiges bzw. ohne Angabe	1 %	

Die Substitutionsfaktoren, ergänzt um den Energieträgermix von Öfen, sind in Abbildung 5 im rechten Balken berücksichtigt. Für die Darstellung wird der Energieträgermix von Öfen für das Jahr 2009 aus der IWU-Erhebung herangezogen, da die Substitutionsfaktoren laut Definition angeben sollen, welcher Energieträgermix vor dem Kesseltausch im Einsatz war und so die Konsistenz innerhalb des Datensatzes gewährt werden kann. Der Anteil von Öfen in Höhe von 14,6 % wurde dabei durch Gas (19,2 %), Öl (23,1 %), Biomasse (48,1 %) und Kohle (9,6 %) substituiert.

Auswertung der Auswertungsdatenbank „Datenbasis Gebäudebestand“: Um die Entwicklung der Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf abbilden zu können, wird auch auf die vorangegangene Studie des IWUs zurückgegriffen und eine Sonderauswertung durchgeführt (Diefenbach et al., 2010). Auch in dieser Studie wurden auf Basis eines Fragebogens Gebäudeeigentümer gefragt, durch welches System die Heizwärme überwiegend erzeugt wird (Heizkessel oder Therme, Wärmepumpe, Blockheizkraftwerke, elektrische Direktheizung oder sonstiger Erzeuger) und welcher Brennstoff im Falle von Heizkessel oder Thermen und Blockheizkraftwerken eingesetzt wird (Öl, Erdgas, Holzpellets, Scheitholz/Stückholz, Sonstige Biomasse, Flüssiggas, Kohle)¹³. Der Fragebogen wurde jedoch im Rahmen der Nachfolgestudie aktualisiert. Dies zeigt sich vor allem in der Frage nach der Erneuerung der vorwiegenden Heizsystems. Falls das heutige vorwiegende Heizsystem nach dem 1.1.2005 eingebaut oder erneuert wurde, wurden die Befragten nach der überwiegenden Erzeugung der Wärme davor gefragt. Hier war jedoch angegeben, dass dies auch anzukreuzen ist, wenn sich an der Art der Wärmeerzeugung nichts geändert hat. Darüber hinaus wurde im Vorfeld nicht explizit nachgefragt, ob sich das vorwiegende Heizsystem geändert hat. Folgende Antworten konnten ausgewählt werden:

- ▶ Vorher war keine Heizung vorhanden (z. B. weil das Gebäude neu errichtet wurde)
- ▶ Fernwärme,
- ▶ raumweise über Nachtspeicheröfen oder andere elektrische Heizsysteme“
- ▶ raumweise über brennstoffbetriebene Öfen, Kamine, Raumheizgeräte“
- ▶ wohnungsweise
- ▶ über Zentralheizung oder Blockheizung

Im Falle der raumweisen Beheizung über brennstoffbetriebene Öfen, Kamine, Raumheizgeräte, der wohnungsweisen Beheizung und der Beheizung mittels Zentralheizung oder Blockheizung wurde auch nach dem ursprünglich eingesetzten Energieträger gefragt (Holz/Biomasse, Gas, Öl, Kohle, Strom).

Im Rahmen der Sonderauswertung können die Ergebnisse der Befragung gefiltert und analysiert werden. Für die in diesem Zwischenbericht dokumentierten Analysen wurde der Datensatz auf jene Wohngebäude gefiltert, die vor 2005 errichtet wurden, um somit den Bestand abbilden zu können. Dies geht einher mit der Vorgehensweise der Autoren im Bericht, die bei ihren Auswertungen für den Bestand auch nur jene Wohngebäude betrachtet haben, die bis 2004 errichtet wurden. Bei Anlagen, die in Gebäuden mit Baujahr nach 2005 installiert wurden, wird davon ausgegangen, dass es sich hier um eine Erstinstallation im Neubau und keinen Ersatz des Heizungssystems handelt. Zudem liegen für diese Fälle keine Informationen über den Energieträger vor, der vorher eingesetzt wurde.

¹³ Im Falle von Blockheizkraftwerken sind nur die Energieträger Gas, Öl und Holz/Biomasse auszuwählen.

Um die Substitutionsfaktoren im Bereich Biomasse ableiten zu können, wird der Datensatz des Weiteren auf jene Gebäude reduziert, die entweder Holzpellets, Scheitholz/Stückholz oder Sonstige Biomasse verwenden. Im Unterschied zur Nachfolgeauswertung kann somit explizit auch eine Unterscheidung für Pellets und Scheitholz/Stückholz durchgeführt werden. Folgende Fallzahlen ergeben sich für jene Gebäude, bei denen angegeben wurde, wodurch die Wärme vor dem Tausch des Heizsystems überwiegend erzeugt wurde:

Pellets:

- ▶ Raumweise über Öfen in rd. 15.300 Fällen
- ▶ In der Zentralheizung bzw. in Blockheizungen in rd. 59.800 Fällen

Scheitholz:

- ▶ In der Zentralheizung bzw. in Blockheizungen in rd. 81.800 Fällen

Für sonstige Biomasse waren die Fallzahlen zu gering, sodass aus Datenschutzgründen keine Auswertung erfolgen konnte und somit keine Rückschlüsse gezogen werden können.

Ein Versuch der Auswertung der entsprechend eingesetzten Energieträger des Heizungssystems vor dem Kesseltausch, zeigt Schwächen der Datenbank mit Blick auf die Auswertung von Substitutionsfaktoren auf¹⁴.

Wenn in diesen Gebäuden nun nach dem 1.1.2010 der Haupt-Wärmeerzeuger neu eingebaut wurde oder das Gebäude erstmalig an Fernwärme angeschlossen wurden, kann analysiert werden, womit die Heizwärme vorher überwiegend erzeugt wurde: Wenn zu wenige Datensätze für die einzelnen Energieträger innerhalb der Stichprobe vorliegen, werden diese aus Datenschutzgründen nicht dargestellt. Bei Pellets zeigt sich, dass von den rd. 15.300 Fällen, in denen Pellets raumweise über Öfen eingesetzt werden, in rd. 10.700 Fällen Öl eingesetzt wird (rd. 70 %). Zu den restlichen 30 % kann keine Aussage getätigt werden. Auch beim Einsatz von Pellets in der Zentralheizung zeigen sich Datenlücken für rd. 28 % der Fälle auf. Es liegt nur die Information vor, dass in 18 % der Fälle vorher Gas eingesetzt wurde und in 53 % der Fälle Öl. Werden die substituierten Energieträger für raumweise Beheizung und die Beheizung mittels Zentralheizung bzw. Blockheizung für Pellets zusammengefasst, zeigt sich folgender Energieträgermix:

- ▶ In rd. 15 % der Fälle wurde im Vorfeld Gas eingesetzt
- ▶ In rd. 57 % der Fälle wurde im Vorfeld Öl eingesetzt
- ▶ In rd. 29 % der Fälle liegen keine Informationen vor

Ähnliche Unschärfen zeigen sich bei der Analyse von Scheitholz bzw. Stückholz:

- ▶ In rd. 19 % der Fälle wurde im Vorfeld Gas eingesetzt
- ▶ In rd. 35 % der Fälle wurde im Vorfeld Öl eingesetzt
- ▶ In rd. 25 % der Fälle wurde im Vorfeld ebenfalls Holz bzw. Biomasse eingesetzt
- ▶ In rd. 21 % der Fälle liegen keine Informationen vor

¹⁴ Hier ist darauf hinzuweisen, dass die Befragung und Studie auch nicht für diesen Zweck durchgeführt wurde.

Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, dass die Substitutionsfaktoren auf Basis der IWU-Erhebung aus dem Jahr 2010 nicht für die Analyse berücksichtigt werden.

Differenzierung der Substitutionsfaktoren für Pellets und Scheitholz/Stückholz:

Im Folgenden soll die These überprüft werden, ob Pelletheizungen einen signifikant höheren Anteil an Gasheizungen ersetzen, da Pelletheizungen flächendeckend eingesetzt werden, während Heizungen auf Basis von Scheitholz bzw. Stückholz eher in ländlichen Gebieten ohne Gasversorgung und mit einem hohen Anteil von Ölheizungen eingesetzt werden.

In Tabelle 8 ist der konventionelle Energieträgermix des ursprünglichen Heizungssystems für Pellet-Heizungen und Heizungen auf Basis von Scheitholz/Stückholz als Ergebnis der Auswertung der IWU-Datenbank aus dem Jahr 2010 dargestellt (Diefenbach et al., 2010). Es zeigt sich, dass Pellet-Heizungen vermehrt Öl-Heizungen substituieren und dieser Anteil bei Heizungen auf Basis von Scheitholz/Stückholz geringer ist. Jedoch ist auch ein nicht relevanter Anteil ersichtlich, bei dem sich aufgrund der Konzeption der Studie und der Auswertung keine Rückschlüsse auf den Energieträger des ursprünglichen Heizsystem ziehen lassen.

Tabelle 8: Gegenüberstellung des ursprünglichen Energieträgermix im Falle des Einsatzes von Heizungen mit Pellets bzw. Scheitholz/Stückholz

Konventioneller Energieträger vor dem Kesseltausch	Anteil bei Pellet-Heizungen	Anteil bei Heizung auf Basis von Scheitholz/Stückholz
Gas	15 %	25 %
Öl	57 %	47 %
Rest	29 %	28 %

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Diefenbach et al. (2010)

Aufgrund der großen Unsicherheit der Ergebnisse wird im Rahmen der Emissionsbilanzierung auf die Differenzierung von Pellets und Scheitholz/Stückholz verzichtet.

2.2.4.2.1.1 Ergebnisse

Auf Basis der Analysen werden die Substitutionsfaktoren aus Abbildung 5 unter Berücksichtigung des Energieträgermix von Öfen für die weitere Verwendung in der Emissionsbilanzierung vorgeschlagen. Im Neubau wird auf den Energieträgermix auf Basis der Daten des Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019a) zurückgegriffen, dargestellt in Tabelle 4. Zusätzlich werden in Tabelle 9 jene Substitutionsfaktoren angeführt, die aktuell für die Emissionsbilanzierung herangezogen werden. Alle dargestellten Substitutionsfaktoren berücksichtigen ausschließlich die Substitution des konventionellen Energieträgermix.

Tabelle 9: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren.

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Aktuelle Substitutionsfaktoren (Anlagenbezogen)	65,0	20,0	2,0	3,0	0	10,0
Substitutionsfaktoren Bestand 2016	67,9	12,3	1,0	0	0	18,7
Vorschlag für Neubau 2018	1,7	82,2	0	0	14,2	1,9

Die in Tabelle 9 dargestellten Substitutionsfaktoren wurden auf Basis der Anzahl an Wärmeerzeuger abgeleitet. Eine Verschiebung des Substitutionsmix ist bei Berücksichtigung des Energieeinsatzes bzw. unter Berücksichtigung der Heizkesselgrößen möglich. Aufgrund mangelnder verfügbarer Informationen für das Jahr 2016 werden die Auswirkungen im Folgenden auf Basis der „Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte 2011 bis 2013“ des rheinisch-westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung (rwi) und der Gesellschaft für Sozialforschung und statistischen Analyse mbH (forsa) analysiert (Frondel et al., 2013). In Tabelle 10 ist der durchschnittliche Energieverbrauch je Energieträger für die Jahre 2011 bis 2013 dargestellt.

Tabelle 10: Gegenüberstellung des mittleren Energieverbrauch je Anlage und Energieträger in den Jahren 2011 bis 2013.

Energieträger	Mittlerer Energieverbrauch je Anlage in den Jahren 2011 bis 2013 [kWh]
Nachtspeicherheizung	12.966
Erdgas	17.491
Heizöl	22.615
Fernwärme	8.418
Flüssiggas	15.079
Braunkohle	1.705
Steinkohle	2.455

Quelle: Frondel et al. (2013)

Für die Adaption der Substitutionsfaktoren werden nun die Substitutionsfaktoren im Bestand für das Jahr 2016 aus Tabelle 9 mit den mittleren Energieverbräuchen aus den Jahren 2011 bis 2013 multipliziert. Für die resultierenden gewichteten Energieverbräuche werden in weiterer Folge wieder die Anteile berechnet, sodass die energiegewichteten Substitutionsfaktoren ausgewiesen werden können.

Tabelle 11: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren (Energiegewichtet).

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Aktuelle Substitutionsfaktoren (Anlagenbezogen)	65,0	20,0	2,0	3,0	0,0	10,0
Substitutionsfaktoren Bestand 2016 (Anlagenbezogen)	67,9	12,3	1,0	0	0	18,7
Substitutionsfaktoren Bestand 2016 (Energiegewichtet)	76,9	10,8	0,1	0	0	12,1

Es ist ersichtlich, dass aufgrund des höheren mittleren Energieverbrauchs für Heizungen mit Heizöl sich der Anteil von Öl am Substitutionsmix erhöht.

2.2.4.2.2 Einzelfeuerung

Für die Analyse der Einzelfeuerungen werden zwei Studien ausgewertet und gegenübergestellt. Einerseits kann auf die co2online-Studie zur Nutzung ergänzender Heizsysteme im Gebäudebereich zurückgegriffen werden (Köhler et al., 2018), andererseits kann die Studie des INFRO-Instituts zur Energieholzverwendung in privaten Haushalten verwendet werden (Döring et al., 2020). Darüber hinaus werden die Ergebnisse den Zahlen der IWU –Studie „Datenbasis Gebäudebestand: Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand“ dargestellt (Diefenbach et al., 2010). Da Zusatzheizungen gleichzeitig zu Hauptheizungssystemen installiert sind, wird in diesem Fall nicht analysiert, welches Heizsystem im Vorfeld im Einsatz war, sondern in Kombination mit welchem Hauptheizsystem die Zusatzheizungen installiert sind. Auf Basis des Energieträgermix der Hauptheizungen können somit Substitutionsfaktoren abgeleitet werden.

Aufgrund fehlender Datenbasis kann bei der Analyse der Substitutionsfaktoren keine Differenzierung in Neubau und Bestand vorgenommen werden. Um etwaigen Mehrverbrauch durch den Einsatz von Zusatzheizungen bei der Quantifizierung der vermiedenen Emissionen durch Erneuerbare abbilden zu können, werden im weiteren Projektverlauf u.a. auch Nutzungsgrade und Nutzerverhalten recherchiert, die in die Berechnung der vermiedenen Emissionen einfließen.

Die von co2online im Rahmen einer Sonderauswertung zur Verfügung gestellten Daten sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Daten enthalten Fallzahlen über die Kombination des Energieträgers des primären Heizsystems und dem verwendeten Energieträger des sekundären Heizsystems basierend auf dem co2online-Ratgeber „Heizcheck“.

Tabelle 12: Ergebnisse der co2-online Befragung zu Zusatzheizungen

		N°	Verwendete Energieträger sekundäres Heizsystem					keine	Summe
			Brennholz	Laubholz	Nadelholz	Holzpellets	Holzbriketts		
		1	2	3	4	5	6		
Energieträger des primären Heizsystems (energietraeger_ph)	Erdgas	1	883	61	17	44	22	7344	8371
	Fernwärme	2	65	2	1	4	3	828	903
	Flüssiggas	3	107	11	1	5	1	360	485
	Heizöl	4	1216	73	34	53	22	6248	7646
	Holzpellets	5	113	11	3	0	1	558	686
	Strom	6	765	32	6	64	41	2861	3769
	Wärmepumpe	7	148	15	5	10	6	1034	1218
Summe			3297	205	67	180	96	19233	23078

Quelle: Zur Verfügung gestellte Auswertung aus Köhler et al. (2018).

Eine erste Analyse der unbereinigten Daten zeigt, dass Stromheizungen überrepräsentiert sind: so liegt deren Anteil in der Stichprobe bei rd. 16 %. Laut Cischinsky & Diefenbach (2018) betrug der Anteil im Jahr 2016 3,2 %. Einer der Gründe hierfür liegt vor allem an der nicht gesteuerten Datenerhebung im Rahmen des Online-Ratgeber „Heizcheck“. Die Daten werden von den Nutzern eingetragen, wenn diese den Online-Ratgeber berücksichtigen. Dadurch liegt eine Verzerrung der Erhebung vor, da anzunehmen ist, dass vor allem jene Verbraucher Gebrauch von dem Online-Ratgeber machen, deren Endenergieverbrauch hoch ist bzw. die über eine Substitution der Wärmeerzeugung nachdenken. Dadurch kann die Repräsentativität der Daten nicht garantiert werden und es zeigen sich die Verschiebungen (siehe auch Abschnitt zu Repräsentativität der Datenquellen in 2.2.3).

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens im Auftrag des UBA hat co2online die über Online-Tools erfassten Daten auf Repräsentativität geprüft (Metzger et al., 2019). Um eine repräsentative

Grundgesamtheit zu erlangen, wurde die Anzahl der Einträge je Energieträger dahingehend mit Gewichtungsfaktoren multipliziert, dass die Verteilung der Daten einem Referenzdatensatz entsprechen. Dies wird in weiterer Folge für den vorliegenden, unbereinigten Datensatz durchgeführt. Als Referenzdatensatz wird der Energieträgermix für das Jahr 2016 aus der IWU-Erhebung herangezogen (Cischinsky & Diefenbach, 2018).

Tabelle 13 zeigt die entsprechenden Unterschiede hinsichtlich der Anteile der Energieträger des primären Heizsystems auf Basis der co2online-Erhebung und der IWU-Erhebung. Ebenso sind die daraus abgeleiteten Gewichtungsfaktoren als Verhältnis der Anteile laut IWU-Erhebung (Soll-Werte) und der Anteile der co2online Stichprobe (Ist-Werte) dargestellt¹⁵.

Tabelle 13: Überblick über den Energieträgermix der Hauptheizung in der Stichprobe der co2online-Erhebung und der Datenerhebung des IWU zum Wohngebäudebestand 2016

Energieträger des primären Heizsystems	Anzahl Zusatzheizungen lt. co2online Erhebung 2018	Anteil innerhalb der Stichprobe [%] 2018	Anteil laut IWU Erhebung 2016 [%]	Gewichtungsfaktor	Anzahl Zusatzheizungen co2online Erhebung nach Gewichtung
Erdgas	1027	36,3	52,5	1,45	1486
Fernwärme	75	3,9	6,4	1,64	123
Flüssiggas	125	2,1	1,6	0,76	95
Heizöl	1398	33,1	27,5	0,83	1160
Holz, Holzpellets	128	3,0	5,3	1,78	228
Strom	908	16,3	3,2	0,2	178
Wärmepumpen	184	5,3	3,2	0,61	112

Quellen: Eigene Auswertung auf Basis von Köhrer et al. (2018) und Cischinsky & Diefenbach (2018)

Werden nun die Fallzahlen für die Zusatzheizung mit den entsprechenden Gewichtungsfaktoren je Energieträger des Hauptheizungssystems multipliziert, ergeben sich die neuen Fallzahlen für Zusatzheizungen je Energieträger, die ebenfalls in Tabelle 13 dargestellt sind.

Als weitere Datenquelle für das Ableiten der Substitutionsfaktoren für Biomasse, die in Zusatzheizungen eingesetzt werden, bietet sich die Erhebung des INFRO-Institut zur Energieholzverwendung in privaten Haushalten an (Döring et al., 2020). Diese Daten wurden im Rahmen der Erhebung bereits auf Repräsentativität geprüft und unter Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren adaptiert.

Der Energieträgermix des primären Heizungssystems auf Basis der INFRO-Erhebung ist gemeinsam mit den Ergebnissen der co2online-Auswertung und der Auswertung der IWU-Datenerhebung in Tabelle 15 dargestellt.

Zusätzlich werden die Zahlen der IWU-Erhebung angeführt. Da in der Datenerhebung des IWUs zum Wohngebäudebestand 2016 keine Fragen mehr hinsichtlich der Zusatzheizungen gestellt

¹⁵ Für Details zur Gewichtung wird auf Metzger et al. (2019), Seite 48 ff. verwiesen.

wurden, wird für einen Vergleich auf die Erhebung aus dem Jahr 2010 zurückgegriffen¹⁶ (Diefenbach et al., 2010). In der Befragung wurde die Frage gestellt, ob es im Gebäude einen oder mehrere brennstoffbetriebene Öfen oder Kamine gibt, die ergänzend zu dem vorwiegenden Heizsystem (Heizkessel oder Therme, Wärmepumpe, Blockheizkraftwerk und elektrische Direktheizung) eingesetzt werden und welcher Brennstoff überwiegend dafür verwendet wird (Scheitholz/Stückholz oder Holzpellets). Die Ergebnisse in Tabelle 14 zeigen auf, wie viel Gebäude über eine Zusatzheizung auf Basis von Holzpellets und Scheitholz bzw. Stückholz verfügen und welcher Energieträger beim vorwiegenden Heizsystem im Einsatz ist¹⁷.

Tabelle 14: Überblick über den Anteil an Hauptheizungen, die eine Zusatzheizung mit Pellets oder Scheitholz/Stückholz im Jahr 2009 in Betrieb hatten und die daraus abgeleiteten Substitutionsfaktoren

Vorwiegendes Heizsystem	Anzahl Zusatzheizung Holzpellets	Anzahl Zusatzheizungen Scheitholz/ Stückholz	Substitutionsfaktoren Holzpellets und Scheitholz/ Stückholz	Substitutionsfaktoren Holzpellets und Scheitholz/ Stückholz ohne EE ersetzt EE
Elektrische Direktheizung		25.483	0,4 %	0,5 %
Erdgas	15.154	2.548.206	45,2 %	49,1 %
Flüssiggas		119.747	2,1 %	2,3 %
Holzpellets		77.093	1,4 %	0
Scheitholz/ Stückholz		166.932	2,9 %	0
Sonstige Biomasse		15.519	0,3 %	0
Öl	17.023	2.497.142	44,3 %	48,1 %
Wärmepumpe		188.087	3,3 %	0
Summe	32.177	5.638.209	100 %	100 %

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Diefenbach et al. (2010)

Tabelle 15: Vergleich der Daten der Analyse auf Basis co2online und INFRO

Energieträger der primären Heizungssystems	Energieträgermix auf Basis der gewichteten Werte der co2 online-Auswertung (2018)	Energieträgermix auf Basis der INFRO Erhebung (2018)	Energieträgermix auf Basis der IWU Erhebung (2010)
Erdgas	44 %	33 %	45 %
Fernwärme	4 %	3 %	2 %

¹⁶ Die Datenerhebung erfolgte zwischen Herbst 2009 und Frühjahr 2010 und beschreibt somit nicht den vollständigen Gebäudebestand im Jahr 2010.

¹⁷ In 785.884 hochgerechneten Fällen wurde keine Angabe zum vorwiegenden Heizsystem gemacht bzw. war als vorwiegendes System weder ein Heizkessel, eine Wärmepumpe, ein BHKW oder eine elektrische Direktheizung im Einsatz. Fernwärmeheizungen mit Zusatzsystem sind in dieser Auswertung leider ausgenommen.

Energieträger der primären Heizungssysteme	Energieträgermix auf Basis der gewichteten Werte der co2 online-Auswertung (2018)	Energieträgermix auf Basis der INFRO Erhebung (2018)	Energieträgermix auf Basis der IWU Erhebung (2010)
Flüssiggas	3 %		2 %
Heizöl	34 %	27 %	44 %
Holz, Holzpellets	7 %	26 %	5 %
Strom	5 %	7 %	0,4 %
Wärmepumpen	3 %		3 %
Sonstiger Energieträger		6 %	
Keine Angabe		0,4 %	
Summe	100 %	100 %	100 %

Quellen: Eigene Berechnungen auf Basis von Diefenbach et al. (2010); Döring et al. (2020); Metzger et al. (2019)

Aufgrund unterschiedlicher Klassifizierung (Wärmepumpe und Flüssiggas) ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in Tabelle 15 nur eingeschränkt möglich.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Substitutionsfaktoren zeigt gleiche Trends der co2online-Erhebung und jener des INFRO-Instituts im Vergleich zu 2010, jedoch sind auch größere Unterschiede ersichtlich:

- ▶ Die Substitution von Heizöl verringert sich in beiden Fällen, (von rd. 44 % im Jahr 2010 auf 34 % (co2online) bzw. 27 % in der INFRO-Erhebung). Dies ist mit der vermehrten Stilllegung von Ölkesseln in den letzten Jahren erklärbar.
- ▶ Auch der Anteil von Erdgas reduziert sich in beiden Fällen, wobei die co2online-Auswertung eine minimale Reduktion von 45 auf 44 % aufzeigt, während die Ergebnisse der INFRO-Erhebung den Anteil von Erdgas mit 33 % darstellen.
- ▶ Die Rolle von Fernwärme als Hauptheizung in Kombination mit einer Biomassebasierten Zusatzheizung gewinnt in beiden Fällen an Bedeutung.
- ▶ Ebenso werden in beiden Fällen vermehrt strombasierte Heizungen im Vergleich zu 2010 zusammen mit Zusatzheizungen betrieben, wobei in diesem Fall in der INFRO-Erhebung jedoch davon ausgegangen werden muss, dass hier auch Wärmepumpen eingeschlossen sind.

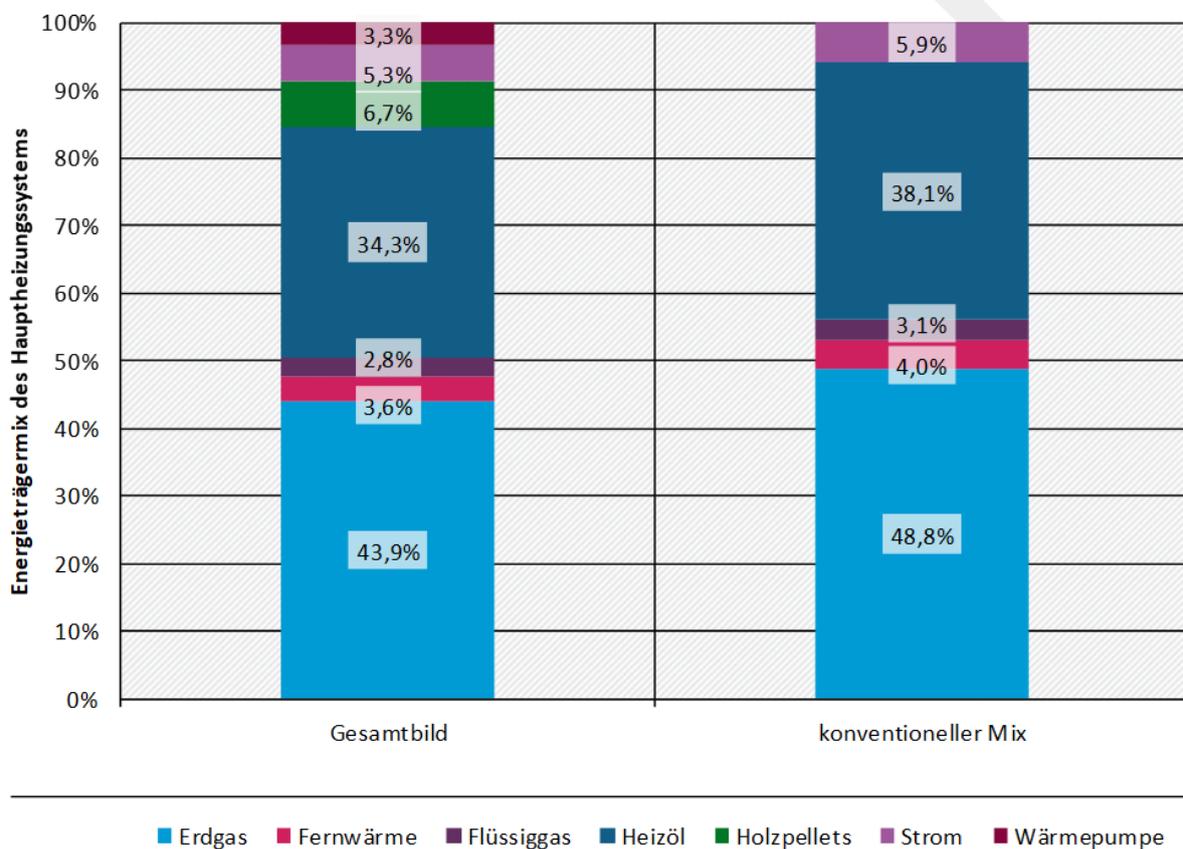
Keine der analysierten Quellen lässt Rückschlüsse zu, ob Biomasse-Zusatzheizungen tatsächlich nicht mehr mit Braun- bzw. Steinkohle Heizungen kombiniert werden, da dieser Energieträger nicht angeführt wird. Das Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018 „Wohnen in Deutschland“ zeigt auf, dass nur in rd. 0,3 % der Fälle in Deutschland noch Briketts/Braunkohle bzw. Koks/Steinkohle eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund werden die Ergebnisse als plausibel eingestuft.

Beide Erhebungen weisen Unsicherheiten hinsichtlich der Daten auf: Während die Daten der co2online-Datenbank über die Online-Tools zufällig erhoben werden und so im Nachgang gewichtet werden müssen, wurde in der Erhebung des INFRO-Instituts nicht direkt nach dem Hauptwärmeerzeuger gefragt, sondern nach der eingesetzten Primärenergie, ohne den Begriff

„primär“ zu spiegeln. Auch hierdurch kann es zu Verzerrungen aufgrund der subjektiven Einschätzung des primären Energieträgers des Befragten kommen.

In Abbildung 6 sind aufgrund der differenzierten Darstellungen von Strom und Wärmepumpen als primäres Heizungssystem die Substitutionsfaktoren dargestellt, die auf Basis der co2online-Auswertung ermittelt wurden. In der Gesamtschau zeigt sich, dass in rd. 44 % der Fälle Zusatzheizungen in Kombination mit Erdgas-Heizungen eingesetzt werden, gefolgt von der Kombination mit Anlagen, die mit Heizöl betrieben werden (rd. 34 %). In rd. 5 % der Fälle werden Zusatzheizungen mit elektrischen Direktheizungen und in 6,7 % mit Holzpellets als primärer Energieträger kombiniert. Das Bild auf der rechten Seite zeigt das Gesamtbild ohne die erneuerbaren Energien als primären Energieträger: Durch die Nichtberücksichtigung der Substitution von Holzpellets und Wärmepumpen ergibt sich somit ein Anteil von Erdgas von rd. 49 %, Heizöl wird in rd. 37 % der Fälle substituiert, gefolgt von Strom Direktheizungen (rd. 7 %), Fernwärme (rd. 4 %) und Flüssiggas (rd. 3 %).

Abbildung 6: Überblick über die Substitutionsfaktoren für Einzelfeuerungen, die auf Basis der co2online-Zusatzauswertung für 2018 abgeleitet wurden.



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis der co2online-Zusatzauswertung

Während der Anteil von Erdgas nahezu konstant bleibt (51,9 % 2009; 52,5 % 2016), verliert Heizöl als Hauptenergieträger für die Beheizung an Bedeutung (33,7 % 2009, 27,5 % 2016). Gleichzeitig steigt der Anteil von Strom (ausgenommen Wärmepumpen) als Hauptenergieträger von 4,3 % im Jahr 2009 auf 6,4 % im Jahr 2016.

2.2.4.2.2.1 Mehrverbrauch beim Einsatz von Zusatzheizungen

Einzelfeuerungen werden in der Regel zusätzlich zu einem primären Heizungssystem eingesetzt. Dabei ist in vielen Fällen die Hauptmotivation der Nutzer für den Einsatz von Einzelfeuerungen

die Verbesserung der Behaglichkeit und die Realisierung höherer Raumtemperaturen (Köhler et al., 2018, Seite 17). Dies führt vielfach dazu, dass der gesamte Endenergieverbrauch in Gebäuden mit zusätzlicher Einzelraumfeuerung über jenem von Gebäuden ohne Einzelraumfeuerung liegt.

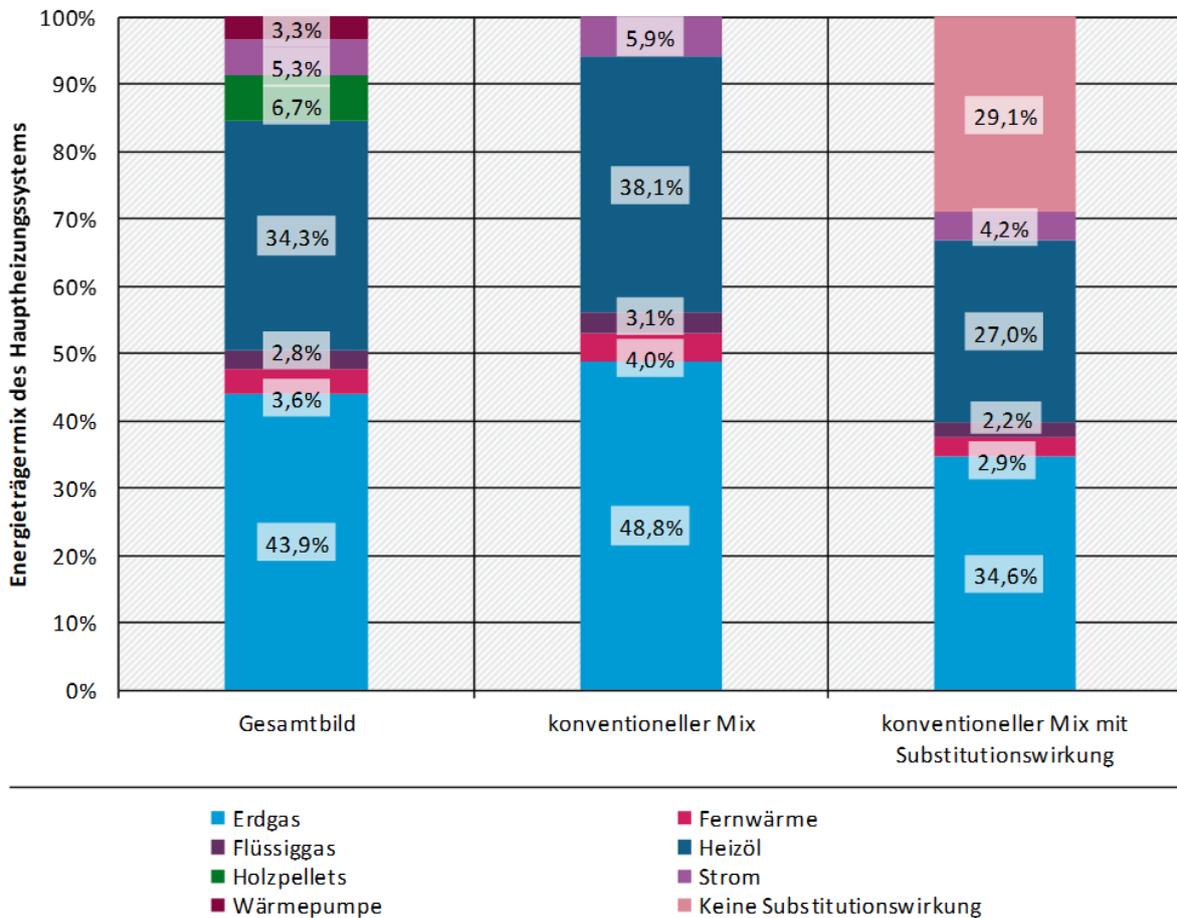
Wie sich in den vorangegangenen Analysen gezeigt hat, werden Einzelfeuerungen primär in Kombination mit Gasheizungen (in 47 bis 52 % der Fälle, je nach Datenquelle) bzw. in Kombination mit Ölheizungen (in 38 bis 39 % der Fälle) eingesetzt.

Die co2online-Studie „Die Zusatzheizung – Nutzung ergänzender Heizsysteme im Gebäudebereich“ hat sich unter anderem auch der Fragestellung der Substitutionswirkungen von Einzelfeuerungen angenommen (Köhler et al., 2018). Auf Basis der Auswertung der Daten des Online-Ratgebers „HeizCheck“ wurde ein Mehrverbrauch von Gebäuden mit Zusatzheizung im Vergleich zu Gebäuden ohne Zusatzheizung bezogen auf den spezifischen Gesamtenergieverbrauch von $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ermittelt. Dabei beträgt der durchschnittliche Verbrauch der Zusatzheizung rd. $39 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Die Daten zeigen, dass die durchschnittlich eingesparte Endenergie der Primärheizung rd. $28 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ beträgt¹⁸. Unter Berücksichtigung dieser Daten kann angenommen werden, dass durch den Einsatz von einer Kilowattstunde Endenergie der Holz-Einzelfeuerung somit $0,72$ ($28 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ dividiert durch $39 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) Kilowattstunden Endenergie des Energieträgers des primären Heizungssystems eingespart werden können. Somit ist für rd. 29,1 % des Zusatzheizungsverbrauchs von keiner Substitutionswirkung auszugehen, was einerseits auf schlechtere Effizienz der Zusatzheizung gegenüber dem primären Heizungssystem zurückzuführen ist sowie auf die höheren Raumtemperaturen durch den Einsatz von Zusatzheizungen. In der Studie liegen keine Informationen dazu vor, in wie fern sich die durchschnittlichen Werte hinsichtlich Mehrverbrauch und Reduktion des Verbrauchs des primären Heizungssystems für verschiedene Energieträger unterscheiden. Da den Forschenden keine anderen Studien mit entsprechenden Informationen bekannt sind, wird der abgeleitete Faktor für alle Energieträger des primären Heizungssystems angesetzt.

Vor diesem Hintergrund wird mit Blick auf die Substitutionsfaktoren für Einzelfeuerungen im Rahmen der Emissionsbilanzierung vorgeschlagen, dass die im vorangegangenen Abschnitt ermittelten Substitutionsfaktoren jeweils um jenen Anteil reduziert werden, bei dem keine Substitutionswirkung erwartet wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 für den konventionellen Mix mit Substitutionswirkung dargestellt. Dabei wurde ein Energieträger ohne Substitutionswirkung eingeführt, um jenen Anteil von Zusatzheizungen darzustellen, mit dem keine Substitutionswirkung einhergeht.

¹⁸ Die Autoren aus Köhler et al. (2018) weisen darauf hin, dass sich der Verbrauch der Zusatzheizung nicht aus der Summe der eingesparten Endenergie der Primärheizung ($28 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) und dem Gesamtmehrverbrauch ($20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) abbilden lässt, da für die Berechnung der Median verwendet wurde und nichtnormalverteilte Verbrauchsdaten zu Grunde liegen.

Abbildung 7: Überblick über die Substitutionsfaktoren für Einzelfeuerungen, die auf Basis der co2online-Zusatzauswertung für 2018 abgeleitet wurden und um jenen Anteil bereinigt wurden, mit dem keine Substitutionswirkung einhergeht.



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis der co2online-Auswertung

2.2.4.2.2.2 Ergebnisse

Auf Basis der Analysen werden die Substitutionsfaktoren, die im vorhergehenden Abschnitt abgeleitet wurden und um jenen Anteil reduziert werden, mit dem keine Substitutionswirkung einhergeht, in Tabelle 16 darstellt. Aufgrund der fehlenden Datenbasis kann für die Substitutionsfaktoren von Einzelfeuerungen keine Differenzierung in Neubau und Bestand vorgenommen werden. Im Falle der INFRO Erhebung werden Wärmepumpen, die gemeinsam mit Einzelfeuerungen eingesetzt werden, unter dem Energieträger Strom zusammengefasst. Da kein Rückschluss auf Wärmepumpen gezogen werden kann, wird vorgeschlagen, für die Emissionsbilanzierung zukünftig die Faktoren auf Basis der co2online-Auswertung zu verwenden.

Tabelle 16: Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Einzelraumfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren.

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Aktuelle Substitutionsfaktoren (Anlagenbezogen)	41,0	50,0	0	1,0	2,0	6,0
Neu ermittelte Substitutionsfaktoren auf Basis von co2online (2018) – unter Berücksichtigung des Anteils ohne Substitutionswirkung	27,0	36,8	0	0	2,9	4,2

* Inklusive Flüssiggas

Die in Tabelle 16 dargestellten Substitutionsfaktoren wurden auf Basis der Anzahl von Wärmeerzeuger abgeleitet. Eine Verschiebung des Substitutionsmix ist bei Berücksichtigung des Energieeinsatzes bzw. unter Berücksichtigung der Heizkesselgrößen möglich. Analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 2.2.4.2.1.1 werden die Substitutionsfaktoren für das Jahr 2018 mit den mittleren Energieverbräuchen je Energieträger aus den Jahren 2011 bis 2013 multipliziert (Tabelle 10) und anschließend die Anteile je Energieträgermix wieder ausgewiesen.

Tabelle 17: Überblick über die abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Einzelfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren (Energiegewichtet)

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren auf Basis von co2online 2018 (Energiegewichtet)	32,5	34,2			1,3	2,9

Es ist ersichtlich, dass aufgrund des höheren mittleren Energieverbrauchs für Heizungen mit Heizöl sich der Anteil von Öl am Substitutionsmix erhöht. Ebenso erhöht sich im Jahr 2018 in beiden Varianten der Anteil von Gas.

2.2.4.3 Solarthermie

Die Substitutionsfaktoren für Solarthermie werden differenziert nach Anlagen für die Warmwasserbereitung und Kombianlagen im Gebäudebestand ermittelt. Darüber hinaus wird – wie bei den vorangegangenen Ausführungen – auch eine Differenzierung in Bestand und Neubau betrachtet.

Eine separate Betrachtung von Großflächensolarthermieanlagen in der Fernwärme, in der Industrie und mittels Schwimmbadabsorbern in Freibädern kann aufgrund der beschränkten Datenbasis nicht durchgeführt werden. Dies ist aufgrund der noch geringen Relevanz in diesen Einsatzfeldern vertretbar (siehe auch 0).

Bei der Ermittlung von Substitutionsfaktoren für die Solarthermie wird analog zu den Analysen der Substitutionsfaktoren von Einzelfeuerungsanlagen ermittelt, in Kombination mit welcher Hauptheizung das System in Betrieb ist (siehe auch 2.2.4.2.2).

Als primäre Datenquelle wird in diesem Fall auf die IWU-Datenerhebung für das Jahr 2016 zurückgegriffen (Cischinsky & Diefenbach, 2018). Darüber hinaus werden Substitutionsfaktoren für das Jahr 2010 auf Basis der IWU-Erhebung aus dem Jahr 2010 abgeleitet (Diefenbach et al., 2010).

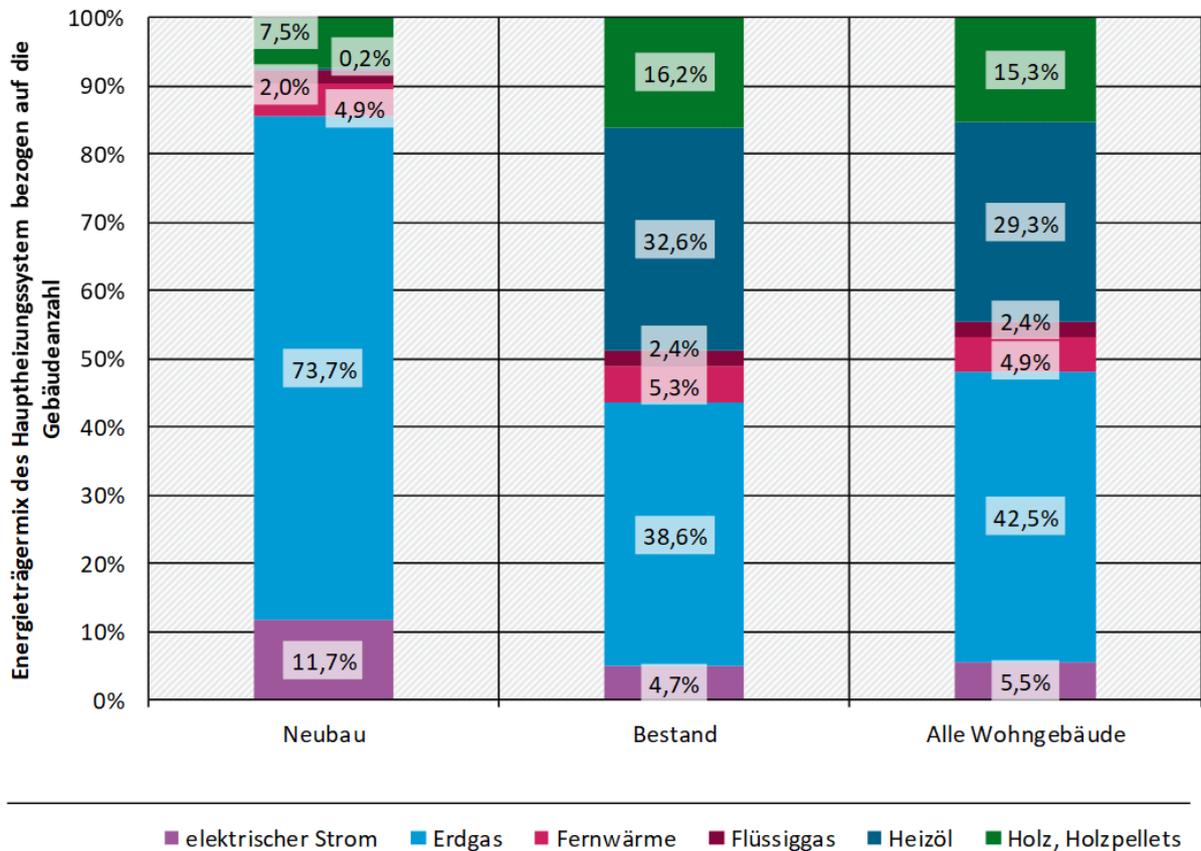
Auswertung der Auswertungsdatenbank „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016“: Im ersten Schritt wird analysiert, wie sich der Anteil der Solarthermieanlagen je Energieträger für den Haupt-Wärmeerzeuger unterscheidet. Die Gebäudeeigentümer wurden im Rahmen des Interviews gefragt, ob eine Solarwärmanlage (Solarthermie) installiert ist. Wenn diese Frage bejaht wurde, wurde in weiterer Folge erhoben, ob die Anlage nur zur Warmwasserversorgung oder zur Warmwasserversorgung und Heizungsunterstützung dient.

Die für das vorliegende Forschungsvorhaben durchgeführte Auswertung der Datenbank filtert jene Gebäude, in denen eine solare Wärmanlage im Einsatz ist und wertete die entsprechenden Energieträger aus, die in diesen Gebäuden überwiegend für die Beheizung verwendet werden (Erdgas, Heizöl, Holz, Holzpellets, Biomasse, Flüssiggas, elektrischer Strom, Kohle). Um zusätzlich noch Informationen zum gemeinsamen Einsatz von Solarthermieanlagen und Fernwärme zu erhalten, werden jene Fälle ausgewertet, in denen bei der Frage des Energieträgers für die überwiegende Beheizung keine Angabe gemacht wurde, da Fernwärme nicht als Energieträger ausgewählt werden kann.

Abbildung 8 zeigt den Energieträgermix des Hauptheizungssystems für jene Gebäude an, die über eine Solarthermie Anlage verfügen. Es ist ersichtlich, dass im Neubau¹⁹ der Anteil von Solarthermieanlagen in Kombination signifikant höher ist. Im Bestand dominiert zwar der Anteil von Gasheizungen die mit Solarthermieanlagen kombiniert werden, jedoch sind auch Anlagen, die mit Heizöl betrieben werden, stark vertreten, die im Neubau mit 0,2 % eigentlich keine Rolle mehr spielen. Auch Heizungen auf Basis von Holz, und Holzpellets sind im Bestand wesentlich öfter in Kombination mit Solaranlagen anzutreffen als im Neubau. Der Anteil jener Solarthermieanlagen, der gemeinsam mit Fernwärme im Einsatz ist, ist für Bestand und Neubau sehr ähnlich. Ebenso ist der Anteil der Kombination Solaranlage plus Flüssiggas im Bestand und Neubau ähnlich.

¹⁹ Definiert als Gebäude mit Baujahr nach 2010

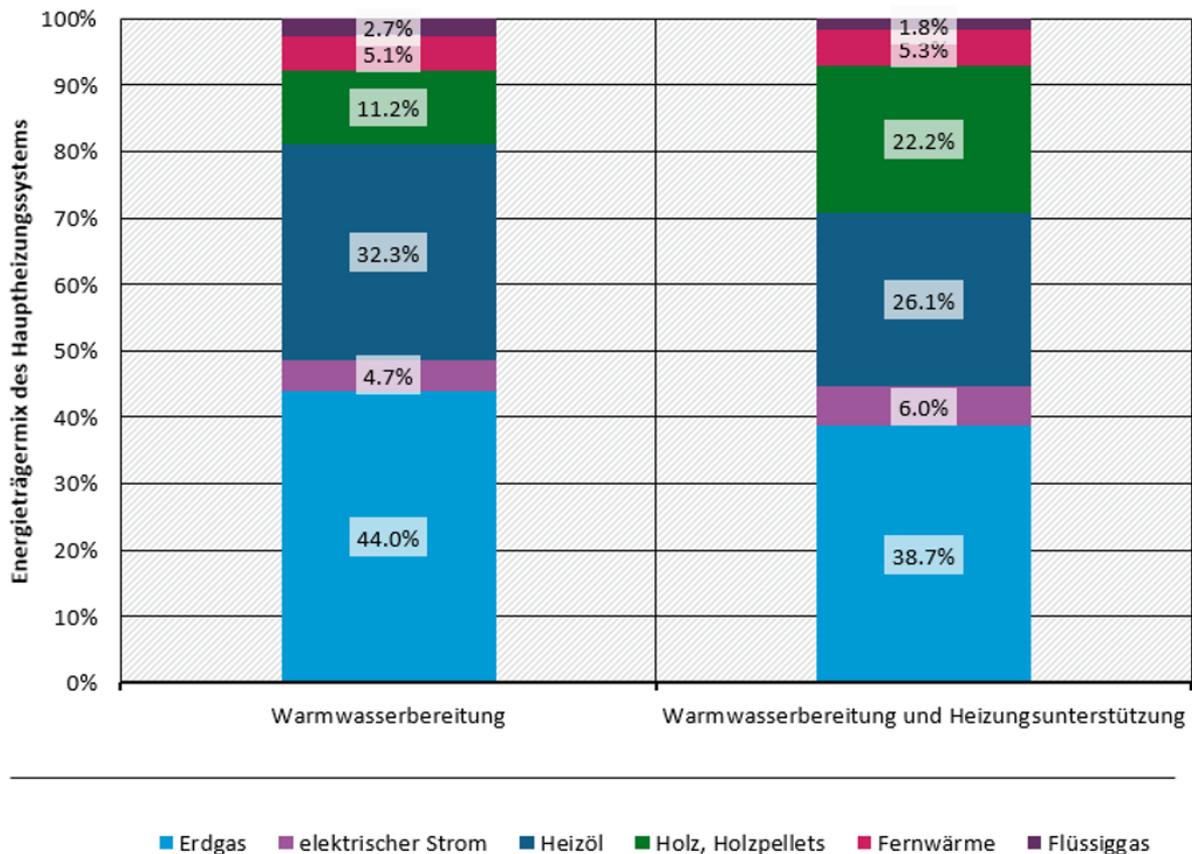
Abbildung 8: Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem beim Einsatz von Solarthermieanlagen, differenziert nach Bestand und Neubau



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018)

Die Ergebnisse der Analyse des Energieträgermix für Anlagen für die reine Warmwasserbereitung und jene Anlagen, die zusätzlich zur Heizungsunterstützung verwendet werden, ist in Abbildung 9 für Neubau und Bestand gemeinsam dargestellt. Es zeigt sich ein homogeneres Bild, wobei der Anteil von Solaranlagen für die Warmwasserbereitung in Gebäuden mit Erdgas oder Erdöl betriebenen Heizanlagen höher ist als jener von Kombianlagen. Jedoch ist der Anteil von Anlagen zur Heizungsunterstützung kombiniert mit Holz und Holzpellets betriebenen Heizungen signifikant höher als die Kombination von reinen Anlagen zur Warmwasserbereitung mit Holz und Holzpellets. In etwas mehr der Fälle werden Anlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung zusammen mit Heizungen basierend auf dem Energieträger Strom eingesetzt.

Abbildung 9: Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem bei Solarthermieanlagen, differenziert nach Art der Solaranlage



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018)

Um die Substitutionsfaktoren für konventionelle Energieträger ableiten zu können, ist eine Unterscheidung des Energieträgers elektrischer Strom in Wärmepumpen und elektrische Direktheizungen erforderlich²⁰.

Eine Kreuzauswertung des eingesetzten Energieträgers für die überwiegende Beheizung und des Haupt-Wärmeerzeugers der Heizung (Heizkessel, Ofen/Öfen, Elektrische Heizgeräte, Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke) lässt diese Analyse zu. Im Ergebnis zeigt sich Folgendes:

- ▶ Bei Solaranlagen mit Warmwasserbereitung werden in 3,2 % der Fälle Wärmepumpen eingesetzt und in 1,5 % der Fälle elektrische Heizgeräte.
- ▶ Bei Kombianlagen zur Bereitstellung von Warmwasser und Raumwärme werden in allen Fällen Wärmepumpen (6 % der Fälle) als Haupt-Wärmeerzeuger eingesetzt.

Beim Einsatz von Solarthermieanlagen gemeinsam mit Wärmepumpen kann es zu einer Überschätzung der vermiedenen Emissionen kommen. Grund dafür ist die Bilanzierungsart des Endenergieverbrauchs auf Basis der AGEE-Stat. Für Solarthermie wird auf Basis der installierten Kollektorfläche für Solarthermie und der installierten Anlagen unter Berücksichtigung des Rückbaus der Endenergieverbrauch ermittelt. Auch der Endenergieverbrauch für oberflächennahe

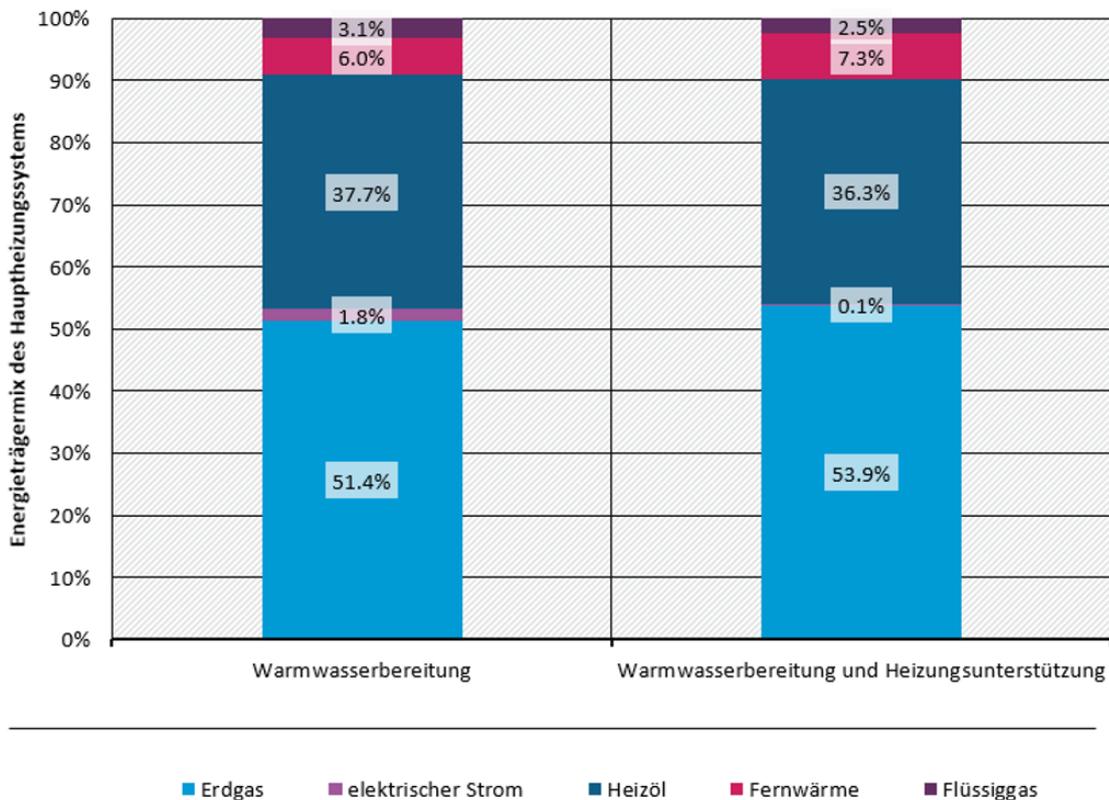
²⁰ Bei der Analyse von Substitutionsfaktoren für Hauptheizungssystem wurde im Rahmen der IWU-Befragung explizit nach dem Heizwärmeerzeuger (u. a. Wärmepumpen) vor dem Austausch gefragt und diese beim Ableiten der Substitutionsfaktoren eliminiert (siehe 0 aber auch 2.2.4.2.2).

Geothermie und Umweltwärme, die durch Wärmepumpen nutzbar gemacht wird, wird über die Absatzzahlen abgeschätzt (siehe hierzu auch AGEE-Stat (2020a)). Da keine Abschläge im Falle des gemeinsamen Einsatzes berücksichtigt sind, werden die Endenergieverbräuche leicht überschätzt und somit auch die vermiedenen Emissionen. Eine Korrektur in der Emissionsbilanzierung wäre auf Basis von quantifizierten Abschlagsfaktoren möglich, die zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs für Wärmepumpen (Umweltwärme und oberflächennahe Geothermie) führen könnte. Aufgrund der geringen Anzahl des gemeinsamen Einsatzes von Solarthermieanlagen und Wärmepumpen wird jedoch davon abgesehen.

Das Ergebnis für die Substitutionsfaktoren für den konventionellen Energieträgermix ist in Abbildung 10 dargestellt. In rd. 51 % bzw. rd. 54 % der Fälle wird bei Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und bei Kombianlagen Erdgas ersetzt. Bei Kombianlagen wird in rd. 7 % der Fälle Fernwärme substituiert, während dies bei Anlagen zur Warmwasserbereitung nur in 6 % der Fälle stattfindet. Anlagen zur Warmwasserbereitung substituieren jedoch in etwas mehr Fällen Heizöl (rd. 38 % im Vergleich zu rd. 36 %). Bei Flüssiggas und Fernwärme gibt es nur geringe Unterschiede.

Aufgrund der geringen Unterschiede bei den Substitutionsfaktoren für Anlagen zur Warmwasserbereitung und Kombianlagen wird vorgeschlagen, die Differenzierung nicht vorzunehmen.

Abbildung 10: Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem bei Solarthermieanlagen, ohne der Substitution von Erneuerbaren durch Erneuerbare, differenziert nach Art der Solaranlage



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018)

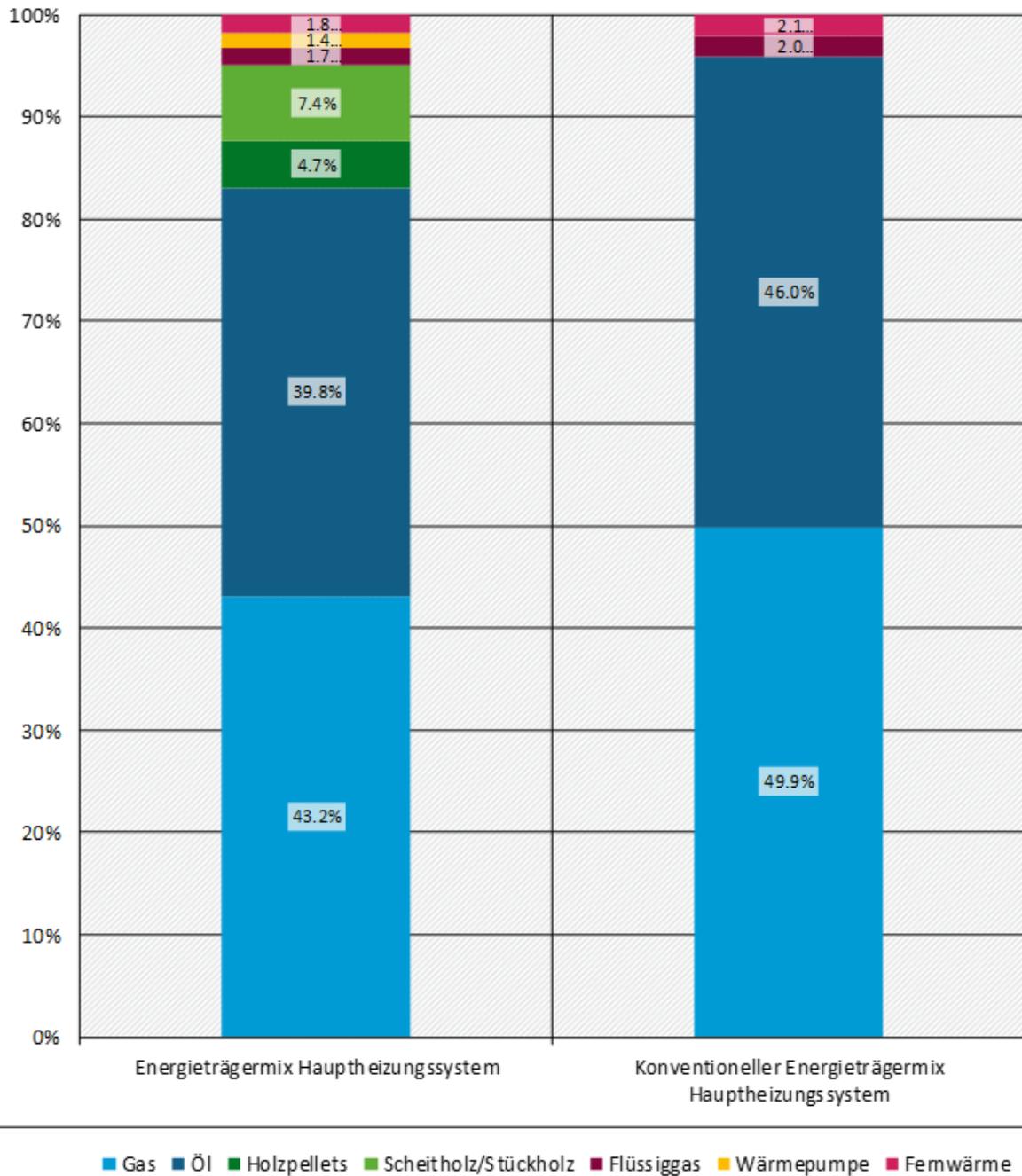
Auswertung der Auswertungsdatenbank „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2010“: Auch auf Basis der Ergebnisse der IWU-Erhebung aus dem Jahr 2010 lassen sich Substitutionsfaktoren für Solaranlagen ableiten. Analog zur Befragung im Jahr 2016 wurden Gebäudeeigentümer befragt, ob auf dem Gebäude eine Solarthermische Anlage installiert ist.

Bei der Analyse des Systems, das überwiegend die Heizwärme erzeugt, erfolgt in der Abfrage direkt eine Differenzierung nach Erzeuger (Heizkessel oder Therme, Wärmepumpe, Blockheizkraftwerke, elektrische Direktheizung) bzw. Heizart (Fernwärme, Blockheizung, Zentralheizung oder wohnungsweise Beheizung) und anschließend wird nach dem eingesetzten Brennstoff gefragt.

Die Sonderauswertung zeigt sich die Einschränkungen, dass sich keine Informationen hinsichtlich des Einsatzes von Solarthermieanlagen gemeinsam mit elektrischen Direktheizungen ableiten lassen, da aufgrund des Datenschutzes und der geringen Fallzahlen keine Werte im Rahmen der Sonderauswertung vorliegen.

In Abbildung 11 ist der Energieträgermix des Hauptheizungssystems dargestellt, wenn Solarthermieanlagen als Zusatzheizungen verwendet werden. Es zeigt sich, dass Solarthermieanlagen vor allem mit Gas- und Ölheizungen gekoppelt werden (Insgesamt rd. 83 % der Fälle). In rd. 12 % der Fälle erfolgt die Kombination mit Heizungen, die Holzpellets oder Scheitholz bzw. Stückholz einsetzen. Der konventionelle Mix ist ebenfalls in Abbildung 11 dargestellt. Eine separate Analyse des Neubaus ist auf Basis der vorliegenden Daten nicht möglich.

Abbildung 11: Übersicht über die Energieträger des Hauptheizungssystem beim Einsatz von Solarthermieanlagen im Jahr 2010



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Diefenbach et al. (2010)

2.2.4.3.1 Ergebnisse

Eine Gegenüberstellung der Substitutionsfaktoren mit den aktuellen Werten, die in der Emissionsbilanzierung im Jahr 2018 verwendet wurden²¹, zeigt Tabelle 18. Es zeigt sich, dass mittlerweile weniger Ölheizungen mit Solarthermieanlagen kombiniert werden als dies noch bei der Berechnung der ursprünglichen Faktoren der Fall war. Da die Anteile der substituierten Gasheizungen einen ähnlichen Anteil aufweisen, zeigt sich eine Verschiebung Richtung Fernwärme.

Analog zur Vorgehensweise hinsichtlich der Substitutionsfaktoren für Zusatzheizungen mit Biomasse erfolgt bei der Ausweisung der Substitutionsfaktoren keine Unterscheidung in Neubau und Bestand.

Tabelle 18: Vorschlag für die Substitutionsfaktoren im Bereich Solarthermie

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Aktuelle Substitutionsfaktoren (Anlagenbezogen)	44,9	50,6	0	0	1,6	2,9
Substitutionsfaktoren gesamt 2016	36,1	55,9	0	0	6,6	1,4
Substitutionsfaktoren gesamt 2010	46,0	51,9	0	0	2,1	0

* Inklusive Flüssiggas

2.2.4.4 Oberflächennahe Geothermie, Umweltwärme

Das Ableiten der Substitutionsfaktoren für die oberflächennahe Geothermie und Umweltwärme erfolgt analog zu jener für Biogene Festbrennstoffe in Zentralfeuerungen (siehe Abschnitt 2.2.4.2.1).

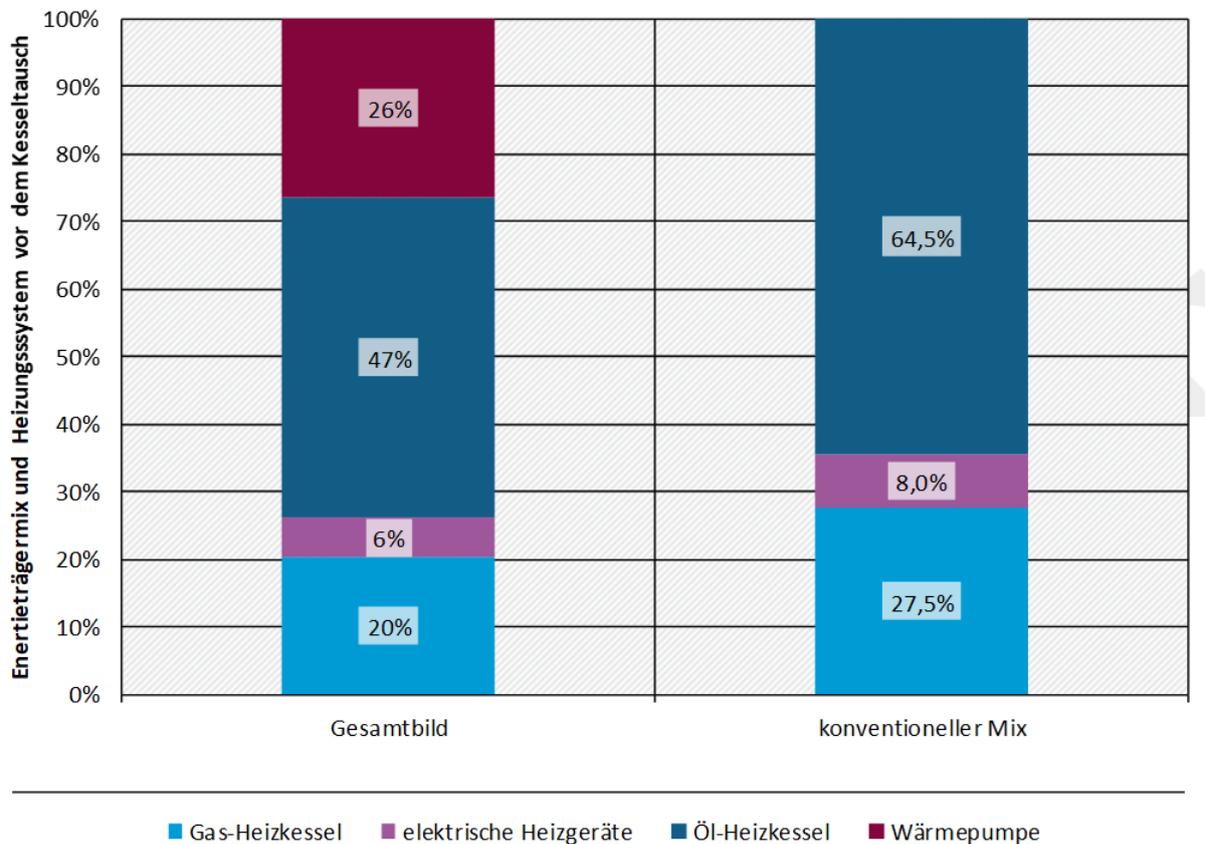
Laut Definition des Umweltbundesamtes umfasst die oberflächennahe Geothermie jene gespeicherte Wärme, die im oberflächennahen Erdreich bis zu einer Tiefe von 400 Meter Tiefe zu erschließen ist. Die Umweltwärme beschreibt bodennahen Luftschichten (aerothermische Umgebungswärme) und Oberflächengewässer (hydrothermische Umgebungswärme) sowie im Grundwasser gespeicherte Wärme. Da die Energie durch Wärmepumpen nutzbar gemacht wird, wird für die Analyse der Substitutionsfaktoren im Bestand analysiert, welcher Energieträger im Einsatz war, vor im Gebäude eine Wärmepumpe installiert wurde.

Die Ergebnisse für die Substitutionsfaktoren des gesamten Wohngebäudebestands, sowie jene für die Substitution von rein konventionellen Energieträgern für das Jahr 2016, sind in Abbildung 12 dargestellt. In 26 % der Fälle war vor der Installation von Wärmepumpen eine Wärmepumpe im Einsatz. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass in 47 % der Fälle (Substitution von EE zugelassen) bzw. rd. 65 % der Fälle Öl-Heizkessel ersetzt werden. In 20 % der Fälle (Substitution von EE zugelassen) bzw. in rd. 28 % der Fälle ersetzt die Wärmepumpe Gas-Heizkessel. In 6 bzw. 8 % der Fälle war im Vorfeld ein elektrisches Heizgerät (außer Wärmepumpen) im Einsatz.

²¹ Dabei handelt es sich um jene Faktoren, die für die Jahre 2006-2008 auf Basis der RWI/Forsa Erhebung abgeleitet wurden.

Durch Wärmepumpen wurden im Gegensatz zur Zentralheizung mit biogenen Festbrennstoffen keine Öfen ersetzt.

Abbildung 12: Überblick über den Energieträgermix der Haupt-Wärmeerzeuger, die vor dem Heizungstausch eingesetzt wurden, wenn nach dem Heizungstausch Wärmepumpen eingesetzt werden.



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018)

Die Analysen für das Jahr 2010 auf Basis der IWU-Erhebung zeigen wiederum Schwächen der Datenbank mit Blick auf das Ableiten von Substitutionsfaktoren auf, da bei der aufgelösten Analyse der einzelnen Energieträger, die vor der Verwendung von Wärmepumpen im Einsatz waren, die Fallzahlen teilweise zu gering waren, um aus Datenschutzgründen dargestellt zu werden. Die Ergebnisse der Sonderauswertung zeigen, dass von den rd. 39.900 Fällen, in denen ursprünglich auch Zentralheizungen für die Beheizung eingesetzt wurden, in rd. 20.700 Fällen (rd. 52 %) keine Aussage über den eingesetzten Energieträger möglich ist. In 48 % der Fälle wurde laut Auswertung vor dem Kesseltausch Öl in der Zentralheizung eingesetzt.

Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, die Substitutionsfaktoren für das Jahr 2010 nicht in der Emissionsbilanzierung zu verwenden.

2.2.4.4.1 Ergebnisse

Auf Basis der Analysen werden die Substitutionsfaktoren für oberflächennahe Geothermie und Umgebungswärme aus Abbildung 12 vorgeschlagen. Im Neubau wird auf den Energieträgermix auf Basis von Statistisches Bundesamt (Destatis), (2019a) für das Jahr 2019 zurückgegriffen, dargestellt in Tabelle 4. Zusätzlich werden in Tabelle 9 jene Substitutionsfaktoren angeführt, die aktuell für die Emissionsbilanzierung herangezogen werden. Alle dargestellten Substitutionsfaktoren berücksichtigen ausschließlich die Substitution des konventionellen Energieträgermix.

Tabelle 19: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Wärmepumpen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren.

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Aktuelle Substitutionsfaktoren (Anlagenbezogen)	42,9	47,7	0,5	1,4	4,4	3,2
Substitutionsfaktoren Bestand 2016	64,5	27,5	0	0	0	8,0
Vorschlag für Neubau	1,7	82,2	0,0	0,0	14,2	1,9

Der hohe Anteil von substituierten Ölheizungen lässt sich vor allem dadurch erklären, dass Wärmepumpen vorwiegend im ländlichen Raum in Ein- und Zweifamilienhäusern eingesetzt werden, in denen Ölheizungen weit verbreitet sind.

Die in Tabelle 19 dargestellten Substitutionsfaktoren wurden auf Basis der Anzahl an Wärmeerzeuger abgeleitet. Eine Verschiebung des Substitutionsmix ist bei Berücksichtigung des Energieeinsatzes bzw. unter Berücksichtigung der Heizkesselgrößen möglich.

Für die Adaption der Substitutionsfaktoren werden die Substitutionsfaktoren im Bestand für das Jahr 2016 aus Tabelle 19 mit den mittleren Energieverbräuchen aus den Jahren 2011 bis 2013 multipliziert (siehe Tabelle 10) und anschließend die Anteile je Energieträgermix wieder ausgewiesen.

Tabelle 20: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Zentralfeuerungen und Vergleich mit den aktuellen Faktoren (Energiegewichtet).

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren Bestand 2016 (Anlagenbezogen)	64,5	27,5	0	0	0	8,0
Substitutionsfaktoren Bestand 2016 (Energiegewichtet)	73,1	24,1	0	0	0	5,2

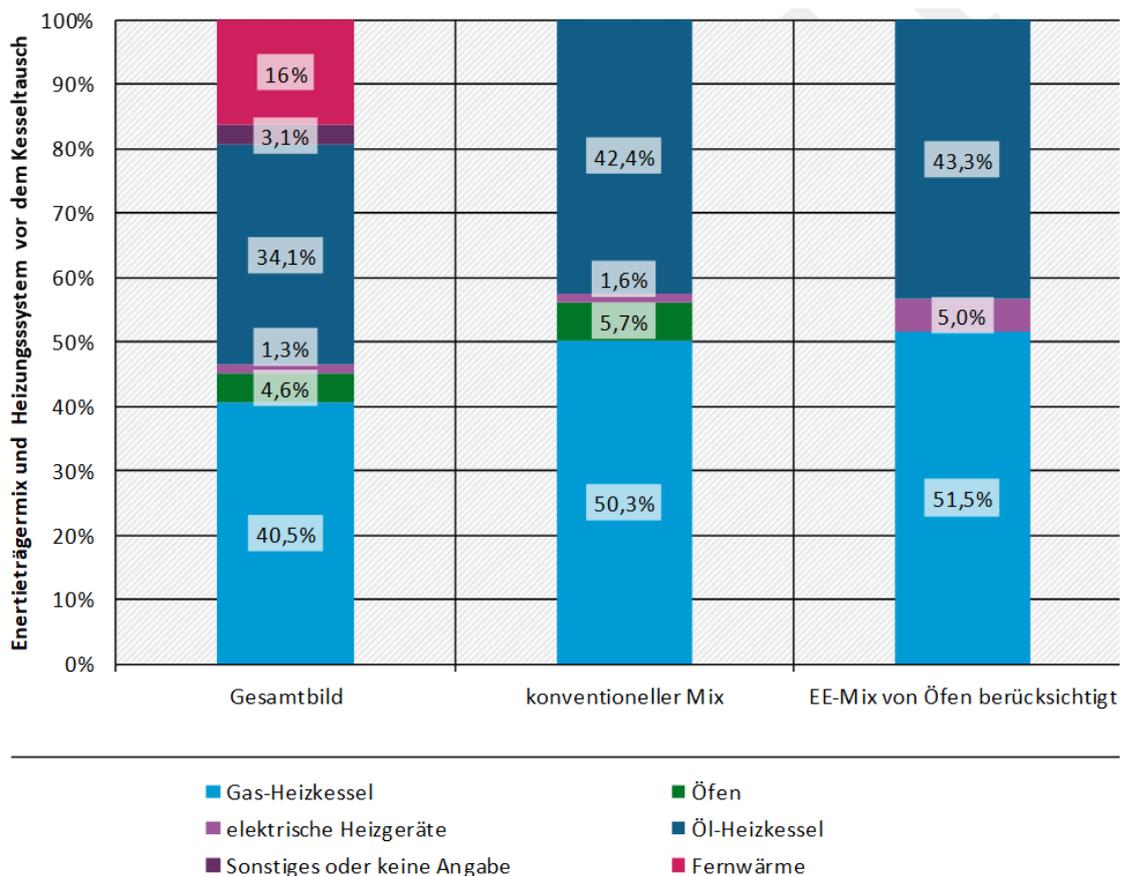
Es ist ersichtlich, dass aufgrund des höheren mittleren Energieverbrauchs für Heizungen mit Heizöl sich der Anteil von Öl am Substitutionsmix erhöht und sich der Anteil von substituierten Gasheizungen und strombasierte Heizungen reduziert.

2.2.4.5 Fernwärme

Das Ableiten der Substitutionsfaktoren für Fernwärme erfolgt analog zu jener für biogene Festbrennstoffe in Zentralfeuerungen und für oberflächennahe Geothermie und Umweltwärme (siehe Abschnitt 2.2.4.2.1 und 2.2.4.4). In der aktuellen Emissionsbilanz für erneuerbare Energieträger im Bereich erneuerbare Wärme erfolgt keine Differenzierung in Fernwärme. Die Analyse wird an dieser Stelle durchgeführt, um in weiterer Folge ggf. ableiten zu können, was durch Fernwärme im Gebäudebestand verdrängt wird. Der Verdrängungsmix der Fernwärmeerzeugung wird in den entsprechenden Abschnitten separat beleuchtet.

Die Ergebnisse für den Bestand sowie jene Teilmenge ohne die Substitution von Erneuerbaren durch Erneuerbare ist in Abbildung 13 dargestellt. Analog zur Ausführung bei den biogenen Feststoffen wird auch der Energieträgermix von Öfen berücksichtigt. In 16 % der Fälle war vor dem Einsatz von Fernwärme bereits Fernwärme im Einsatz²². Darüber hinaus ist ersichtlich, dass in 34,1 % der Fälle (Substitution von EE zugelassen) bzw. 43,3 % (Ohne EE ersetzt EE, Energieträgermix von Öfen berücksichtigt) der Fälle Öl-Heizkessel ersetzt werden. In 40,5 % der Fälle (Substitution von EE zugelassen) bzw. in 50,3/51,5 % der Fälle ersetzt Fernwärme Gas-Heizkessel. In 1,3 % bzw. 5,0 % der Fälle war im Vorfeld ein elektrisches Heizgerät (außer Wärmepumpen) im Einsatz.

Abbildung 13: Überblick über die Substitutionsfaktoren für Fernwärme, die auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018) abgeleitet wurden.



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis von Cischinsky & Diefenbach (2018)

²² Da im Falle von Fernwärme die Heizungsanlage per se nicht ausgetauscht wird, wird davon ausgegangen, dass es sich in diesem Fall um die Erneuerung des Wärmetauschers bzw. der Hausübergabestation handelt.

Tabelle 21: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Fernwärme

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren Bestand 2016	43,3	51,5	0	0	0	5,0
Vorschlag für Neubau	1,7	82,2	0	0	14,2	1,9

2.2.4.6 Biomethan

In Haushalten wird teilweise auch Biomethan eingesetzt. Vor allem in Baden-Württemberg, wo die Einführung des Erneuerbaren-Wärme-Gesetzes (EWärmeG) Gebäudeeigentümer verpflichtet, im Falle des Austausches Ihrer Heizungsanlage erneuerbare Energien einzusetzen, wird Biomethan oft als Beimischung zum Gas eingesetzt, um die Gesetzesanforderungen zu erfüllen. Alle Stadtwerke in Baden-Württemberg bieten ein Produkt mit einer Beimischung von Biomethan in Höhe von 10 % an (Pehnt et al., 2018).

Wird Biomethan in Haushalten eingesetzt, kann durch die Beimischung davon ausgegangen werden, dass zu 100 % Erdgas substituiert wird. Die Substitutionsfaktoren sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren für Biogas

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren		100				

2.2.5 Dynamisierung der Methodik für die Berücksichtigung von Neubau und Bestand und Gewichtung der Substitutionsfaktoren

Die Emissionsbilanzierung erfolgt jährlich auf Basis von aktualisierten Endenergieverbräuchen für die erneuerbaren Energien. Im Vergleich zu den aktuell in der Emissionsbilanzierung eingesetzten Substitutionsfaktoren, die für die Jahre 2009 und 2010 ermittelt wurden (siehe auch Lauf et al. (2019)), zeigen sich teilweise starke Änderungen des Substitutionsmix aufgrund der Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Wärme und der Investitionsentscheidungen der Gebäudeeigentümer. Zusätzlich wird aufgrund der substantiellen Unterschiede im Substitutionsmix von Neubau und Bestand vorgeschlagen, dass sowohl Substitutionsfaktoren für den Neubau und den Bestand ausgewiesen werden und in die Emissionsbilanzierung einfließen.

Um diese dynamischen Entwicklungen berücksichtigen zu können, wird vor diesem Hintergrund die dynamische Quantifizierung der Einsparung über die Jahre hinweg vorgeschlagen, in der auch eine Gewichtung der Substitutionsfaktoren für Neubau und Bestand erfolgt. Die im Rahmen des Projekts entwickelte Methodik ist im Folgenden dargestellt. Zusätzlich werden die dadurch ermittelten Emissionsfaktoren in weiterer Folge für Biomasse, Solarthermie und Umgebungsenergie in diesem Abschnitt und im Anhang A.1.2 hergeleitet und dargestellt.

Grundidee der dynamischen Berechnung ist die Berücksichtigung der vermiedenen Emissionen durch den Einsatz von Erneuerbaren über die Einsatzzeit der jeweiligen Anlagen. Dafür sollen einerseits die Substitutionsfaktoren entsprechend der Anteile der Anlagen, die im Neubau und Bestand installiert werden, gewichtet werden und andererseits die Einsparung entsprechend des Anteils des Endenergieverbrauchs für den jeweiligen erneuerbaren Energieträger im entsprechenden Jahr gewichtet werden.

Für die Berechnung müssen die spezifischen Einsparungen ΔEF für alle erneuerbaren Energieträger EE auf Basis der Emissionen EF für die fossilen Energieträger fos und die erneuerbaren Energieträger EE für jeden Zeitpunkt t innerhalb der Lebensdauer der Technologie T berechnet werden (Formel 2). Dabei umfassen die Emissionsfaktoren die direkten Emissionen und die Emissionen aus den Vorketten zuzüglich der verwendeten Hilfsenergie (für Details hierzu wird auch auf die Ausführungen in Lauf et al. (2019), S. 19f, verwiesen). Der Vergleich erfolgt auf Ebene der eingesetzten Nutzwärme, weswegen die entsprechenden Nutzungsgrade (η_{fos} , η_{EE}) zu berücksichtigen sind.

Formel 2: Dynamische, spezifische Einsparung

$$\Delta EF_{EE, fos, t} = \frac{EF_{fos, t}}{\eta_{fos}} - \frac{EF_{EE, t}}{\eta_{EE}}$$

$\forall fos \in \{\text{Heizöl, Erdgas, Stein – und Braunkohle, Strom, Fernwärme}\};$
 $\forall EE \in \{\text{Biomasse, Solarthermie, Oberflächennahe Geothermie bzw. Umgebungsenergie}\}$
 $\forall t \text{ in } T$

Die Gewichtungsfaktoren für die erneuerbaren Energieträger im Zeitverlauf ergeben sich durch das Verhältnis des Endenergieverbrauchs EEV je erneuerbarem Energieträger EE im entsprechenden Jahr t und der Summe des Endenergieverbrauchs des erneuerbaren Energieträgers über den Betrachtungszeitraum T (Formel 3).

Formel 3: Gewichtungsfaktoren für die erneuerbaren Energieträger im Zeitverlauf

$$g_{EE, t} = \frac{EEV_{EE, t}}{\sum_{t \in T} EEV_{EE, t}}$$

$\forall EE \text{ in } \{\text{Biomasse, Solarthermie, Oberflächennahe Geothermie bzw. Umgebungsenergie}\}$

Die brutto vermiedenen Emissionen je Energieträger ergeben sich abschließend, indem die spezifischen Einsparungen je erneuerbaren Energieträger bezogen auf die fossilen Energieträger $\Delta EF_{EE, fos, t}$ mit den nach Neubau und Bestand gewichteten Substitutionsfaktoren $gSF_{fos, EE, t}$ für die konventionellen Technologien fos und dem Gewichtungsfaktor $g_{EE, t}$ für den entsprechenden erneuerbaren Energieträger im Zeitverlauf multipliziert werden (Formel 4). Ebenso muss die eingesetzte Nutzenergie des entsprechenden erneuerbaren Energieträgers ($EEV_{EE} * \eta_{ern}$) berücksichtigt werden.

Formel 4: Dynamische Berechnung der brutto vermiedenen Emissionen für die einzelnen erneuerbaren Energieträger

$$E_{v, brutto, EE} = EEV_{EE} * \eta_{ern} * \sum_{t \in T} \sum_{fos} \Delta EF_{EE, fos, t} * gSF_{fos, t, EE} * g_{EE, t}$$

2.2.5.1 Ermittlung der gewichteten Substitutionsfaktoren

Für den Endenergieverbrauch kann weiterhin auf die Daten der AGEE Stat zurückgegriffen werden, da die jährliche Zeitreihe seit 1990 vorliegt. Ebenso können die Emissionsfaktoren, die in der Emissionsbilanzierung angeführt sind, angewandt werden. Vorschläge zur Adaption der Nutzungsgrade werden in Kapitel 3 abgeleitet.

Die Herleitung der Substitutionsfaktoren gewichtet nach Neubau und Bestand ist im Folgenden dargestellt.

Da aufgrund der beschränkten Datenbasis nicht für alle zu berücksichtigten Jahre Substitutionsfaktoren im Bestand abgeleitet werden können, wird hier eine Inter- bzw. Extrapolation dieser für den Betrachtungshorizont bzw. die Lebensdauer T vorgeschlagen. Dieses Vorgehen geht auch mit dem Vorteil einher, dass Substitutionsfaktoren, die für verschiedene Jahre ermittelt wurden, in der Emissionsbilanzierung zusammengeführt werden können.

Als Betrachtungshorizont werden 15 Jahre vorgeschlagen. In Tabelle 23 sind die dynamischen Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Feste Biomasse in der Zentralfeuerung bezogen auf die Anlagenzahl dargestellt. Dabei sind die vorhandenen Datenpunkte (2010 und 2016) hervorgehoben. Die Werte zwischen den Stützjahren bzw. nach den Stützjahren werden entsprechend inter- bzw. extrapoliert. Die tabellarische Darstellungen für die dynamisierten Substitutionsfaktoren des Bestands im Zeitverlauf für die restlichen erneuerbaren Energieträger finden sich im Anhang A.1.2.

Tabelle 23: Substitutionsfaktoren im Bestand im Zeitverlauf für Feste Biomasse (Anlagenbezogen)

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	62,6	26,4	2,8	5,5	0	2,8
2006	63,1	25,1	2,7	5,0	0	4,2
2007	63,6	23,9	2,5	4,5	0	5,7
2008	64,0	22,6	2,3	4,0	0	7,1
2009	64,5	21,3	2,2	3,5	0	8,6
2010	65	20	2	3	0	10

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2011	65,5	18,7	1,8	2,5	0	11,5
2012	66,0	17,4	1,7	2,0	0	12,9
2013	66,5	16,2	1,5	1,5	0	14,4
2014	66,9	14,9	1,3	1,0	0	15,8
2015	67,4	13,6	1,2	0,5	0	17,3
2016	67,9	12,3	1	0	0	18,7
2017	68,1	11,0	0,8	0	0	20,1
2018	68,3	9,6	0,7	0	0	21,4
2019	68,4	8,3	0,5	0	0	22,7

Im Neubau können die Substitutionsfaktoren auf Basis der Informationen des statistischen Bundesamtes zum eingesetzten Energieträger bei fertiggestellten Wohngebäuden für alle Stützjahre abgeleitet werden (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2020a). Der entsprechende Energieträgermix ist in Tabelle 77 dargestellt. In Tabelle 24 sind die Ergebnisse dargestellt, wenn die erneuerbaren Energieträger vernachlässigt werden um die Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für den konventionellen Mix darzustellen.

Tabelle 24: Substitutionsfaktoren im Neubau im Zeitverlauf (Anlagenbezogen)

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	12,7	80,7	0,1	0,1	4,7	1,6
2006	9,5	83,4	0,1	0,1	5,3	1,5
2007	8,9	83,8	0,1	0,1	5,4	1,6
2008	7,7	84,2	0,1	0,1	6,0	1,9
2009	6,2	83,6	0,1	0,1	8,0	1,9
2010	5,1	84,6	0	0	8,3	1,9
2011	3,8	84,3	0	0	9,6	2,2
2012	3,1	84,2	0	0	10,8	1,9
2013	2,6	83,8	0	0	11,8	1,8
2014	2,0	83,5	0	0	13,0	1,5
2015	1,8	84,0	0	0	12,7	1,5
2016	1,6	85,5	0	0	11,5	1,5

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2017	1,8	84,0	0	0	12,6	1,6
2018	1,7	82,3	0	0	14,1	1,9
2019	1,7	80,7	0	0	15,2	2,3

Um die Gewichtung der Substitutionsfaktoren in Neubau und Bestand vornehmen zu können, müssen einerseits die Anzahl der Anlagen, die jeweils im Neubau und Bestand installiert werden, einfließen und andererseits die geringeren Endenergieverbräuche im Neubau aufgrund effizienterer Gebäude im Vergleich zum Bestand berücksichtigt werden. Da auch strukturelle Unterschiede bezüglich der Endenergieverbräuche über die (erneuerbaren) Energieträger existieren, sind diese ebenso zu berücksichtigen.

Da keine statistischen Informationen zu den durchschnittlichen Endenergieverbräuchen im Bestand und im Neubau, differenziert nach Energieträger vorliegen, wird hier auf die Ergebnisse eines Szenarios für die langfristige Entwicklung des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden zurückgegriffen (ifeu et al., 2018). Differenziert nach Baualtersklassen, Gebäudetypen (Einfamilien- und Mehrfamilienwohngebäude) und Effizianzorderungen an die eingesetzten Komponenten wird bauteilbezogen der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser für die verschiedenen Energieträger im Zeitverlauf simuliert und auf die Energiebilanz kalibriert. Dabei werden auch Restriktionen hinsichtlich des Einsatzes von Technologien explizit berücksichtigt (z. B. Mindesteffizianzorderungen für den Einsatz von Wärmepumpen). Auf Basis der Auswertung zeigen sich folgende durchschnittlichen Endenergieverbräuche für Wohngebäude, wobei unter Neubau jene Gebäude zusammengefasst werden, die seit 2002 errichtet wurden:

- ▶ Wärmepumpen im Neubau, die oberflächennahe Geothermie bzw. Umgebungswärme nutzbar machen: rd. 12.700 kWh
- ▶ Wärmepumpen im Bestand, die oberflächennahe Geothermie bzw. Umgebungswärme nutzbar machen: rd. 22.700 kWh
- ▶ Biomasse im Neubau: rd. 22.500 kWh
- ▶ Biomasse im Bestand: rd. 34.400 kWh

Um die Anteile der Anlagen abschätzen zu können, die jeweils im Neubau und Bestand installiert werden, werden verschiedene Quellen zusammengeführt und die jährlich fertiggestellten Gebäude jenen Gebäuden gegenübergestellt, bei denen eine Modernisierung der Heizungsanlage erfolgt. Auf Basis der fertiggestellten Wohngebäude können die neu errichteten Gebäude berücksichtigt werden (siehe auch Tabelle 4, dargestellt auf Basis von Statistisches Bundesamt (Destatis), 2020). In der jährlichen Publikation des statistischen Bundesamtes wird der Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden auf Basis der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 und unter Berücksichtigung von Zugängen (Fertigstellung neuer Gebäude, Fertigstellung durch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden, sonstige Zugänge) und Abgängen (Abgänge durch Abbruch, Abgänge durch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden, sonstige Abgänge) fortgeschrieben (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2020b). Unter Berücksichtigung einer mittleren jährlichen Modernisierungsrate können die Fallzahlen für den Bestand abgeleitet werden. Die jährlichen Modernisierungsraten für den Zeitraum 2005-2009 sowie 2010-2015

können den IWU-Erhebungen zum Wohngebäudebestand entnommen werden (Cischinsky & Diefenbach, 2018; Diefenbach et al., 2010). Die Modernisierungsraten für den Zeitraum nach 2015 werden linear extrapoliert. Die Modernisierungsraten für den Zeitraum 2005 bis 2009 beziehen sich auf jene Gebäude, die bis 2004 errichtet wurden, jene für den Zeitraum zwischen 2010 und 2015 auf Gebäude, die bis 2009 errichtet wurden. Bei den nachfolgenden Jahren wird immer der Gebäudebestand des vorherigen Jahres zugrunde gelegt. Die für die Analyse verwendeten Werte sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Datengrundlage und Berechnung der Anteile der Anlagen, die in bereits errichteten nach der Modernisierung der Heizungsanlage eingesetzt werden (Anteil Bestand) und jene die im Neubau eingesetzt werden.

Jahr	Anzahl Gebäude ¹	Mittlere Modernisierungs-rate ²	Daraus abgeleitet jährliche Anlagen im Bestand	Neu errichtete Gebäude ³	Anteil Bestand	Anteil Neubau
2005	17.599.942	2,8 %	488.843	145.604	77 %	23 %
2006	17.742.413	2,8 %	488.843	146.303	77 %	23 %
2007	17.859.112	2,8 %	488.843	120.239	80 %	20 %
2008	17.949.803	2,8 %	488.843	94.415	84 %	16 %
2009	18.029.257	2,8 %	488.843	82.595	86 %	14 %
2010	18.234.580	2,9 %	513.834	84.340	86 %	14 %
2011	18.323.246	2,9 %	513.834	96.549	84 %	16 %
2012	18.420.645	2,9 %	513.834	100.816	84 %	16 %
2013	18.521.263	3,5 %	623.812	103.331	86 %	14 %
2014	18.628.038	3,5 %	623.812	108.908	85 %	15 %
2015	18.731.913	3,5 %	623.812	105.568	86 %	14 %
2016	18.839.837	3,3 %	625.646	109.990	85 %	15 %
2017	18.947.981	3,4 %	642.438	110.051	85 %	15 %
2018	19.053.216	3,5 %	659.390	107.581	86 %	14 %
2019	19.160.977	3,6 %	676.389	108.071	86 %	14 %

Quellen: 1) Statistisches Bundesamt (Destatis), 2020b; 2) Cischinsky & Diefenbach, 2018; Diefenbach et al., 2010.; 3) Statistisches Bundesamt (Destatis), 2020

Auf Basis dieser Daten können in weiterer Folge die gewichteten Substitutionsfaktoren $gSF_{fos,t,EE}$ abgeleitet werden. Diese ergeben sich aus der Summe der energiegewichteten Anteile der erneuerbaren Technologie für Bestand und Neubau im jeweiligen Zeitpunkt multipliziert mit dem entsprechenden Substitutionsfaktor der konventionellen Technologien (**Formel 5**).

Formel 5: Berechnung der gewichteten Substitutionsfaktoren

$$gSF_{fos,t,EE} = \sum_{a \in \{Neubau, Bestand\}} \text{Energiegewichteter Anteil}_{a,t,EE} * SF_{fos,t,a,EE}$$

$\forall fos \in \{\text{Heizöl, Erdgas, Stein – und Braunkohle, Strom, Fernwärme}\};$
 $\forall EE \in \{\text{Biomasse, Solarthermie, Oberflächennahe Geothermie bzw. Umgebungsenergie}\}$
 $\forall t \text{ in } T$

Um den energiegewichteten Anteil von Neubau und Bestand je erneuerbarer Technologie zu ermitteln (Formel 6), wird auf den durchschnittlichen Energieverbrauch der verschiedenen erneuerbaren Technologien im Neubau und Bestand zurückgegriffen und mit den entsprechenden Anteilen der Anlagen (Tabelle 25), die in Neubau und Bestand installiert werden, multipliziert und gewichtet.

Formel 6: Energiegewichteter Anteil von Neubau und Bestand je erneuerbarer Technologie

$$\text{Energiegewichteter Anteil}_{a,t,EE} = \frac{\emptyset EEV_{a,EE} * \frac{\text{Anz. Geb.}_a}{\sum_{a \in \{Neub., Best.\}} \text{Anz. Geb.}_a}}{\sum_{a \in \{Neub., Best.\}} \emptyset EEV_{a,EE} * \frac{\text{Anz. Geb.}_a}{\sum_{a \in \{Neub., Best.\}} \text{Anz. Geb.}_a}}$$

$\forall EE \in \{\text{Biomasse, Solarthermie, Oberflächennahe Geothermie bzw. Umgebungsenergie}\}$
 $\forall t \text{ in } T$

Das Ergebnis für die gewichteten Substitutionsfaktoren für Biomasse und Wärmepumpen sind in Tabelle 26 und Tabelle 27 dargestellt. Für Zusatzheizungen erfolgt aufgrund der beschränkten Datenbasis keine Differenzierung.

Tabelle 26: Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Wärmepumpen unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand zur Modernisierung der Heizungsanlagen eingesetzt werden sowie im Neubau.

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	23 %	66 %	1 %	2 %	8 %	0 %
2006	26 %	64 %	1 %	2 %	7 %	0 %
2007	29 %	61 %	1 %	2 %	6 %	1 %
2008	33 %	57 %	1 %	2 %	6 %	2 %
2009	36 %	54 %	1 %	2 %	5 %	2 %
2010	40 %	51 %	0 %	1 %	5 %	3 %
2011	42 %	48 %	0 %	1 %	4 %	4 %
2012	45 %	45 %	0 %	1 %	4 %	4 %
2013	49 %	42 %	0 %	1 %	3 %	5 %
2014	52 %	39 %	0 %	0 %	3 %	6 %

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2015	55 %	36 %	0 %	0 %	2 %	7 %
2016	58 %	34 %	0 %	0 %	1 %	7 %
2017	60 %	30 %	0 %	0 %	1 %	8 %
2018	63 %	27 %	0 %	0 %	1 %	9 %
2019	66 %	23 %	0 %	0 %	2 %	9 %

Tabelle 27: Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Biomasse in der Zentralheizung unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand zur Modernisierung der Heizungsanlagen eingesetzt werden sowie im Neubau.

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	54,3%	35,5%	2,4%	4,6%	0,8%	2,6%
2006	54,2%	34,8%	2,2%	4,2%	0,9%	3,7%
2007	56,0%	32,1%	2,2%	3,9%	0,7%	5,1%
2008	57,8%	29,4%	2,1%	3,6%	0,7%	6,5%
2009	58,9%	27,3%	2,0%	3,2%	0,8%	7,9%
2010	59,4%	26,0%	1,8%	2,7%	0,8%	9,2%
2011	59,1%	25,5%	1,6%	2,2%	1,0%	10,5%
2012	59,3%	24,5%	1,5%	1,8%	1,1%	11,7%
2013	60,4%	22,5%	1,4%	1,4%	1,1%	13,2%
2014	60,5%	21,7%	1,2%	0,9%	1,3%	14,4%
2015	61,0%	20,4%	1,1%	0,5%	1,2%	15,7%
2016	61,2%	19,7%	0,9%	0,0%	1,2%	16,9%
2017	61,5%	18,3%	0,7%	0,0%	1,3%	18,2%
2018	61,9%	16,6%	0,6%	0,0%	1,4%	19,5%
2019	62,1%	15,2%	0,4%	0,0%	1,4%	20,8%

2.2.6 Ergebnisse und Fazit

Zusammenfassend ist der Vorschlag für die der zukünftigen Emissionsbilanzierung zugrundeliegenden Substitutionsfaktoren folgender:

Wird eine Anpassung der Methodik zur Emissionsbilanzierung angestrebt, können die Substitutionsfaktoren aus den Tabellen in Abschnitt A.1.2 herangezogen werden (Tabelle 26, Tabelle 27, Tabelle 81 und Tabelle 82). Wird an der aktuell verwendeten Methodik festgehalten, sind die Ergebnisse für die einzelnen Energieträger aus Abschnitt 2.2.4 zu verwenden (Tabelle 9, Tabelle 16, Tabelle 18 und Tabelle 19).

Die erarbeiteten Vorschläge für Substitutionsfaktoren zeigen im Falle der reinen Analyse der Substitution von konventionellen Energieträger eine Verschiebung von ölbasierten Technologien hin zu erdgasbasierten Technologien auf. Einzige Ausnahme ist hier der Einsatz von Wärmepumpen, in dem der Substitutionsfaktor für Öl jenen, der auf Basis von Daten aus den Jahr 2010 festgelegt wurde, übersteigt.

Eine separate Betrachtung von Substitutionsfaktoren für Pellets und Scheitholz ist aufgrund der beschränkten Datenverfügbarkeit nicht möglich. Bei Solarthermieanlagen, die als Zusatzheizungen eingesetzt werden, wurde geprüft, ob eine Differenzierung in Anlagen zur Warmwasserbereitung und Kombianlagen (Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung) sinnvoll erscheint. Aufgrund der geringen Unterschiede im Jahr 2016 wird vorgeschlagen, keine differenzierte Betrachtung vorzunehmen. Es zeigt sich jedoch, dass eine Differenzierung der Substitutionsfaktoren in Bestand und Neubau sinnvoll erscheint, da es hier strukturelle Unterschiede gibt.

Es ist zu erwarten, dass durch die neu ermittelten Substitutionsfaktoren und die Vorschläge zur Dynamisierung dieser die Entwicklungen in der Wärmeversorgung von privaten Haushalten der letzten Jahre abgebildet werden können.

Das ausgewählte Verfahren zur Bestimmung von Substitutionsfaktoren auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten stößt jedoch bei höheren Anteilen von erneuerbaren Energien in der Wärmeversorgung an Grenzen, da es dann durch die Nicht-Berücksichtigung der Substitution von erneuerbaren Energieträgern zu Verzerrungen bei der Berechnung der vermiedenen Emissionen kommen kann.

Ebenso ist die Fortschreibbarkeit nur eingeschränkt möglich. Es zeigt sich am Beispiel der Substitutionsfaktoren für Biomasse in der Zentralheizung, dass der Anteil der substituierten Ölheizungen von rd. 65 % im Jahr 2010 auf rd. 68 % im Jahr 2016 ansteigt. Dieser Trend wird vermutlich auch die nächsten Jahre ersichtlich sein, da aufgrund der aktuellen politischen Rahmenbedingungen (Verbot des Einbaus von Ölkesseln ab 2026, CO₂-Bepreisung fossiler Energieträger sowie hohe Fördersätze für die Substitution konventioneller Energieträger) davon auszugehen ist, dass vermehrt Ölkessel substituiert werden. Anschließend ist jedoch aufgrund geringerer Ölkessel im Bestand zu erwarten, dass die Anteile von substituierten Gasheizungen steigen wird. Diese Trendumkehr kann nur unter Einbeziehung aktualisierter Substitutionsfaktoren erfolgen. Wenn an der Methodik festgehalten werden soll, wäre es hierfür notwendig, dass eine ähnliche Erhebung wie die Erhebung von RWI/Forsa (Frondel et al., 2011) bzw. die IWU-Erhebung zum Wohngebäudebestand (Cischinsky & Diefenbach, 2018) zukünftig erneut durchgeführt wird, um aktualisierte Substitutionsfaktoren auf Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten ableiten zu können.

Vor diesem Hintergrund empfehlen die Forschungsnehmer zukünftig eine Umstellung der Methodik. Mittelfristig wäre die Modellierung eines kontrafaktischen Szenarios mit Hilfe eines Gebäudemodells möglich. Dabei kann der deutsche (Wohn-)Gebäudebestand differenziert

abgebildet und die Entwicklungen im Zeitverlauf simuliert werden unter der Restriktion, dass der Einsatz von erneuerbaren Energien nicht zulässig ist. Dieses Vorgehen würde große Parallelen zur Vorgehensweise bei der Ermittlung der Substitutionsfaktoren im Stromsektor aufweisen.

Langfristig wird jedoch die Verwendung von Pauschalfaktoren empfohlen, die sich beispielsweise auf Basis der Energiebilanz abbilden lassen, die Entwicklungen im Bereich der Wärmeversorgung gut abbilden und jährlich fortgeschrieben werden können.

2.3 Substitutionsfaktoren in GHD und Industrie

2.3.1 Sektorspezifische Fragestellungen und Herausforderungen

Im Vergleich zu den Privaten Haushalten zeichnen sich die Sektoren Industrie und GHD durch ihre ausgeprägte Heterogenität aus. In der Industrie wird der Energieverbrauch durch die Anwendungen Prozesswärme und -kälte dominiert – die Raumwärme spielt eine untergeordnete Rolle. Darüber hinaus gibt es bei der Prozesswärme teilweise unterschiedliche Anforderungen in den verschiedenen Branchen hinsichtlich des Temperaturniveaus und anderen Einflussgrößen.

Angesichts dieser Heterogenität sind folgende Leitfragen für dieses Forschungsvorhaben identifiziert worden:

- ▶ Welche Differenzierung nach Branchen, Anwendungen und Technologien ist sinnvoll, so dass das resultierende Datengerüst einerseits empirisch belastbar unterfüttert werden kann und andererseits die wesentlichen Besonderheiten der Substitution durch erneuerbare Wärme dargestellt werden können?
- ▶ Was sind sinnvolle Annahmen bzgl. des Mix der verdrängten fossilen Energieträger?

Die Fragestellungen werden beantwortet, indem einschlägige Datenquellen gesichtet und Branchenvertreter ausgewählter Branchen interviewt werden. Basierend auf diesen Informationen wird eine Berechnungsmethode entwickelt, die anschlussfähig an die aktuelle Methode ist und die diese neue Erkenntnislage berücksichtigt. Die durch Anwendung dieser Methode resultierenden Substitutionsfaktoren werden dargestellt und plausibilisiert.

2.3.2 Diskussion und Festlegung der Methodik

Im Folgenden werden die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten Möglichkeiten zur Quantifizierung von Substitutionsfaktoren mit Blick auf die sektorspezifischen Herausforderungen und Datenquellen im Bereich GHD und Industrie bewertet. Dabei werden die bereits eingeführten Kriterien Fortschreibbarkeit, Differenzierbarkeit (nach Energieträger) und Datenbelastbarkeit herangezogen.

Der Einsatz von **Übergangswahrscheinlichkeiten** setzt empirische Grundlagen zum Energieträgereinsatz vor und nach der Umsetzung von technischen Maßnahmen voraus. Ähnliches – mit etwas geringeren Anforderungen an die Datengrundlagen – gilt für die Ermittlung der Substitutionsfaktoren auf Basis eines **kontrafaktischen Szenarios**. Die derzeitige Datenlage, wie sie sich nach den Branchenfachgesprächen (s. Abschnitt 2.3.2.1) und der Literaturrecherche darstellt, erlaubt ein solches Vorgehen nicht. Die in GHD und Industrie eingesetzten Technologien, insbesondere im Bereich der Prozesswärme, sind heterogen und können nicht ohne weiteres anhand von Markt- oder amtlichen Statistiken nachvollzogen werden.

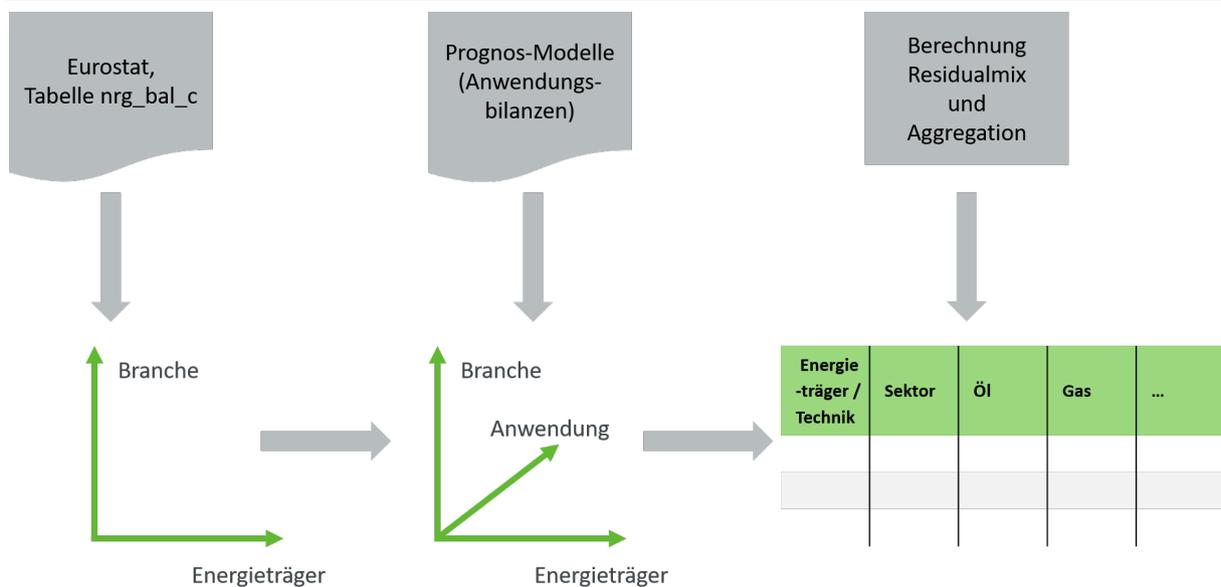
Mithin ist die Variante der **Pauschalfaktoren** nach Sicht der Autoren die derzeit einzig gangbare. Bei diesem Ansatz werden die Substitutionsfaktoren als Residualmix der nicht-erneuerbaren Energieträger hergeleitet. Dabei wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass die fossilen Energieträger gleichmäßig, d. h. in proportionalen Anteilen, durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger verdrängt werden.

Die Qualität der Substitutionsfaktoren kann dadurch erhöht werden, indem der Residualmix für diejenigen Branchen und Anwendungen differenziert betrachtet wird, in denen ein vermehrter Einsatz von erneuerbaren Energien zu beobachten ist. Aus diesem Grund werden im Folgenden

Kernbranchen und Anwendungen untersucht, für die aus Sicht der Autoren gesonderte Pauschalfaktoren bestimmt werden sollten. Außerdem erfolgt eine Diskussion der heranzuziehenden Datenquellen.

Einen Überblick über die Methodik ist in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 14: Methodenüberblick zur Identifikation von Substitutionsfaktoren im Bereich Industrie und GHD



Quelle: Eigene Darstellung Prognos

2.3.2.1 Branchenfachgespräche

Gemeinsam mit dem Auftraggeber wurden Kernbranchen identifiziert, in denen erneuerbaren Energieträgern eine hohe Relevanz haben. Diese Kernbranchen umfassen fünf Industrie- und fünf GHD-Branchen.

Zu diesen Branchen fand eine gezielte Detailrecherche mit sekundären Literaturquellen sowie Fachgespräche mit Verbänden statt. Als sekundäre Literaturquellen wurden Berichte der jeweiligen Verbände (z. B. „Umweltdaten der Zementindustrie“ des Verbands Deutscher Zementwerke (VDZ)) als Basis zur Durchführung der Branchenfachgespräche verwendet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Kernbranchen und die geführten Interviews.

Tabelle 28: Übersicht der durchgeführten Fachgespräche mit Vertreter:innen der jeweiligen Branchen

	Kernbranche	Fachgespräch durchgeführt mit	Datum
Industrie	Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korbwaren (ohne Möbel)	Hauptverband der deutschen Holzindustrie (HDH)	15.10.2020
	Herstellung von Papier, Pappe und Waren	Verband Deutscher Papierfabriken (VDP)	29.06.2020

	Kernbranche	Fachgespräch durchgeführt mit	Datum
	Herstellung von Zement, Kalk und gebranntem Gips	Verband Deutscher Zementwerke (VDZ)	29.06.2020
	Herstellung von Möbeln	Hauptverband der deutschen Holzindustrie (HDH)	15.10.2020
	Ernährungsindustrie	Verband der Deutschen Ernährungsindustrie (BVE)	22.07.2020
GHD	Land- und Forstwirtschaft	Landwirtschaftskammer Niedersachsen	19.08.2020
	Krankenhäuser	Fraunhofer Umsicht/Prognos ²³	26.08.2020
	Handel (food/non-food)	Handelsverband Deutschland (HDE)	11.08.2020
	Baugewerbe	Zentralverband der Baugewerbe (ZDB)	10.08.2020
	Bekleidungsindustrie ²⁴	Gesamtverband Textil + Mode	06.08.2020

Aus den Fachgesprächen geht hervor, dass folgende erneuerbare Energieträger einen bedeutenden Beitrag in der Wärmebereitstellung dieser Branchen leisten:

- ▶ Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel) unter Einsatz von Industrierest-, Alt- und Waldrestholz und Strom aus EE-Quellen
- ▶ Herstellung von Möbeln unter Einsatz von Industrierestholz
- ▶ Herstellung von Papier, Pappe und Waren unter Einsatz von biogenen Ersatz- und Reststoffen
- ▶ Herstellung von Zement, Kalk und gebranntem Gips unter Einsatz von alternativen Brennstoffen
- ▶ Land- und Forstwirtschaft unter Einsatz von gasförmiger Biomasse

Nicht nur feste Biomasse wird eingesetzt oder als Substitutionsmöglichkeit identifiziert, sondern auch weitere erneuerbare Energieträger, die der Tabelle 29 entnommen werden können. Beispielsweise werden bereits heute biogene Abfälle und gasförmige Biomasse jeweils in der Zementindustrie und in der Landwirtschaft in einem bedeutenden Umfang eingesetzt. Im Food-Bereich des Einzelhandels spielt die Wärmerückgewinnung eine wichtige Rolle. Im Rahmen dieser Studie wird jedoch auf die Abwärme als Energieträger nicht tiefer eingegangen. Im gebäudenahen Bereich wird erneuerbarer Strom, Solarthermie und gasförmige Biomasse als Potenzial identifiziert. In manchen Fällen ist die Biomasse aus verschiedenen Gründen nicht

²³ Mangels Fachpersonen in den vertretenden Gesellschaften wurde ein Papier aus gemeinsamer Expertise der Fraunhofer Umsicht und der Prognos erarbeitet

²⁴ Mangels Überorganisation der Bekleidungsindustrie wurde ein Gespräch mit der Vertretung der Textilindustrie durchgeführt

einsetzbar, beispielsweise in der Ernährungsindustrie aus hygienischen Gründen. Anstelle dessen wird oftmals der Einsatz von dezentralen solarthermischen Anlagen oder eine zentrale Biogasbereitstellung bei gegebener Wirtschaftlichkeit bevorzugt. Auch in Krankenhäusern wird die Solarthermie aus den gleichen Gründen bevorzugt und findet bereits in einem geringen Anteil Einsatz (Blum, Löffert, Offermanns, & Steffen, 2014). Bezüglich der Frage, ob durch neue erneuerbare Wärmeerzeuger bestehende erneuerbare Energieträger verdrängt oder ersetzt werden, hat nur die Holzindustrie von solchen Fällen berichtet. Nach einer verbandsinternen Umfrage vom Hauptverband der Deutschen Holzindustrie (HDH) sind einem Viertel der 90 befragten Unternehmen solche Fälle bekannt.

Tabelle 29: Qualitative, zusammengefasste Übersicht der Energiestruktur ausgewählter Branchen basierend auf die Brancheninterviews

Branche ²⁵	Erneuerbare Energieträger		Fossiler Residualmix ²⁶	Hauptanwendung
	bereits verwendet	zukünftiges Potenzial		
Holzindustrie	Industrie-, Alt- und Waldrestholz	Speicher	Erdgas Heizöl	Trocknung
Papierindustrie	biogene Ersatz- und Reststoffe		Erdgas Kohle	Trocknung
Zementindustrie	biogene Abfälle (Siedlung, Industrie und Gewerbe)		Kohle nicht-biogene Abfälle	Drehofen
Möbelindustrie	Industrieholz		Erdgas	Trocknung
Ernährungsindustrie		Solarthermie Biogas	Erdgas	Trennen, Erhitzen, Trocknen
Landwirtschaft	Biogas Holz	Waldholz	Erdgas	
Krankenhäuser	Solarthermie	Solarthermie Biogas	Erdgas Öl Fernwärme	Klimatisierung Zentral-Sterilisation
Handel	Abwärme	EE-Strom Abwärme + Speicher	Strom Erdgas	Raumheizung Prozesskälte
Textilindustrie		Grüne Gase	Erdgas Fernwärme	Veredlung und Trocknung

²⁵ Die Bezeichnung der Branchen wurde aus den Gesprächen abgeleitet. Diese werden im Weiteren den entsprechenden offiziellen Wirtschaftszweigen nach WZ 2008 zugeordnet. Auf die Aufführung der Branche Baugewerbe wurde mangels ausreichend guter Datenqualität verzichtet.

²⁶ Hauptenergieträger. Eine detaillierte Bilanz nach amtlicher Statistik erfolgt unter Abschnitt 2.3.4

2.3.2.2 Zwischenfazit Methode

Die Substitutionsfaktoren werden als Pauschalfaktoren dargestellt, die für ausgewählte Kernbranchen und Anwendungen einzeln bestimmt werden. Die Substitutionsfaktoren ergeben sich als Residualmix.

Die folgende Tabelle 30 stellt die Segmente dar, für die einzeln Substitutionsfaktoren bestimmt werden. Hinsichtlich der Anwendung Raumwärme/Warmwasser erfolgt keine Branchendifferenzierung. Hinsichtlich der Prozesswärme werden in der Industrie ausgewählte Branchen betrachtet (Holzverarbeitende Industrie, Chemie, Papier, Zement/Glas/Keramik). Die Entscheidung hier separate Pauschalfaktoren zu bestimmen, ist ein Ergebnis der Branchenfachgespräche. Im GHD-Sektor wird die Branche Landwirtschaft & Gartenbau gesondert betrachtet, da hier ein intensiver Einsatz von erneuerbaren Energien zu beobachten ist.

Tabelle 30: Segmentierung von Sektoren, Branchen und Anwendungen, für die einzeln Substitutionsfaktoren abgeleitet werden

Anwendung	Sektor	Branche
Raumwärme/ Warmwasser	Industrie	(keine Differenzierung in Branchen)
	GHD	(keine Differenzierung in Branchen)
Prozesswärme /- kälte	Industrie	Holzverarbeitende Industrie
		Chemie
		Papier
		Zement, Glas und Keramik
		Sonstige Industrie
	GHD	Landwirtschaft & Gartenbau
	Sonstiger GHD	

2.3.3 Datenquellen

Zur Bestimmung der Substitutionsfaktoren sind Informationen über die Struktur des Endenergieverbrauchs in Industrie und GHD erforderlich. Hierzu wurden amtliche Datenquellen, Sekundärstatistiken und Modelldaten der Prognos AG gesichtet sowie Branchenfachgespräche geführt.

2.3.3.1 Amtliche Datenquellen

Zentrale Datenquelle für die Emissionsbilanz sind die Arbeiten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Die Ergebnisse der AGEE Stat sind unter anderem in der Satellitenbilanz Erneuerbare Energien veröffentlicht. Des Weiteren sind die Daten in den Energiebilanzen der Eurostat sowie der AGEB verfügbar.

Die Eurostat-Energiebilanzen (nrg_bal_c) sind eine internationale bzw. europäische Energiestatistik, die auf Datenmeldungen der europäischen Mitgliedstaaten in Form von „Joint Annual Questionnaires“ basiert. Hinsichtlich der Energieträger wird dabei die Standard international energy product classification (SIEC) verwendet. Die folgende Tabelle stellt die Zuordnung zu den in dieser Studie verwendeten Energieträger dar.

Tabelle 31: Zuordnung der Energieträger zur Berechnung der Substitutionsfaktoren nach der Standard International Energy Product Classification (SIEC)

Energieträger in Anlehnung an der Emissionsbilanz	Energieträger in Anlehnung an SIEC
Heizöl/Diesel	O4000XBIO, O4610, O4630, O4652XR5210B, O4651, O4661XR5230B, O4669, O4671XR5220B, O4680, O4694, O4699
Erdgas	C0350, C0371, C0379, G3000
Steinkohle	C0110, C0129
Braunkohle	C0220, C0320, C0311, C0330
Strom	E7000
Fernwärme	H8000, W6100, W6220

Die Eurostat Energiebilanz bietet im Vergleich zur Energiebilanz der AGEB ein differenzierteres Datengerüst auf Branchen- und Energieträgerebene (vgl. Anhang A.2.1). Insbesondere ist im Bereich der GHD die Landwirtschaft gesondert ausgewiesen. Andere Branchen, wie beispielsweise die Bauwirtschaft, sind in der Eurostat-Energiebilanz der Industrie zugeordnet, während in der deutschen Energiebilanz nach AGEB diese Branche dem GHD zugeordnet ist.

Tabelle 32: Zuordnung der Sektoren und Branchen und Anwendungen nach den Zeilen der Eurostat Energiebilanz (nrg_bal_c)

Sektor	Branche	Zeilen der Eurostat Energiebilanz
Industrie	Holzverarbeitende Industrie	FC_IND_WP_E
	Chemie	FC_IND_CPC_E
	Papier	FC_IND_PPP_E
	Zement, Glas und Keramik	FC_IND_NMM_E
	Sonstige Industrie	FC_IND_MAC_E, FC_IND_NSP_E, FC_IND_FBT_E, FC_IND_IS_E, FC_IND_TE_E, FC_IND_NFM_E, FC_IND_MQ_E, FC_IND_TL_E
GHD	Landwirtschaft & Gartenbau	FC_OTH_AF_E
	Sonstiger GHD	FC_IND_CON_E, FC_OTH_FISH_E, FC_OTH_NSP_E

2.3.3.2 Prognos Industrie- und GHD-Datenmodell

Das Industriemodell der Prognos²⁷ ist ein deterministisches Bottom-up-Modell zur Berechnung von Endenergieverbrauch und THG-Emissionen der Industrie nach insgesamt 35 Branchen (bzw. Gruppen oder Produkte), 27 Anwendungen (hier unter anderem Raum- und Prozesswärme), 48 Energieträgern und 7 Treibhausgasen in Jahresschritten von 1990 bis 2050. Das Modell ist ein langfristiges Prognosemodell und kein Konjunkturmodell. Das bedeutet, dass kurzfristige Verbrauchsschwankungen weder für die Vergangenheit nachgebildet noch für die Zukunft generiert werden. Allerdings geht diese Konjunktur in die Kalibration des Industriemodells auf die Vergangenheit mit ein. Die Datengrundlage des Industriemodells speist sich weitestgehend aus öffentlichen Datenquellen. Die wichtigsten genutzten Datenquellen sind Produktionsindizes, Produktionsmengen und Bruttowertschöpfung des Statistischen Bundesamtes, die detaillierte Energiestatistik und Satellitenbilanz der AG Energiebilanzen sowie die detaillierte Anwendungsstruktur des Endenergieverbrauchs nach Branche und Energieträger des UBA. Die Daten der verschiedenen Quellen werden aufbereitet, miteinander verknüpft, auf Plausibilität und Konsistenz überprüft und schließlich auf das Datenraster {Jahr × Branche × Anwendung × Energieträger} übertragen. Hierfür wird, wo nötig, die Dimensionalität der Eingangsdaten erhöht, indem die wahrscheinlichste Verbrauchsstruktur auf die noch unbestimmten Verbrauchergruppen übertragen wird.

Bei dem verwendeten GHD-Modell handelt es sich um ein deterministisches Simulationsmodell für die Entwicklung des Endenergieverbrauchs in den Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Landwirtschaft. Es handelt sich um ein Bottom-up-Modell, in dem die Entwicklung der anwendungsspezifischen Energieträgerverbräuche der modellierten Sektorbranchen auf Basis verschiedener Einflussgrößen fortgeschrieben werden. Die wichtigsten genutzten Datenquellen sind die Erhebungen von IfE und Fraunhofer ISI zum Energieverbrauch, die Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen und die Energiestatistik der AG Energiebilanzen.

Der GHD-Sektor wird hierbei in 16 Branchen aufgeteilt. Das Modell bestimmt die Veränderungen des Branchenenergieverbrauchs gegenüber dem Vorjahr unter Berücksichtigung der Veränderung der klimatischen Bedingungen sowie der technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungen. Die wirtschaftliche Entwicklung wird anhand der Bruttowertschöpfung und Erwerbstätigenzahlen quantifiziert, während die Entwicklung der Anlagenstruktur und -effizienz sowie die Entwicklung der Gebäudeeffizienz wichtige technologische Einflussgrößen darstellen.

Die Prognos-Datenmodelle werden zur Segmentierung des Energieverbrauchs nach Anwendung herangezogen. Als Anwendungen werden zum einen Raumwärme/Warmwasser sowie Prozesswärme betrachtet.

2.3.3.3 Zwischenfazit Datenquellen

Als Basis der folgenden Berechnungen werden in Abstimmung mit dem Auftraggeber Daten der Eurostat verwendet. Diese amtliche Statistik ermöglicht eine Differenzierung insbesondere der Branchen „Holzverarbeitende Industrie“ und „Landwirtschaft und Gartenbau“, die ein ausgeprägtes Profil bei der Nutzung der erneuerbaren Wärme aufweisen.

Die Differenzierung nach Anwendung erfolgt auf Basis des Prognos Industrie- und GHD-Modells.

²⁷ Die Modellbeschreibung wurde im Wesentlichen aus Kemmler et al. (2021), Seite 393f, übernommen.

2.3.4 Ableiten der Substitutionsfaktoren

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse stellen die Substitutionsfaktoren für die verschiedenen Energieträger separat dar.

2.3.4.1 Feste Biomasse

Tabelle 33 stellt die vorgeschlagenen Substitutionsfaktoren für Raumwärme-Anwendungen dar. Der Anteil für Heizöl ist – vermutlich aufgrund des Pauschalfaktoren-Ansatzes mit proportionaler Reduktion aller fossilen Energieträger – geringer als in der aktuellen Emissionsbilanz.

Tabelle 33: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Feste Biomasse GHD – Zentralheizung

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
aktuelle Substitutionsfaktoren	65 %	20 %	2 %	3 %	10 %	0 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren	23 %	59 %	1 %	0 %	9 %	9 %

Tabelle 34 stellt die vorgeschlagenen Substitutionsfaktoren der festen Biomasse für Raum- und Prozesswärme-Anwendungen in der Industrie dar. Im Vergleich zu den aktuellen Emissionsbilanzwerten fällt der niedrigere Anteil insbesondere der Braunkohle auf. Ein weiterer Unterschied ist die Verdrängung von Strom, die in der Vorgängeruntersuchung als unplausibel eingestuft und daher mit 0 % ausgewiesen wurde. Die neu vorgeschlagenen Werte sind das Ergebnis des Residualmix-Ansatzes.

Tabelle 34: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Feste Biomasse Industrie – Raum- und Prozesswärme

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
aktuelle Substitutionsfaktoren	6 %	55 %	7 %	17 %	0 %	16 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren	5 %	60 %	3 %	2 %	14 %	16 %

2.3.4.2 Flüssige Biomasse

In der Energiebilanz wird der Biodiesel / HVO-Verbrauch in der Landwirtschaft, im Baugewerbe und Militär nicht im Verkehrssektor bilanziert. Diese – das ist ein Ergebnis des Residualmix-Ansatzes – verdrängen fossile Mineralöle.

Tabelle 35: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Biodiesel / HVO im Sektor GHD

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
aktuelle Substitutionsfaktoren	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Außer Biodiesel / HVO wird flüssige Biomasse nur in geringem Umfang (zweistelligen Gigawattstundenbereich) in Industrie und GHD verbraucht. Tabelle 36 stellt die vorgeschlagenen Substitutionsfaktoren dar, wobei der fossile Residualmix angesetzt wurde. Eine Differenzierung zwischen Pflanzenöl und sonstiger flüssige Biomasse ist aufgrund der verwendeten Datenquelle (Eurostat Tab. nrg_bal_c) bei dem gewählten Ansatz nicht möglich.

Tabelle 36: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren flüssige Biomasse einschl. Pflanzenöl – Industrie

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Fernwärme	Strom
Aktuelle Substitutionsfaktoren						
Pflanzenöl	33,1 %	50,0 %	0,4 %	0,9 %	9,6 %	5,3 %
flüssige Biomasse (Industrie)	3,7 %	60,3 %	5,6 %	5,3 %	25,2 %	0,0 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren	5 %	60 %	3 %	2 %	17 %	14 %

2.3.4.3 Gasförmige Biomasse (Biogas und Biomethan, Klärgas, Deponiegas)

Tabelle 37 stellt die vorgeschlagenen Substitutionsfaktoren für gasförmige Biomasse dar. Während in der Emissionsbilanz 2018 nur ein Satz von Substitutionsfaktoren bestimmt wurde, wird unten nach Absprache mit dem Auftraggeber differenziert nach Landwirtschaft & Gartenbau einerseits und Industrie und übrigem GHD andererseits. Es wurde jeweils der fossile Residualmix bestimmt.

Der Einsatz als Prozessenergie wird dominiert durch den Landwirtschaftssubsektor, wo nahezu ausschließlich Mineralöle verdrängt werden.

Anzumerken ist, dass die in der Eurostat-Energiebilanz ausgewiesenen Energieverbräuche im Subsektor Landwirtschaft und Garten in den Jahren 2017 bis 2019 variieren: im Jahr 2017 wird kein Mineralölverbrauch ausgewiesen, im Jahr 2018 kein Erdgasverbrauch. Dies hat Einfluss auf den bestimmten Residualmix.

Eine Differenzierung zwischen Biogas und Biomethan ist mit dem hier verwendeten Ansatz nicht möglich, Eurostat weist beide Energieträger zusammen aus (SIEC R5300).

Tabelle 37: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Gasförmige Biomasse in den Sektoren Industrie und GHD

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
aktuelle Substitutionsfaktoren	56,3 %	42,4 %	1,3 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren, darunter	25 %	58 %	1 %	0 %	8 %	8 %
Industrie -- Raum- und Prozesswärme	8 %	68 %	5 %	3 %	3 %	13 %
GHD gesamt -- Raumwärme	23 %	59 %	1 %	0 %	9 %	9 %

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
Landwirtschaft & Gartenbau -- Prozesswärme	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

2.3.4.4 Biogener Anteil des Siedlungsabfalls

Die Branchenfachgespräche sowie die Eurostat-Energiebilanz deuten darauf hin, dass der biogene Anteil des Siedlungsabfalls nicht (mehr) ausschließlich in der allgemeinen Versorgung, sondern auch in der Industrie, u. a. in der Zement-Industrie, eingesetzt wird. Die vorgeschlagenen Substitutionsfaktoren sind in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Biogener Anteil des Siedlungsabfalls in der Industrie

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Strom	Fernwärme
aktuelle Substitutionsfaktoren	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren	8 %	57 %	4 %	3 %	2 %	25 %

2.3.4.5 Solarthermie und Umgebungswärme

Die beiden folgenden Tabellen stellen die vorgeschlagenen Substitutionsfaktoren für Solarthermie und Wärmepumpen dar. Der Anteil für Heizöl ist – vermutlich aufgrund des Pauschalfaktoren-Ansatzes mit proportionaler Reduktion aller fossilen Energieträger – geringer als in der aktuellen Emissionsbilanz. Insbesondere bei Wärmepumpen ist ein Einsatz im Bereich der Prozesswärme zu beobachten, wo laut Anwendungsbilanz ein von Mineralölen dominierter fossiler Residualmix anzusetzen ist.

Tabelle 39: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Solarthermie – GHD

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
aktuelle Substitutionsfaktoren	44,9 %	50,6 %	0,0 %	0,0 %	2,9 %	1,6 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren	23 %	59 %	1 %	0 %	9 %	9 %

Tabelle 40: Vorgeschlagene Substitutionsfaktoren Umgebungswärme – GHD

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
aktuelle Substitutionsfaktoren	44,9 %	50,6 %	0,0 %	0,0 %	2,9 %	1,6 %
neu ermittelte Substitutionsfaktoren, darunter	37 %	48 %	0 %	0 %	7 %	7 %

	Heizöl/ Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braun- kohle	Strom	Fern- wärme
Raumwärme/ Warmwasser	23 %	59 %	1 %	0 %	9 %	9 %
Prozesswärme	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

2.4 Substitutionsfaktoren allgemeine Versorgung

Erneuerbare Energien in der allgemeinen Versorgung werden vorrangig in Form von Biomasse (fester und gasförmiger), Tiefengeothermie sowie dem biogenen Anteil von Siedlungsabfällen eingesetzt. Die letzten Jahre wurden auch vermehrt Wärmepumpen zur Nutzung von Umgebungsenergie und Freiflächensolarthermieanlagen in Wärmenetze integriert, jedoch ist der Anteil dieser Energieträger an der zentralen Wärmebereitstellung noch sehr gering.

2.4.1 Sektorspezifischen Fragestellungen und Herausforderungen

Im Bereich der allgemeinen Versorgung sind im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens folgende relevante Fragestellungen identifiziert worden:

- ▶ Welche Datenquellen können erschlossen werden, um die Substitutionsfaktoren für die erneuerbaren Energien in der allgemeinen Versorgung differenzierter zu betrachten?
- ▶ Wie können die Wärmemengen in der allgemeinen Versorgung von jenen in den anderen Sektoren abgegrenzt werden?
- ▶ Welche Herausforderungen ergeben sich perspektivisch bei steigenden Anteilen von erneuerbaren Energien?

Die benannten Fragestellungen werden auf Basis einer konsistenten Zusammenführung und Auswertung verschiedener Datenquellen beantwortet. Darüber hinaus werden Empfehlungen für eine Anpassung der Methodik erarbeitet sowie Vorschläge für die aktualisierten Substitutionsfaktoren dargestellt.

2.4.2 Diskussion und Festlegung der Methodik

Seit 2007 ist der Anteil von erneuerbaren Energien in Wärmenetzen sukzessive gestiegen. Der Anteil von erneuerbaren Energieträger in der Fernwärmeerzeugung steigerte sich von 2 % im Jahr 2007 auf rd. 8 % im Jahr 2016 (Statistisches Bundesamt, 2018).

Bisher wurde bei der Ermittlung der vermiedenen Emissionen aus erneuerbaren Energien in der allgemeinen Versorgung angenommen, dass durch den Einsatz von Erneuerbaren der fossile bundesweite Fernwärmemix substituiert wird. Analog zur Vorgehensweise in Haushalten wird in diesem Abschnitt analysiert, welcher Energieträger vor dem Einsatz der erneuerbaren Energien in der allgemeinen Versorgung eingesetzt wurde und durch die Erneuerbaren substituiert wird.

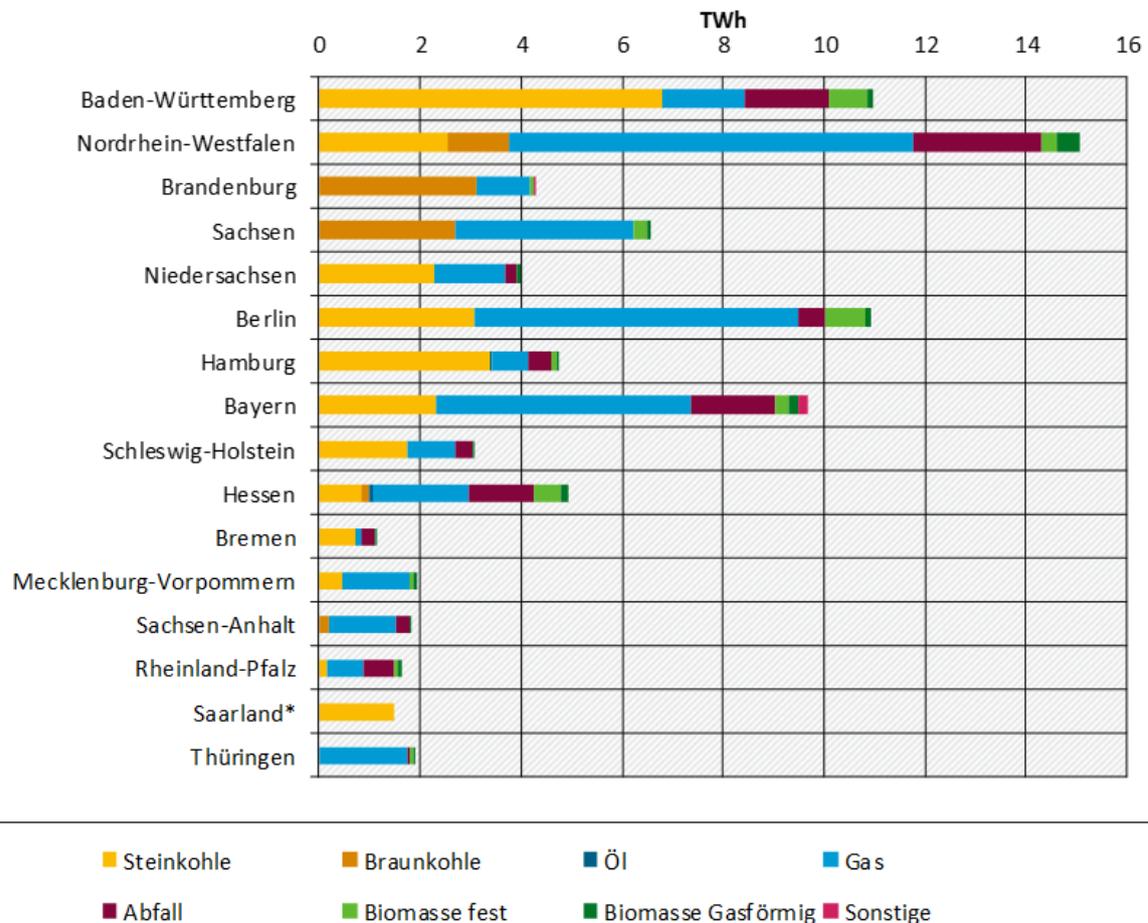
Die erneuerbaren Energien der allgemeinen Versorgung werden jedoch für verschiedene Anwendungsfälle herangezogen: So wurden bzw. werden thermische Abfallbehandlungsanlagen vorrangig in bestehende Wärmenetze integriert, während der Einsatz von Biogas meist dazu führt, dass in ländlichen Gebieten neue (Nah-)Wärmenetze errichtet werden.

Eine detaillierte Betrachtung würde jedoch Kenntnisse darüber erfordern, welcher Anteil von erneuerbaren Energien für die Substitution von Wärmemengen in Bestandswärmenetzen eingesetzt wird, in denen keine Steigerung des Wärmeabsatzes aufgrund von Ausbau und Verdichtung erfolgt, und welcher Anteil von erneuerbaren Energien für die Erweiterung bestehender Netze bzw. die Errichtung neuer Netze eingesetzt wird. Darüber hinaus wäre für eine umfassende Analyse eine zeitlich aufgelöste Einsatzplanung der verschiedenen Energieträger notwendig, um die Substitutionswirkung zu ermitteln (siehe hierzu auch die Vorgehensweise beim Ableiten der Substitutionsfaktoren im Stromsektor in Kunze et al., 2019). Um eine analoge Vorgehensweise zum Stromsektor vornehmen zu können, wären somit zeitlich

aufgelöste Informationen zur Wärmeerzeugung und -absatz auf Netzebene erforderlich, die in dieser Granularität nicht für das gesamte Bundesgebiet verfügbar sind.

Abbildung 15 zeigt, dass die Wärmenetzeinspeisung je Bundesland auf einem sehr unterschiedlichen Energieträgermix basiert. Deswegen wird des Weiteren überprüft, welche Unterschiede sich durch einen bundeslandgewichteten Substitutionsfaktor für die verschiedenen erneuerbaren Energieträger in der allgemeinen Versorgung ergeben.

Abbildung 15: Wärmenetzeinspeisung pro Bundesland nach Energieträgern



Quelle: Eigene Darstellung des ifeu aus Ortner et al. (n.d.) nach AGFW (2019)

2.4.3 Ermittlung der Substitutionsfaktoren und Abgrenzung zu anderen Sektoren

Im Folgenden werden die Substitutionsfaktoren für die verschiedenen erneuerbaren Energieträger entsprechend der Vorgehensweise in der Emissionsbilanzierung abgeleitet und für jeden Energieträger die Abgrenzung zu den anderen Sektoren analysiert, falls in der Emissionsbilanzierung keine Differenzierung erfolgt (Abschnitt 2.4.3.1 bis 2.4.3.5). Des Weiteren wird der Energieträgermix der Fernwärme für das Jahr 2018 ermittelt (Abschnitt 2.4.3.6).

2.4.3.1 Gasförmige Biomasse

Der Endenergieverbrauch gasförmiger Biomasse für die Wärme- und Kälteversorgung steigt seit Jahren kontinuierlich, wobei Biogas dabei den höchsten Anteil stellt, gefolgt von Biomethan. Die Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse für das Jahr 2020 ist in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41: Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse

	2018 [GWh]
Gesamt	18.825
Biogas	13.024
Biomethan	3.191
Klärgas	2.500
Deponiegas	110

Quelle: (AGEE Stat, 2021)

2.4.3.1.1 Biogas

Durch die KWK-Förderung wurden bis 2014 vermehrt Biogasanlagen errichtet, sodass im Jahr 2017 rd. 8.700 Biogasanlagen mit Vor-Ort Verstromung im Einsatz waren (Rensberg et al., 2019). Für die Quantifizierung der Substitutionsfaktoren im Bereich der allgemeinen Versorgung sind Informationen relevant, welcher Anteil der Wärme aus Biogasanlagen in Wärmenetzen genutzt wird und ob die Wärme in Fern- oder Nahwärmenetzen eingespeist wird.

Unterschiedliche Untersuchungen quantifizieren die Wärmenutzung aus Biogasanlagen. Die Wärmenutzung erfolgt vor allem in folgenden Einsatzbereichen:

1. **Trocknung.** Ein Teil der Wärme wird für Trocknungsprozesse verwendet; die Bandbreite in anderen Studien reicht von 29 % (DBFZ 2020) bis 42 % (IEE 2019). Diese Trocknungsprozesse teilen sich auf in unterschiedliche Einsatzbereiche. Die Gärresttrocknung führt zu keiner zusätzlichen Substitution von fossilen Energieträgern, da es ohne Biogasanlagen auch keine Gärreste geben würde. Vielfach wird das Biogas zur Holztrocknung verwendet. Auch hier wird konservativ kein Ersatz von fossilen Energieträgern veranschlagt. Die Alternative ist i. d. R. eine Trocknung mit anderen Abwärmequellen. Die Getreidetrocknung erfolgt gelegentlich mit fossilen Energieträgern, im Sinne einer konservativen Abschätzung werden insgesamt für Trocknungsprozesse keine Substitutionseffekte veranschlagt.
2. Sonstige landwirtschaftliche Nutzung. Hierunter fällt insbesondere die Beheizung von Ställen aber auch weiterer Betriebsgebäude. Auch hier wird konservativ davon ausgegangen, dass diese Ställe ansonsten nicht beheizt worden wären.
3. Biogas-Wärme heizt auch Wohngebäude, Sozialgebäude und weitere Gebäude sowie Werkstatthallen mit entsprechenden Substitutionswirkungen.
4. Der Anteil der Biogaswärme, der abzüglich der Netzverluste in große Fernwärmenetze geht, wird in der Datengrundlage der AGEE Stat mit 14,4 % angegeben.

Als konsistentes Datengerüst werden hier die Zahlen der AGEE Stat herangezogen, die die Verwendung der Wärmemengen in den verschiedenen Endenergieverbrauchssektoren beschreiben (Tabelle 42).

Tabelle 42: Verwendung der Wärmemengen aus Biogasanlagen

	Jahr 2018	
	absolut (GWh)	Anteil
Umwandlungssektor (Nettowärmeerzeugung abzgl. Leitungsverluste i. H. v. 13,8%)	1.873	14,4 %
EEV-Sektoren		
Industrie	421	3,2 %
private Haushalte	2.897	22,2 %
GHD	7.833	60,1 %
davon Landwirtschaft	6.330	48,6 %
darunter Trocknungen	3.777	29,0 %
davon sonstige GHD	1.502	11,5 %
Summe EEV-Sektoren	11.151	85,6 %
Gesamt	13.024	100,0 %

Quelle: AGEE-Stat

Ableiten der Substitutionsfaktoren

Für die Ableitung geeigneter Substitutionsfaktoren wird schrittweise vorgegangen: Für den Anteil der Wärme, der in Trocknungsprozesse fließt, wird in Übereinstimmung mit den o. g. Abwägungen davon ausgegangen, dass keine nennenswerte Substitution erneuerbarer Energieträger erfolgt. Die restliche landwirtschaftlich genutzte Energie wird mit dem Mix aus Tabelle 37 bewertet²⁸.

Die Wärme, die in große Wärmenetze eingespeist wird, wird mangels detailliert zur Verfügung stehender Daten mit dem Fernwärmemix bewertet. Die Wärme für private Haushalte wird gemäß den Analysen der Umweltgutachter zu rund 70 % in Wärmenetze eingespeist und zu 30 % direkt genutzt. Bei dem Wärmenetzanteil werden typische Netzverluste von 14 % berücksichtigt. Diese in der Regel für die Biogasanlage erbauten Wärmenetze substituieren nicht den Fernwärmemix, sondern eher eine ländlich geprägte Beheizungsstruktur, was auch im Falle der direkten Nutzung von Biogas der Fall ist. Als Proxi für diese Substitution werden die Faktoren für feste Biomasse in privaten Haushalten verwendet. Dies wurde auf Basis der Übergangswahrscheinlichkeiten im Sektor Haushalte in Abschnitt 2.2.4.5 hergeleitet.

Die Wärme, die für GHD und Industrie verwendet wird, wird gemäß des bereits in Tabelle 37 abgeleiteten Mixes substituiert, wobei auch hier für 70 % der Wärme eine Wärmenetzverteilung mit Netzverlusten von 14 % unterstellt wird.

²⁸ Der in der Tabelle angeführte Substitutionsmix bezieht sich auf alle gasförmigen Biomassen und wird aufgrund fehlender Datenquellen für Biogas herangezogen.

Der Vorschlag für die Substitutionsfaktoren für den Einsatz von Biogas für die einzelnen Komponenten und Gesamt als Ergebnis der gewichteten Faktoren ist in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Biogas

Substitutionsfaktor	Energie abzügl. Netzverluste [GWh]	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Trocknung	3.777	0					
Sonstige Landwirtschaft	2.553	100					
GHD (ohne Landwirtschaft)	1.355	23	59	1	0	9	9
Industrie	380	7	64	5	3	17	4
Private Haushalte	2.613	68	12	1			19
Fernwärme	1.873					100	
Biogas Gesamt (gewichtet)	12.551	37	11	0,5	0,1	16	5

2.4.3.1.2 Biomethan, Deponie- und Klärgas

Biomethan im Wärmesektor wird in allen Sektoren eingesetzt. Im Jahr 2018 wurden insgesamt 3.191 GWh Biomethan für die Wärmebereitstellung verwendet.

Die Substitutionsbeziehungen der Verwendung von Biomethan unterliegen verschiedenen Verschiebungen. Grundsätzlich erfolgt der Einsatz von Biomethan sowohl in Wärmenetzen wie auch objektbezogen. Durch die Neuregelungen im Gebäudeenergiegesetz wird vermehrt der Einsatz von Biomethan als Erdgas-Substitut angereizt.

Auch Biomethan-befeuerte Blockheizkraftwerke im urbanen Umfeld werden meist als Alternative zu Erdgas-BHKW geplant. Insgesamt erscheint es daher naheliegend, dass Biomethan auf Grund seiner stofflichen Eigenschaften und der Einspeisung in das Erdgasnetz insgesamt Erdgas substituiert.

Auch Klärgas- und Deponiegas-BHKW substituieren in der Regel Erdgas-betriebene BHKW, so dass auch für diese Brennstoffe Erdgas als Substitut angesetzt wird.

Tabelle 44: Verwendung der Wärmemengen aus Biogasmethan

	Jahr 2018	
	absolut (GWh)	Anteil
Umwandlungssektor (Nettowärmeerzeugung abzgl. Leitungsverluste (13,8%))	1.690	53,0 %
EEV-Sektoren		
Industrie	165	5,2 %
private Haushalte	395	12,4 %
GHD	941	29,5 %
davon Landwirtschaft	182	5,7 %
davon sonstige GHD	759	23,8 %
Summe EEV-Sektoren	1.501	47,0 %
Gesamt	3.191	100,0 %

Quelle: AGEB

In Tabelle 45 sind die abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Biomethan, Klärgas und Deponiegas dargestellt.

Tabelle 45: Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Biomethan, Klärgas, Deponiegas

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Alle Anwendungen	0	100	0	0	0	0

2.4.3.2 Feste Biomasse

Feste Biomasse spielt in der allgemeinen Versorgung eine wichtige Rolle, die Nettowärmeerzeugung abzüglich Netzverluste für die allgemeine Versorgung im Jahr 2018 betrug 5.740 GWh (AGEE Stat, 2019) und wird sowohl aus Heizwerken und Heizkraftwerken ausgekoppelt.

Biomasse in Wärmenetzen findet vor allem auch in Bioenergiedörfern Einsatz, in denen mehr als 50 % des Energiebedarfs für Strom- und Wärme aus regional erzeugter Bioenergie stammen muss. Dafür ist der Einsatz von Biomasse – sowohl fester als auch gasförmiger Biomasse – meist unerlässlich. Im Gegensatz zu der Betreiberbefragung von Rensberg et al. (2019) sind den Forschungsnehmer keine Studien bekannt, die eine Aufschlüsselung der Biomassenutzung in Fern- und Nahwärmenetzen zulässt.

Eine Auswertung der bundeslandspezifischen Brennstoffeinsätze aus AGFW (2019), die in Tabelle 46 dargestellt sind, zeigt folgende länderspezifische Unterschiede:

- ▶ Die Rolle der festen Biomasse in der Wärmeversorgung schwankt signifikant zwischen den einzelnen Bundesländern. Im bundesweiten Schnitt fällt 4 % des Brennstoffeinsatzes auf feste Biomasse. In manchen Ländern spielt die feste Biomasse dabei gar keine Rolle (z. B. in Schleswig-Holstein oder Niedersachsen), während in Hessen rd. 11 % des Brennstoffeinsatzes auf die feste Biomasse zurückzuführen ist.
- ▶ Eine Analyse des gesamten Biomasseeinsatzes in Deutschland zeigt, dass rd. 60 % der festen Biomasse in Hessen, Baden-Württemberg und Berlin eingesetzt wird. Weitere 20 % werden in Nordrhein-Westfalen und Bayern in der allgemeinen Versorgung eingesetzt und der Rest verteilt sich auf die übrigen Bundesländer.

Tabelle 46: Brennstoffeinsatz der festen Biomasse in der allgemeinen Versorgung auf Bundesländerebene

Bundesland	Brennstoffeinsatz [TWh]	Rolle von fester Biomasse in Wärmeversorgung im BL [%]	Anteil am bundesweiten Biomasseeinsatz in der zentralen Versorgung [%]
Schleswig-Holstein	4,48	0	0
Hamburg	5,17	2	2
Niedersachsen	7,34	0	0
Bremen	1,56	0	0
Nordrhein-Westfalen	22,51	2	10
Hessen	7,88	11	19
Rheinland-Pfalz	1,88	5	2
Baden-Württemberg	11,19	7	18
Bayern	14,99	3	10
Saarland	1,5	0	0

Bundesland	Brennstoffeinsatz [TWh]	Rolle von fester Biomasse in Wärmeversorgung im BL [%]	Anteil am bundesweiten Biomasseeinsatz in der zentralen Versorgung [%]
Berlin	14,86	7	23
Brandenburg	6,56	1	1
Mecklenburg-Vorpommern	2,97	3	2
Sachsen	10,24	4	9
Sachsen-Anhalt	2,98	0	0
Thüringen	3,40	3	2
Gesamt/Durchschnitt/Gesamt	119,5	4	100

Quelle: Darstellung des ifeu nach AGFW (2019)

Ohne eine Bundesländer-spezifische Betrachtung muss mit Blick auf mangelnde Datenbasis der bundesweite fossile Mix für die Wärmeerzeugung in der allgemeinen Versorgung angesetzt werden, welcher in Tabelle 47 dargestellt ist. Sollten in der Emissionsbilanzierung die Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fossilen Energieträgern für die Fernwärme angepasst werden, empfehlen die Forschungsnehmenden den in Abschnitt 2.4.3.6 abgeleiteten, aktualisierten Fernwärmemix für das Jahr 2018 auf Bundesländerebene.

Tabelle 47: Substitutionsfaktoren für biogenen Anteil des Siedlungsabfalls in Wärmenetzen

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren 2018					100	

2.4.3.3 Biogener Anteil Siedlungsabfall

Rolle von Siedlungsabfall in der allgemeinen Versorgung

Der Endenergieverbrauch aus biogenen Siedlungsabfällen für Wärme und Kälte betrug im Jahr 2018 14.508 GWh (AGEE-Stat, 2020b). Dieser setzt sich aus der Wärmebereitstellung für die allgemeine Versorgung sowie der Wärmeerzeugung in Industrieheizkraftwerken zusammen.

Entsprechend der Energiebilanzen aus Eurostat betrug der Endenergiebedarf aus Siedlungsabfällen in der Industrie 6.039 GWh im Jahr 2018 (Quelle: Eurostat nrg_bal_c).

Um dies mit der Wärmebereitstellung aus Siedlungsabfällen für die allgemeine Versorgung gegenüber zu stellen, wird auf Daten der UBA-Studie von Flamme et al. (2018) und auf Daten des statistischen Bundesamtes zurückgegriffen (StaBuA, 2019; Statistisches Bundesamt, 2019a).

Siedlungsabfälle werden laut Flamme et al. (2018) in Müllverbrennungsanlagen, Ersatzbrennstoffkraftwerken und Biogasanlagen eingesetzt. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Mengen und der gesamten Abfallmengen, die als in den entsprechenden

Anlagen verwertet werden, ergibt sich bei einem angenommenen biogenen Anteil in Höhe von 50 % eine Wärmebereitstellung in Höhe von rd. 8.000 GWh.

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auf Basis der Analyse der Wärmeerzeugung nach Energieträgern des statistischen Bundesamts. Die Nettowärmeerzeugung aus Siedlungsabfällen in der allgemeinen Versorgung betrug 2018 rd. 20.000 GWh, die sich aus rd. 14.000 GWh Wärme aus KWK-Anlagen, rd. 2.500 GWh aus ungekoppelter Erzeugung und aus 3.500 GWh Wärme aus Heizkraftwerken zusammensetzt. Die Nettowärmeerzeugung aus biogenen Siedlungsabfällen unter Annahme eines 50 % biogenen Anteils beträgt demnach rd. 10.000 GWh.

Setzt man die gesamte Wärme, die aus biogenen Abfällen erzeugt wird, als Summe der abgeleiteten Werte von Flamme et al. (2018) bzw. StaBuA (2020) für die allgemeine Versorgung und aus Daten Europäisches Statistisches System (ESS) (2018) für den Einsatz im Sektor Industrie zusammen, ergibt sich eine gesamte Wärmemenge in Höhe von rd. 14.000 GWh (davon 57 % in der zentralen Versorgung) bzw. 16.000 GWh (davon 62 % in der zentralen Versorgung). Vor diesem Hintergrund wird angenommen, dass der biogene Anteil von Biomasse in 60 % der Fälle in der allgemeinen Versorgung eingesetzt wird.

Substitutionsfaktoren

Der Anteil von Abfall als Energieträger im Bereich Fernwärme ist zwischen 2007 und 2017 von 8 % auf 14 % gestiegen (Statistisches Bundesamt, 2018). Entsprechend einer Auswertung in Fritz & Pehnt (2019) koppeln von den rd. 90 thermischen Abfallbehandlungsanlagen bis auf zwei Anlagen bereits alle Wärme aus. Es kann also angenommen werden, dass die Energie aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen vorrangig in Bestandswärmenetze integriert wird und dadurch den bisherigen Mix für die Fernwärmeaufbringung substituiert. Aufgrund fehlender Daten zu den tatsächlichen Standorten, in denen Energie aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen eingesetzt wird und zum Aufbringungsmix einzelner Netze, kann für das Ableiten der Substitutionsfaktoren nur angenommen werden, dass der durchschnittliche Fernwärmemix von Deutschland substituiert wird. Analog zur Vorgehensweise zur Ermittlung der Substitutionsfaktoren von Haushalten und im Bereich GHD/Industrie wird dieser um den Anteil von erneuerbaren Energien in der Fernwärmeaufbringung bereinigt. Die Substitutionsfaktoren sind in Tabelle 48 dargestellt, wobei die Forschungsnehmenden vorschlagen, den aktualisierten Fernwärmeaufbringungsmix aus Abschnitt 2.4.3.6 anzusetzen.

Tabelle 48: Substitutionsfaktoren für biogenen Anteil des Siedlungsabfalls in Wärmenetzen

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Stein- kohle [%]	Braun- kohle [%]	Fern- wärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren 2018					100	

2.4.3.4 Solarthermie und Umgebungswärme

Laut AGEE Stat 2019²⁹ waren im Jahr 2018 19,3 Mio m² Kollektorfläche in Deutschland installiert mit einer Wärmebereitstellung von rd. 8.900 GWh.

Im gleichen Jahr waren rd. 78.000 m² Kollektorfläche in die Fernwärme eingebunden³⁰, was einem Anteil von weniger als 1 % entspricht. Da aufgrund der hohen Potenziale von Freiflächensolarthermie für die zentrale Wärmeversorgung und der Entwicklung eines Bundesweiten Förderprogramms zur Transformation von Wärmenetzen und Förderung von erneuerbaren Anlagen zukünftig mit einem Anstieg der Solarthermieanlagen für die zentrale Wärmeversorgung zu rechnen ist, könnte perspektivisch eine Differenzierung der AGEE Stat Daten angedacht werden. An dieser Stelle wird diese Differenzierung aufgrund fehlender Daten für das Ableiten der Substitutionsfaktoren nicht durchgeführt.

Auch der Anteil von Umgebungswärme in der zentralen Fernwärmeversorgung ist aktuell noch vernachlässigbar. Auch wenn an immer mehr Standorten Wärmepumpen zur Nutzung von Umgebungswärme installiert und erprobt werden, ist deren Anteil an der zentralen Wärmeversorgung noch sehr gering und die erzeugten Wärmemengen werden nicht zentral erfasst.

Aufgrund der Bestrebungen der Dekarbonisierung von Wärmenetzen wird die Bedeutung von Solarthermie und Umgebungswärme in der allgemeinen Versorgung jedoch steigen.

Hier wird perspektivisch eine Berücksichtigung folgender Aspekte bei der Ermittlung der Substitutionsfaktoren notwendig sein:

- ▶ Einsatz von Solarthermie oder Umgebungswärme in Bestandsnetzen: Werden die genannten erneuerbaren Energieträger in Bestandsnetze integriert, muss perspektivisch analysiert werden, welche Energieträger ersetzt werden. Da Solarthermieanlagen vorrangig zur Deckung der Sommerlast eingesetzt werden können³¹, würden dadurch vor allem andere Grundlasterzeuger substituiert werden. In Kombination mit thermischen Abfallbehandlungsanlagen wäre die Substitutionswirkung dann geringer, als sie es durch Ansetzen des durchschnittlichen Substitutionsmix der Bestandsfernwärme wäre.
- ▶ Einsatz von Solarthermie oder Umgebungswärme in neu errichteten (Nah-)Wärmenetzen: Werden neue (Nah-)Wärmenetze errichtet, die vorrangig auf den Einsatz von Solarthermie bzw. Umgebungsenergie setzen, wäre als Substitutionsfaktor der (fossile) Mix des Gebäudebestands anzusetzen, wie dies beispielsweise auch bei der Ermittlung der Faktoren für Gasförmige Biomasse erfolgt ist (siehe auch Abschnitt 2.4.3.1).

Für beide Ansätze fehlt aktuell jedoch die Datenbasis, da die Erhebung der Nettowärmeerzeugung für die allgemeine Versorgung des Statistischen Bundesamtes nur für das gesamte Bundesgebiet erfolgt und keine Differenzierung auf Netzebene durchgeführt wird. Auch liegen die Daten nicht differenziert nach dem Einsatz in Nah- und Fernwärmenetzen³² vor oder ob die Erzeugungsanlagen in bestehenden Netzen oder in neu errichteten Netzen zum

²⁹

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_eeinzahlen_2019_bf.pdf

³⁰ Eigene Recherche auf Basis der Solar District Heating Datenbank, Steinbeis Forschungsinstitut Solites (7/2019)

³¹ In Kombination mit Speichern kann natürlich der Ertrag von Solarthermie auch in übers Jahr gestreckt werden. Realisierungen und Untersuchungen zu zukünftigen Konzepten zeigen jedoch, dass die Anlagen in Kombination mit weiteren Erzeugern einzusetzen sind.

³² Es existiert keine rechtliche Unterscheidung der Begriffe.

Einsatz kommen. Sollen die Substitutionsfaktoren auch perspektivisch auf Basis von quantitativen Erhebungen abgeleitet werden, wäre es aus Sicht der Forschungsnehmenden sinnvoll, auf die Notwendigkeit der differenzierten Datenerhebung hinzuweisen.

2.4.3.5 Tiefengeothermie

Tiefengeothermie wird vor allem in der allgemeinen Versorgung eingesetzt. Im Jahr 2018 betrug der Endenergieverbrauch für Wärme- und Kälte aus Tiefengeothermie 1.308 GWh (AGEE-Stat, 2020b). Auf Basis der Energiebilanzen von Eurostat kann abgeleitet werden, dass 721 GWh Tiefengeothermie in der Industrie und in GHD eingesetzt wurden (Europäisches Statistisches System (ESS), 2018)).

Bei der bisherigen Ermittlung der Substitutionsfaktoren für Tiefengeothermie wurde angenommen, dass durch Geothermie zu 100 % fossile Fernwärme substituiert wird. Da keine statistischen Daten zum Einsatz der Wärmequelle vorliegen, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens für die Standorte geothermischen Heizwerke bzw. Heizkraftwerke auf Basis von Recherchen ausgewählter Netze abgeschätzt, ob das zugehörige Wärmenetz bereits vor der Errichtung der Geothermieanlagen betrieben wurde oder ob das Errichten der Geothermieanlage den Ausschlag für den Bau des Wärmenetzes gab. Laut Angaben des tiefengeothermischen Informationssystems wird Fernwärme in 37 Anlagen als Haupt- oder Nebennutzung ausgekoppelt (Geotis, 2021). Bei einem Großteil der Anlagen (22 Anlagen) sind die Forschungsnehmer auf Basis der erhaltenen Informationen zu dem Schluss gekommen, dass das zugehörige Wärmenetz aufgrund der Erschließung der Wärmequelle errichtet wurde (z. B. Ismaning in Bayer (Bine Informationsdienst, 2012)). Bei 11 Anlagen war bereits vor der Erschließung der Tiefengeothermie ein Wärmenetz vorhanden (z. B. Prenzlau in Brandenburg oder Freiham in Bayern, das u. a. in das Wärmenetz in München eingespeist wird). Bezieht man die Ergebnisse auf die in GeotIS angegebene Jahresproduktion für die Fernwärme der einzelnen Netze zeigt sich, dass 32 % der Wärme in Bestandsnetze eingespeist wird und 68 % der Wärme in neue Wärmenetze eingespeist wird, die zur Erschließung der Wärmequelle errichtet wurden. Die Substitutionsfaktoren für Tiefengeothermie werden deswegen wie folgt abgeleitet:

- ▶ Tiefengeothermie in Bestands-Wärmenetzen: Wird Tiefengeothermie in Bestandswärmenetze integriert, können aufgrund fehlender Daten zum Energieträgermix in diesen Netzen keine Rückschlüsse auf die tatsächlichen Substitutionsfaktoren in diesen Netzen gezogen werden. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen den bundesweiten fossilen Wärmemix als substituierten Mix heranzuziehen
- ▶ Tiefengeothermie in neu errichteten Wärmenetzen: Wenn aufgrund der Erschließung der Wärmequelle ein neues Wärmenetz errichtet wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Mix der dezentralen Energieversorgung ersetzt wird. Analog zur Vorgehensweise bei gasförmiger Biomasse (siehe Abschnitt 2.4.3.1) wird unterstellt, dass in diesem Fall der Energieträgermix von Haushalten und dem Sektor Dienstleistungen/GHD ersetzt wird. Da keine Informationen zu den versorgten Anteilen von GHD und Haushalten von jenen Wärmenetze vorliegen, die Geothermie als primäre Wärmequelle verwenden, wird für das Ableiten der Substitutionsfaktoren die Aufteilung entsprechend der AG Energiebilanz für die sektorale Aufteilung des Endenergieverbrauchs Wärme und Kälte herangezogen: Demnach wurden 2018 rd. 528 TWh Endenergie in Haushalten für die Bereitstellung für Raumwärme und Warmwasser verbraucht und 216 TWh für die Bereitstellung von Prozesswärme sowie Raumwärme und Warmwasser (Steinbach et al., 2020 nach AGEB, 2020;).

Die auf Basis dieser Vorgehensweise abgeleiteten Substitutionsfaktoren sind in Tabelle 49 dargestellt, wobei bei neu errichteten Wärmenetze angenommen wurde, dass in 29 % der Fälle

Gebäude des Sektors GHD/Dienstleistungen und in 71 % Haushalte versorgt werden. In 70 % wird angenommen, dass es sich um neu errichtete Netze handelt, in 30 % wird Geothermie in Bestandsnetze integriert.

Tabelle 49: Überblick der abgeleiteten Substitutionsfaktoren für Tiefengeothermie in Wärmenetzen

Bewertung	Anteil	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Substitutionsfaktoren für Bestandsnetze	30					100	
Substitutionsfaktoren für neu errichtete Netze: Haushalte	50	43,3	51,5	0	0	0	5,0
Substitutionsfaktoren für neu errichtete Netze: GHD/Dienstleistungen	20	38,4	47,2	0,4	0,2	7,0	6,8
Vorschlag für Substitutionsfaktor Tiefengeothermie	100	29,3	35,2	0,1	0,0	31,4	3,9

2.4.3.6 Energieträgermix der Fernwärme 2018

Der Energieträgermix in Netzen der allgemeinen Versorgung im Jahr 2018 auf Basis der Daten des statistischen Bundesamtes ist in Tabelle 50 dargestellt.

Tabelle 50: Nettowärmeerzeugung in Netzen der Allgemeinen Versorgung im Jahr 2018

Energieträger	Energiemenge [GWh]	Anteil [%]
Gase	60.996	46
Steinkohlen und Steinkohlenprodukte	28.271	21
Braunkohlen und Braunkohlenprodukte	7.974	6
Abfall nicht biogen	11.508	9
Abfall biogen	10.010	7
Erneuerbare Energien	10.964	8
Sonstige	2.813	2
Mineralölprodukte	988	1
Summe	133.524	100

Quelle: StaBuA (2019); Statistisches Bundesamt (2019a)

Werden die erneuerbaren Energieträger vernachlässigt, ergibt sich folgender Substitutionsmix für Fernwärme, der in Tabelle 51 dargestellt, wobei der Anteil nicht biogenen Abfalls aus dem Fernwärmemix herausgerechnet wird, da er nicht substituiert werden kann. Es ist darauf zu

achten, dass der nicht biogene Anteil von Siedlungsabfällen in diesem Fall angeführt ist und auf die Darstellung von Strom verzichtet wird, da dazu keine Daten vorliegen, bzw. der Anteil von Strom bei der zentralen Fernwärmeversorgung keine relevante Rolle spielt.

Tabelle 51: Substitutionsfaktoren für Fernwärme

Bewertung	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Abfall nicht biogen [%]
Substitutionsfaktoren Fernwärme	1	62	29	8	-	-

2.5 Zusammenführen der sektoralen Ergebnisse

Da die Substitutionsfaktoren aufgrund der unterschiedlichen Herausforderungen und Datenquellen im vorliegenden Forschungsbericht über sektorale Analysen abgeleitet wurden, folgt die aktuelle Einteilung nicht bei allen Energieträgern der Struktur der Emissionsbilanzierung. Beispielsweise wurden für die feste Biomasse Substitutionsfaktoren für die privaten Haushalte und den Sektor GHD separat ermittelt. In der aktuellen Emissionsbilanzierung sind diese Sektoren zusammengefasst. In Tabelle 52 ist die Zuordnung der in den vorangegangenen Abschnitten hergeleiteten Substitutionsfaktoren zu der jetzigen Klassifizierung der Emissionsbilanz dargestellt. Wird zu einem Eintrag in der Emissionsbilanzierung eine Differenzierung vorgeschlagen (beispielsweise bei Biogas wird vorgeschlagen die Substitutionsfaktoren separat für die allgemeine Versorgung und für die Sektoren GHD und Industrie zu ermitteln), wird eine weitere Zeile angeführt und der vorgeschlagenen Aufteilung bezogen auf die Wärmebereitstellung aus dem entsprechenden Energieträger angeführt.

Tabelle 52: Zuordnung der Energieträger entsprechend der Struktur der aktuellen Emissionsbilanzierung zu den im vorliegenden Forschungsvorhaben ermittelten Substitutionsfaktoren

Energieträger (Technik) in der Emissionsbilanzierung	Vorgeschlagene Differenzierung nach Aktualisierung der Substitutionsfaktoren	Anteil	Zu verwendende Substitutionsfaktoren
Feste Biomasse (private Haushalte und GHD) - Einzelfeuerung	Haushalte	100 %	Tabelle 78 bzw. Tabelle 16
Feste Biomasse (private Haushalte und GHD) - Zentralfeuerung	Haushalte	63 %	Tabelle 27 bzw. Tabelle 9
	GHD	37 %	Tabelle 33
Feste Biomasse (private Haushalte und GHD) - Pellets	Haushalte	100 %	Tabelle 27 bzw. Tabelle 9
Feste Biomasse Industrie	Industrie	100 %	Tabelle 34
Feste Biomasse Allgemeine Versorgung	Allgemeine Versorgung	100 %	Tabelle 47
Flüssige Biomasse einschl. Pflanzenöl (Industrie)	Industrie	100 %	Tabelle 36
Biodiesel / HVO	GHD	100 %	Tabelle 35
Gasförmige Biomasse - Biogas	GHD	30 %	Tabelle 37

Energieträger (Technik) in der Emissionsbilanzierung	Vorgeschlagene Differenzierung nach Aktualisierung der Substitutionsfaktoren	Anteil	Zu verwendende Substitutionsfaktoren
	Land- und Forstwirtschaft	40 %	Tabelle 37
	Allgemeine Versorgung	30 %	Tabelle 43
Gasförmige Biomasse - Biomethan	Haushalte	10 %	Tabelle 22
	Allgemeine Versorgung	90 %	Tabelle 43
Gasförmige Biomasse - Klärgas	Allgemeine Versorgung	100 %	Tabelle 43
Gasförmige Biomasse - Deponiegas	Allgemeine Versorgung	100 %	Tabelle 43
Biogener Anteil Siedlungsabfall	Industrie	40 %	Tabelle 38
	Allgemeine Versorgung	60 %	Tabelle 48
Solarthermie	GHD	8 %	Tabelle 39
	Haushalte	92 %	Tabelle 79 bzw. Tabelle 18
Umgebungswärme	Haushalte	92 %	Tabelle 26 bzw. Tabelle 19
	GHD - RW	6%	Tabelle 40
	GHD - Prozesswärme	2%	Tabelle 40
Tiefengeothermie	Allgemeine Versorgung	100 %	Tabelle 49

3 Nutzungsgrade und Hilfsenergieeinsatz

Im vorliegenden Kapitel werden die bisherigen Annahmen bezüglich der Nutzungsgrade und Hilfsenergieeinsätze analysiert, aktualisiert und dokumentiert. Dabei wird nach den einzelnen Energieträgern und Technologien differenziert.

Der Fokus der Analysen liegt dabei auf der festen Biomasse in privaten Haushalten und im Sektor GHD, auf der Solarthermie, der Umgebungswärme, die sich aus Umweltwärme und oberflächennaher Geothermie zusammensetzt und der Tiefengeothermie. Zusätzlich werden die weiteren fossilen Energieträger im Wärmebereich analysiert, da diese für das Berechnen der eingesparten Emissionen durch den Einsatz von erneuerbaren Energien notwendig sind.

Die Definition der Jahresnutzungsgrade unterscheidet sich für die einzelnen Energieträger. Für feste Biomasse beschreiben die Jahresnutzungsgrade definitionsgemäß das Verhältnis zwischen abgegebener Wärmemenge der Feuerstätte und dafür eingesetzter Brennstoffenergie (heizwertbezogen) für ein (durchschnittliches) Jahr. Bei den ausgewiesenen Nutzungsgraden für Solarthermieanlagen handelt es sich nicht um Nutzungsgrade, die das Verhältnis der auf die Kollektorfläche eingestrahlten Sonnenenergie zu der an das konventionelle System abgegebenen Wärme beschreiben. Die verwendeten Nutzungsgrade stellen das Verhältnis des Solarertrages zu der Wärmemenge dar, die aus dem Speicher entnommen wird. Damit werden bei dem angegebenen Nutzungsgrad die Rohrleitungsverluste zwischen Kollektor und Speicher sowie Speicherverluste explizit berücksichtigt. Bei Wärmepumpen beschreibt der Nutzungsgrad den Anteil der erneuerbar erzeugten Wärme die an das zentrale Speichersystem abgegeben wird.

Als Hilfsenergie wird die (fossile) Energie bezeichnet, die für die Bereitstellung von Wärme zusätzlich zum Hauptenergieträger benötigt wird.

3.1 Feste Biomasse (private Haushalte und GHD)

3.1.1 Bisherige Annahmen

Feste Biomasse wird in Deutschland im Bereich der privaten Haushalte und im geringeren Umfang im Bereich der GHD-Gebäude zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Der größere Anteil sind dezentrale Feuerstätten, die insbesondere in privaten Haushalten als zusätzliche Wärmeerzeuger betrieben werden. Es existieren jedoch auch Kessel zur zentralen Beheizung auf Basis von Scheitholz, Holzpellets und Holzhackschnitzel.

Die Basis für die Ermittlung der durch den Holzeinsatz vermiedenen Emissionen stellen der Endenergieverbrauch von fester Biomasse und die Jahresnutzungsgrade der verschiedenen Feuerungsanlagen dar.

Tabelle 53 enthält die bisherigen Basisannahmen für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse aus Lauf et al. (2019). Die bisher verwendeten durchschnittlichen Jahresnutzungsgrade wurden aufbauend auf der Schweizer Teilstatistik Holzenergie (BFE, 2016) abgeleitet.

Tabelle 53: Bisherige Annahmen zu den Jahresnutzungsgraden und dem Eigenstrombedarf für die Emissionsbilanzierung im Kontext der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse

Energieträger/Technik	Durchschnittlicher Jahresnutzungsgrad [%]	Eigenstrombedarf [%]
Brennholz Einzelfeuerung	50,0	0

Energieträger/Technik	Durchschnittlicher Jahresnutzungsgrad [%]	Eigenstrombedarf [%]
Brennholz Kessel	70,0	1,5
Briketts Einzelfeuerung	50,0	0
Briketts Kessel	70,0	1,5
Holzhackschnitzel Einzelfeuerung	50,0	0
Holzhackschnitzel Kessel klein (< 50 kW)	70,0	1,5
Holzhackschnitzel Kessel groß (>50 kW)	80,0	2,5
Pellets Einzelfeuerung	80,0	2,0
Pellets Kessel	85,0	2,5

Quelle: Lauf et al. (2019)

Die bisherigen Annahmen gehen von durchschnittlichen Jahresnutzungsgraden aus. Für die Einzelfeuerstätten, bei denen Brennholz bzw. Briketts eingesetzt werden, erfolgte bisher keine Differenzierung der Jahresnutzungsgrade in Abhängigkeit der Art der Feuerstätte (z. B. Kachelofen, Kaminofen usw.).

3.1.2 Analyse der verfügbaren Daten zu Einzelfeuerstätten

Obwohl das Grundprinzip bei allen hier betrachteten Einzelfeuerungen gleich ist – es wird ein erneuerbarer Brennstoff in einem Heizgerät direkt im Raum verbrannt und die entstehende Wärme zur Beheizung des Raumes genutzt – unterscheiden sich die technischen Details der Einzelfeuerungen erheblich. Unterschiede gibt es beispielsweise bezüglich

- ▶ der Verbrennungsluftzuführung
- ▶ der Gestaltung des Brennraumes
- ▶ der Zuführung des Brennstoffs (manuell, automatisch)
- ▶ der Nutzung von Speicherkapazitäten
- ▶ der Abgasabführung
- ▶ der Art der Wärmeabgabe (Strahlung, Konvektion)
- ▶ der Aufstellung bzw. Integration in das Gebäude
- ▶ der Möglichkeiten zur Leistungsregelung
- ▶ des Zeitpunktes der Konstruktion bzw. Installation.

Die technischen Unterschiede führen zu unterschiedlichen feuerungstechnischen Wirkungsgraden und Jahresnutzungsgraden. Wirkungsgrade lassen sich auf Versuchsständen unter genormten Bedingungen grundsätzlich reproduzierbar ermitteln.

Jedoch beeinflusst der Nutzer in der realen Nutzungssituation mit seinem Verhalten den feuerungstechnischen Wirkungsgrad und ebenso den Jahresnutzungsgrad der Heizgeräte, z. B. über die Art, Menge und den Zeitpunkt der Brennstoffzufuhr oder die Regelung der Verbrennungsluftmenge.

Exemplarisch wird dies anhand der folgenden Abbildung 16 zur Effizienz von Kaminöfen bei Prüfstandsmessungen und im Feldtest sichtbar. Vergleichend gegenübergestellt werden dem vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrad bei Volllast zwischen 78 % und 89 % folgende Effizienzkennwerte (Nutzungsgrade) der 13 getesteten Feuerstätten bei unterschiedlichen von der Normprüfung abweichenden Betriebsbedingungen. Es werden folgende Effizienzkennwerte dargestellt:

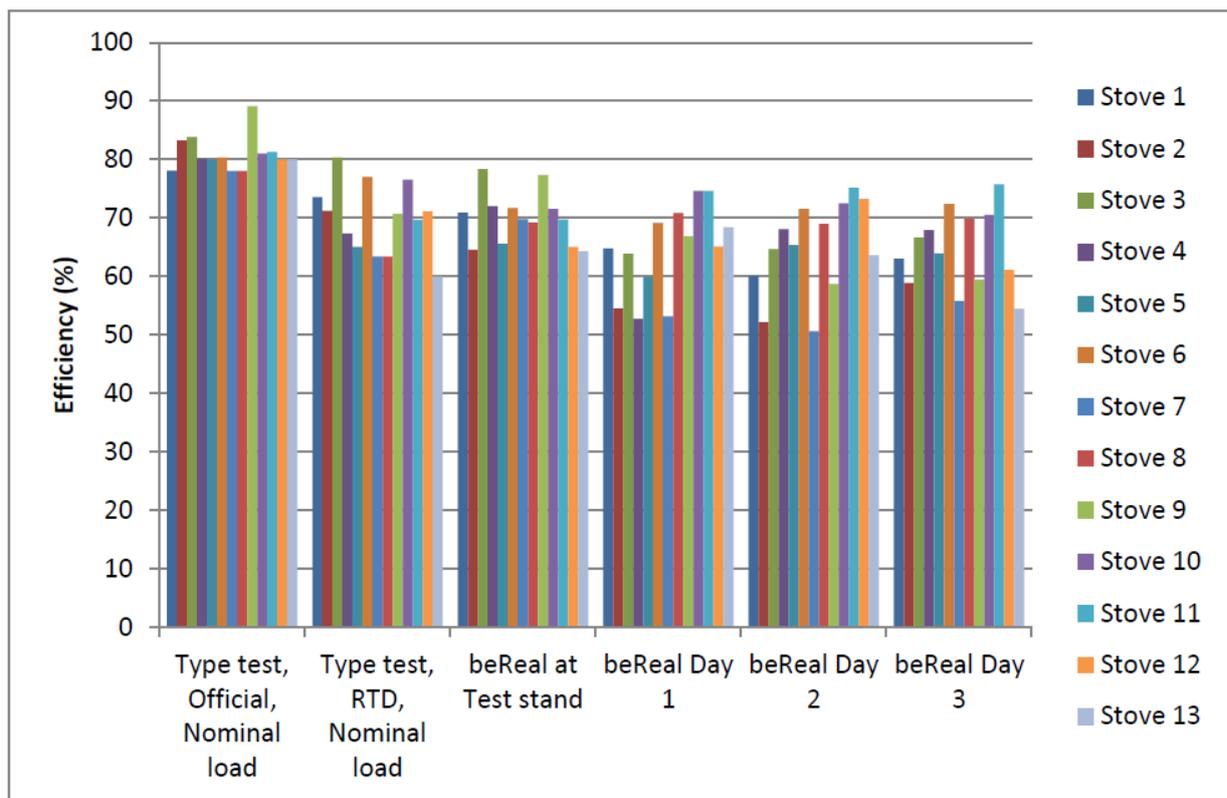
- ▶ Normprüfung bei Volllast nach EN 14785, Herstellerangabe
- ▶ Normprüfung bei Volllast nach EN 14785, Prüfstandsmessungen der RTD-Projektpartner
- ▶ beReal Methode, Labortest der RTD-Partner
- ▶ beReal Day 1: Feuerung durch Nutzer mit üblichem Brennstoff ca. 52 % bis 74 %
- ▶ beReal Day 2: Feuerung durch Nutzer gemäß ausgehändigter Anleitung mit üblichem Brennstoff ca. 50 % bis 74 %
- ▶ beReal Day 3: Feuerung durch Nutzer nach Instruktionen des Teams mit Testbrennstoff ca. 53 % bis 74 %

bei einer Testzeit im Feld von 7 h incl. Zündung, einer Nennlast > 3 h und einer Teillast > 2 h.

Der Durchschnitt der Wirkungsgrade beträgt für die amtliche Typprüfung 81 % (Herstellerangabe), gegenüber 70 % für die Typprüfung durch die RTD-Partner auf dem Prüfstand. Bei den Feldtests unter Berücksichtigung eines realen Nutzerverhaltens liegt der gemessene Nutzungsgrad im Durchschnitt bei 65 %. Offensichtlich gibt es Differenzen zwischen den Herstellerangaben zum Wirkungsgrad und dem im Projekt unter gleichen genormten Randbedingungen gemessenen Wirkungsgrad. Außerdem hat das reale Nutzungsverhalten einen sichtbaren Einfluss auf den Nutzungsgrad.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Nutzungsgrad über den Testzeitraum nicht mit dem Jahresnutzungsgrad übereinstimmt, da für diesen ein komplettes Jahr gemessen werden müsste.

Abbildung 16: Effizienz von Kaminöfen - Prüfstand und Feldtest



Quelle: M. Rönnbäck (2016)

Die Kennwerte der getesteten Geräte sind in Tabelle 54 dargestellt. Eine Aussage darüber, ob die getesteten Geräte repräsentativ für den Gesamtmarkt sind, wird in der Originalquelle nicht getroffen.

Tabelle 54: Kennwerte der getesteten Kaminöfen

Kaminofen, Nr.	Baujahr	Nennleistung, in kW	Raumluftunabhängiger Betrieb	Automatische Luftregulierung
1	2014	6,0	nein	nein
2	2013	8,0	ja	ja
3	2015	9,0	ja	ja
4	2015	5,0	ja	nein
5	2015	9,0	nein	nein
6	2015	4,5	ja	ja
7	2015	8,0	ja	nein
8	2015	8,0	ja	nein

Kaminofen, Nr.	Baujahr	Nennleistung, in kW	Raumluftunabhängiger Betrieb	Automatische Luftregulierung
9	2015	2,0	ja	nein
10	2014	6,0	ja	nein
11	2015	4,5	ja	ja
12	2014	5,0	ja	nein
13	2015	10,0	ja	nein

Quelle: M. Rönnbäck (2016)

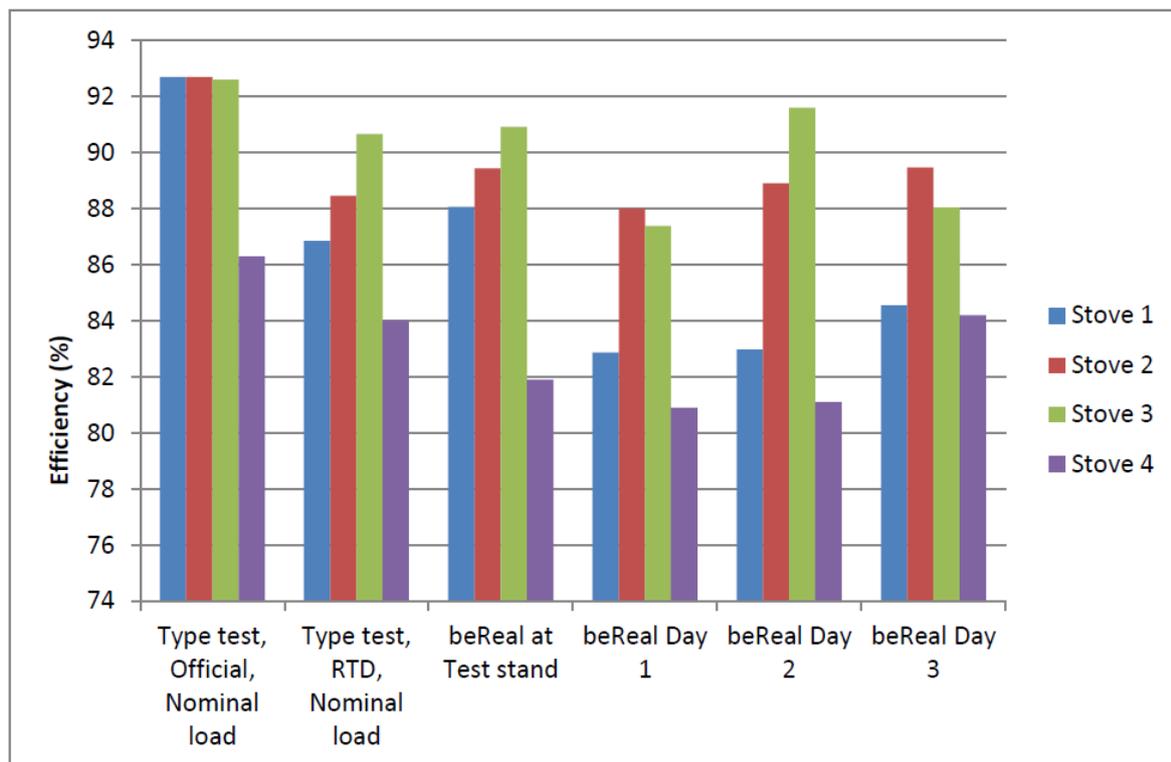
Abbildung 17 zeigt den gleichen Zusammenhang für Pelletöfen.

Den von den Herstellern angegebenen Vollast-Wirkungsgraden von über 86 % bis knapp 93 % stehen folgende Nutzungsgrade im Testzeitraum gegenüber

- ▶ beReal Day 1: Feuerung durch Nutzer mit üblichem Brennstoff ca. 81 % bis 88 %
- ▶ beReal Day 2: Feuerung durch Nutzer mit Testbrennstoff ca. 81 % bis 91,5 %
- ▶ beReal Day 3: Feuerung durch Nutzer nach Instruktionen des Teams mit Testbrennstoff ca. 84 % bis 89,5 %

bei einer Testzeit im Feld: Zündung, stationäre Nennlast, geregelte Teillast (Laständerung von Nennlast auf 50 % Teillast) und stationärer Teillast. Auch hier zeigen sich Unterschiede zwischen Vollast-Wirkungsgrad und Nutzungsgrad im Testzeitraum.

Abbildung 17: Effizienz von Pelletöfen - Prüfstand und Feldtest



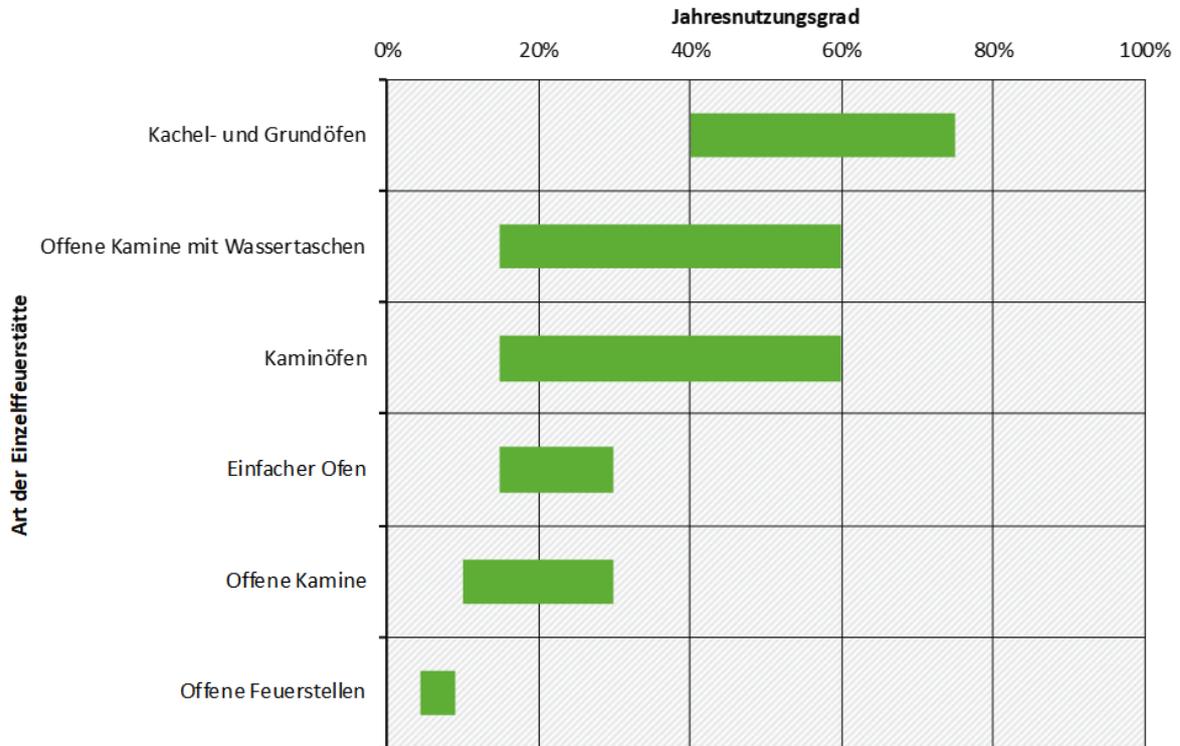
Quelle: (M. Rönnbäck, 2016)

Des Weiteren beeinflussen die technischen Gegebenheiten und Unterschiede das Nutzerverhalten. Ein gut regelbares Heizgerät führt zu einer geringeren Überschreitung der gewünschten Raumtemperatur, dadurch dürfte weniger Anlass zum Ablüften entstehen und ein geringerer Bedienungsaufwand führt zu häufigerer Nutzung, etc. Derartige Zusammenhänge sind bei genormten Prüfstandsmessungen nicht erfassbar.

Die Komplexität der Zusammenhänge sowie der technische und zeitliche Aufwand zur Ermittlung belastbarer Jahresnutzungsgrade bedingen, dass es kaum statistisch abgesicherte belastbare Daten zu den Jahresnutzungsgraden von Einzelfeuerungen gibt.

Die Unsicherheit der Datenlage wird beispielhaft anhand einer Abbildung aus dem Jahr 2014 deutlich. Abbildung 18 zeigt die abgeschätzte Breite der möglichen Jahresnutzungsgrade verschiedener Einzelfeuerstätten auf. Bei Kachel- und Grundöfen können die Jahresnutzungsgrade nach Ansicht der Autoren zwischen 40 % und 75 % variieren, bei Kaminöfen liegt die Bandbreite zwischen 15 % und 60 %, bei offenen Kaminen werden wiederum nur Werte zwischen 10 bis 30 % ausgewiesen (vgl. MULEWF, 08/2014). Auf konstruktive Veränderungen der Geräte und daraus folgende Effizienzverbesserungen in den letzten Jahren oder Jahrzehnten wird in der Studie nicht eingegangen, ebenso wenig auf die Ursachen für die abgegebenen Bandbreiten.

Abbildung 18: Bandbreite der möglichen Jahresnutzungsgraden von Einzelfeuerstätten in Anlehnung an (MULEWF, 08/2014)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (MULEWF, 2014)

Die aus der technischen Weiterentwicklung der Geräte in den letzten 30 Jahren resultierenden Wirkungsgradverbesserungen werden basierend auf konkreten Messdatenbanken für die verfügbaren Daten und Gerätekategorien in den folgenden drei Tabellen (Tabelle 55 bis Tabelle 57) ausgewiesen. Die Daten entstammen der HKI- Datenbank zum Nachweis der Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen an Emissionen häuslicher Feuerstätten für feste Brennstoffe und der Datenbank zum Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen an das HKI-Qualitätszeichen.

Tabelle 55: Entwicklung der Wirkungsgrade im stationären Betrieb für Kaminöfen, nicht hydraulisch angebunden

Brennstoff	Jahre	Mittlerer Wirkungsgrad nach DIN EN 13240
Holz	Bis 1990	Auswertung erst ab 1991 möglich
	1991-2000	78 %
	2001-2010	80 %
	2011-02/2017	81 %

Quelle: HKI im Rahmen des Projektes „Erarbeitung von Beispielberechnungen für zusätzlich zur Zentralheizung vorhandene Einzelfeuerstätten für Holz/Pellets“, ITG Dresden, 2017

Tabelle 56: Entwicklung der Wirkungsgrade im stationären Betrieb – weitere dezentrale Feuerstätten

Jahre	Mittlerer Wirkungsgrad nach DIN EN 13229 Kachelöfen	Mittlerer Wirkungsgrad nach DIN EN 12815 Herde	Mittlerer Wirkungsgrad nach DIN EN 14785 Pelletöfen
Bis 1990	64 %	-	-
1991-2000	77 %	-	-
2001-2010	80 %	80 %	90 %
2011-02/2017	81 %	78 %	90 %

Quelle: HKI im Rahmen des Projektes „Erarbeitung von Beispielberechnungen für zusätzlich zur Zentralheizung vorhandene Einzelfeuerstätten für Holz/Pellets“, ITG Dresden, 2017

Tabelle 57: Entwicklung der Wirkungsgrade im stationären Betrieb – hydraulisch angebundene Feuerstätten

Jahre	Mittlerer Wirkungsgrad nach DIN EN 13240 Kaminöfen, hydr. angebunden	Mittlerer Wirkungsgrad nach DIN EN 14785 Pelletöfen, hydr. angebunden
Bis 1990	-	-
1991-2000	79 %	-
2001-2010	83 %	90 %
2011-02/2017	83 %	94 %

Quelle: HKI im Rahmen des Projektes „Erarbeitung von Beispielberechnungen für zusätzlich zur Zentralheizung vorhandene Einzelfeuerstätten für Holz/Pellets“, ITG Dresden, 2017

Es zeigt sich, dass die Wirkungsgrade verbessert worden sind. Große Verbesserungen wurden bei den Kachelöfen nach 1990 erreicht. Die für Kachelöfen und die anderen dargestellten Feuerstätten ausgewiesenen Wirkungsgradsteigerungen nach 2000 sind geringer. Dies ist vermutlich auf das Erreichen technischer Grenzen und die zunehmende Fokussierung auf anderen Zielgrößen, wie beispielsweise Schadstoffemissionen, zurückzuführen.

Eine vergleichsweise umfassende Zusammenstellung von Jahresnutzungsgraden für unterschiedliche Feuerstätten in Abhängigkeit vom Errichtungsjahr enthält die Schweizerische Holzenergiestatistik Erhebung für das Jahr 2019 von Yves Stettler Basler & Hofmann AG, Zürich im Auftrag des Schweizerischen Bundesamtes für Energie 2019 (BFE, 2020), dargestellt in Tabelle 58.

Tabelle 58: Jahresnutzungsgrade für Einzelfeuerstätten, Auszug aus Schweizerischer Holzenergiestatistik 2019 (BFE, 2020)

Kat.	Anlagenkategorien	1980	1990	2000	2005	2010	2019
1	Offene Cheminées	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
2	Geschlossene Cheminées	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %
3	Cheminéeöfen	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
4a	Zimmeröfen	60 %	70 %	75 %	75 %	75 %	75 %
4b	Pelletsöfen (Wohnbereich)		80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
5	Kachelöfen	65 %	70 %	75 %	75 %	75 %	75 %
6	Holzkochherde	50 %	55 %	60 %	60 %	60 %	60 %
7	Zentralheizungsherde	70 %	70 %	75 %	75 %	75 %	75 %

Die Angaben in der Tabelle beruhen auf Erhebungen (Holzenergiestatistik, Teilprojekt B, anlagenorientierte Erhebungen, Holzenergie Schweiz 1996), Literaturangaben (Bauer, 2003; Hartmann et al, 2003; Merten et al., 2004) und Expertenbefragungen. Es ist jedoch auch hier zu erkennen, dass es wie eingangs geschrieben keine statistisch abgesicherten Daten gibt und es sich somit um „Expertenschätzungen“ der Studienautoren handelt, die mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Weiterhin ist zu erwähnen, dass sich die Anlagenkategorien begrifflich teilweise von den in Deutschland verwendeten Kategorien unterscheiden. Eine unmittelbare Übernahme der Zahlen für Deutschland ohne weitere Anpassungen ist daher nicht möglich.

Hilfsenergieverbrauch

Strombedarf tritt bei Einzelfeuerstätten meist nicht auf. Eine Ausnahme bilden die Pelletöfen, bei denen wie bei den zentralen Feuerstätten ein Hilfsenergieverbrauch zu bilanzieren ist. Gesicherte statistische Daten zum realen Hilfsenergieverbrauch von Pelletöfen liegen nicht vor.

Herstellerangaben zur elektrischen Leistungsaufnahme sind auf die maximale Leistung bezogen. Exemplarisch können hier die Angabe der Firma Wodtke angeführt werden. Die elektrische Leistungsaufnahme wird mit < 50 W bei einer Nennleistung von 6-10 kW der unterschiedlichen Pelletöfen angegeben, in der Zündphase beträgt die Leistung kurzfristig 250 W. Angaben zur elektrischen Leistungsaufnahme bei Teillast und im Stillstand fehlen. Andere Hersteller geben zum Teil gar keine elektrischen Leistungsaufnahmen an.

Die folgende Tabelle enthält eine beispielhafte Berechnung für den Eigenstrombedarf eines Pelletofens. Unter Zugrundelegung der ausgewiesenen Randbedingungen beträgt die auf die Wärmeerzeugung bezogene Hilfsenergie des Pelletofens 1,3 %. Der konkrete Wert des relativen Hilfsenergiebedarfs hängt dabei grundsätzlich von zwei Kategorien ab:

- ▶ den technischen Eigenschaften des Ofens (Wärmeleistung und elektrische Leistungsaufnahme bei Vollast/Teillast/Stillstand)
- ▶ der Nutzung (Betriebszeiten bei Vollast und Teillast, etwaige Abschaltung bei Nichtnutzung)

Der auf die Wärme bezogene Hilfsenergieaufwand ist dabei umso geringer, je länger der Ofen mit möglichst hoher Leistung betrieben wird.

Tabelle 59: Beispielhafte Berechnung der auf die Wärmeerzeugung bezogener Hilfsenergie eines Pelletofens

	Laufzeit, in h	elektrische Leistungsaufnahme, in W	Wärmeleistung, in kW	Stromverbrauch, in kWh	Wärmeerzeugung, in kWh	Hilfsenergie bezogen auf die erzeugte Wärme
Volllast	200	40	8	8	1.600	
Teillast	800	25	3	20	2.400	
Stillstand	7.760	3	0	23	0	
Gesamt	8.760	-	-	51	4.000	1,3%

3.1.3 Vorschlag für die zukünftige Bilanzierung von Einzelfeuerstätten

3.1.3.1 Nutzungsgrade und Hilfsenergieverbrauch

Auf Basis der ausgewerteten Literatur und Datenquellen, der durchgeführten Expertengespräche und der eigenen fachlichen Einschätzung der Forschungsnehmenden werden die in der Tabelle 60 enthaltenen Jahresnutzungsgrade für die zukünftige Bilanzierung von Einzelfeuerungen in Abhängigkeit von der Art der Feuerstätte und vom Errichtungsjahr vorgeschlagen.

Die vorgeschlagenen Jahresnutzungsgrade für offene Kamine resultieren auf einer fachlichen Einschätzung der Forschungsnehmenden. Die restlichen Werte resultieren aus Tabelle 58, wobei die Werte für Kaminöfen und Zimmeröfen aufgrund der schwierigen Unterscheidbarkeit als Mittelwert zusammengefasst werden.

Tabelle 60: Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für die zukünftige Bewertung von Einzelfeuerstätten

Jahr der Errichtung	Kaminöfen und Zimmeröfen	Geschlossene Kamine	Kachelöfen	Herde	Heizungs-herde	offene Kamine	Speicher-einzel-feuerstätten Grundöfen	Pelletöfen
1980	55 %	40 %	65 %	50 %	70 %	25 %	60 %	-
1990	60 %	40 %	70 %	55 %	70 %	25 %	70 %	80 %
2000	62,5 %	40 %	75 %	60 %	75 %	25 %	75 %	80 %
2010	62,5 %	40 %	75 %	60 %	75 %	25 %	75 %	80 %
2020	62,5 %	40 %	75 %	60 %	75 %	25 %	75 %	80 %

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Werte Unsicherheiten beinhalten und nicht statistisch belastbar hergeleitet werden können.

Für den Eigenstrombedarf von Pelletöfen wird der in Tabelle 61 enthaltene Wert vorgeschlagen. Zu Vergleichszwecken wird die bisherige Bewertung ebenfalls dargestellt. Der Prozentwert bezieht sich auf die erzeugte Wärme.

Tabelle 61: Vorgeschlagener Wert für den Eigenstrombedarf bei Pelletöfen

Technik	Eigenstrombedarf, bisher [%]	Eigenstrombedarf, Vorschlag [%]
Pelletöfen	2,0	1,0

3.1.3.2 Substitutionswirkung unter Berücksichtigung des Mehrverbrauchs beim Einsatz von Zusatzheizungen

Einzelfeuerstätten werden i. d. R. als zusätzliche Wärmeerzeuger in Verbindung mit einem primären - meist zentralen - Heizungssystem betrieben. Dabei kommt es durch höhere Raumtemperaturen und weitere Effekte, wie z. B. zusätzlichen Luftwechsel, üblicherweise zu einem höheren Energieverbrauch, als beim alleinigen Betrieb der primären Zentralheizung – siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 2.2.4.2.2.1. Dieser Effekt – die erneuerbare Wärme aus der Zusatzheizung verdrängt nur teilweise fossile Energie der primären Heizung – kann wie dort beschrieben über Substitutionsfaktoren erfasst werden, ein Teil der erneuerbaren Wärme wird dabei mit einer Substitutionswirkung von null bewertet.

Eine alternative Berücksichtigung des auftretenden Mehrverbrauchs könnte über einen Abzug vom Jahresnutzungsgrad erfolgen. Der Vorteil eines derartigen Ansatzes besteht in einer anlagenspezifischen Bewertung. Schwierigkeiten treten allerdings bei einer belastbaren Herleitung des Abzugs auf. Die Effekte (Überheizung, zusätzlicher Luftwechsel) sind praktisch ausschließlich oder ganz überwiegend durch den Nutzer bedingt und entziehen sich damit einer physikalischen Herleitung. Das gilt jedoch ebenso für die Angabe pauschaler Substitutionsfaktoren, auch hier verbleibt eine vergleichsweise große Unsicherheit bei der Festlegung der Werte.

Tabelle 62 enthält einen Vorschlag der Forschungsnehmenden für den Abzug vom Jahresnutzungsgrad, um die durch höhere Raumtemperaturen und sonstige zusätzliche Verluste verminderte Substitutionswirkung zu erfassen. Der Vorschlag basiert auf der fachlichen Einschätzung der Forschungsnehmenden und den Erkenntnissen aus den Analysen zur Mehrverbrauch von Zusatzheizungen aus Abschnitt 2.2.4.2.2.1..

Tabelle 62: Prozentpunkte Abzug vom Jahresnutzungsgrad durch Überheizung und sonstige zusätzlich verursachte Verluste

Jahr der Errichtung	Kaminöfen und Zimmeröfen	Geschlossene Kamine	Kachelöfen	Herde	Heizungs-herde	offene Kamine	Speicher-einzel-feuerstätten /Grundöfen	Pellet-öfen
1980	10 %-Punkte	10 %-Punkte	20 %-Punkte	30 %-Punkte	30 %-Punkte	25 %-Punkte	20 %-Punkte	-
1990	10 %-Punkte	10 %-Punkte	20 %-Punkte	30 %-Punkte	30 %-Punkte	25 %-Punkte	20 %-Punkte	0 %-Punkte

Jahr der Errichtung	Kaminöfen und Zimmeröfen	Ge-schlossene Kamine	Kachelöfen	Herde	Heizungs-herde	offene Kamine	Speicher-einzel-feuerstätten /Grundöfen	Pellet-öfen
2000	10 %-Punkte	10 %-Punkte	20 %-Punkte	30 %-Punkte	30 %-Punkte	25 %-Punkte	20 %-Punkte	0 %-Punkte
2010	10 %-Punkte	10 %-Punkte	20 %-Punkte	30 %-Punkte	30 %-Punkte	25 %-Punkte	20 %-Punkte	0 %-Punkte
2020	10 %-Punkte	10 %-Punkte	20 %-Punkte	30 %-Punkte	30 %-Punkte	25 %-Punkte	20 %-Punkte	0 %-Punkte

Wenn man dem Ansatz eines Abzugs vom Jahresnutzungsgrad zu Berücksichtigung der gesamten Substitutionswirkung folgt, dann ergeben sich die in Tabelle 63 dargestellten Gesamtwertungen der Einzelfeuerstätten.

Tabelle 63: Gesamtbewertung von Einzelfeuerstätten unter Berücksichtigung des Jahresnutzungsgrades und des Abzugs für Überheizung und sonstige zusätzliche Verluste

Jahr der Errichtung	Kaminöfen und Zimmeröfen	Ge-schlossene Kamine	Kachelöfen	Herde	Heizungs-herde	offene Kamine	Speicher-einzel-feuerstätten Grundöfen	Pelletöfen
1980	45 %	30 %	45 %	20 %	40 %	0 %	40 %	-
1990	50 %	30 %	50 %	25 %	40 %	0 %	50 %	-
2000	53 %	30 %	55 %	30 %	45 %	0 %	55 %	80 %
2010	53 %	30 %	55 %	30 %	45 %	0 %	55 %	80 %
2020	53 %	30 %	55 %	30 %	45 %	0 %	55 %	80 %

Sowohl der im Abschnitt 2.2.4.2.1 beschriebene Ansatz zum Mehrverbrauch beim Einsatz von Zusatzheizungen als auch der hier dargestellte Ansatz, sind für die Berechnung der Substitutionswirkung grundsätzlich geeignet und die Ergebnisse bewegen sich aufgrund der Parametrisierung in unterschiedlichen Größenordnungen. Allerdings ergeben sich bei der Anwendung der beiden Ansätze zwangsläufig unterschiedliche Ergebnisse, da dem pauschalen Abminderungsfaktor für alle betrachteten Einzelfeuerstätten hier gerätespezifische Abminderungsfaktoren gegenübergestellt werden. Aufgrund der eingeschränkten Datenbasis und der mit den Erhebungen bzw. Ermittlungen einhergehenden Unsicherheiten sind die beiden Ansätze jedoch nur bedingt vergleichbar.

3.1.4 Analyse der verfügbaren Daten zu Zentralfeuerungen

Nutzungsgrade

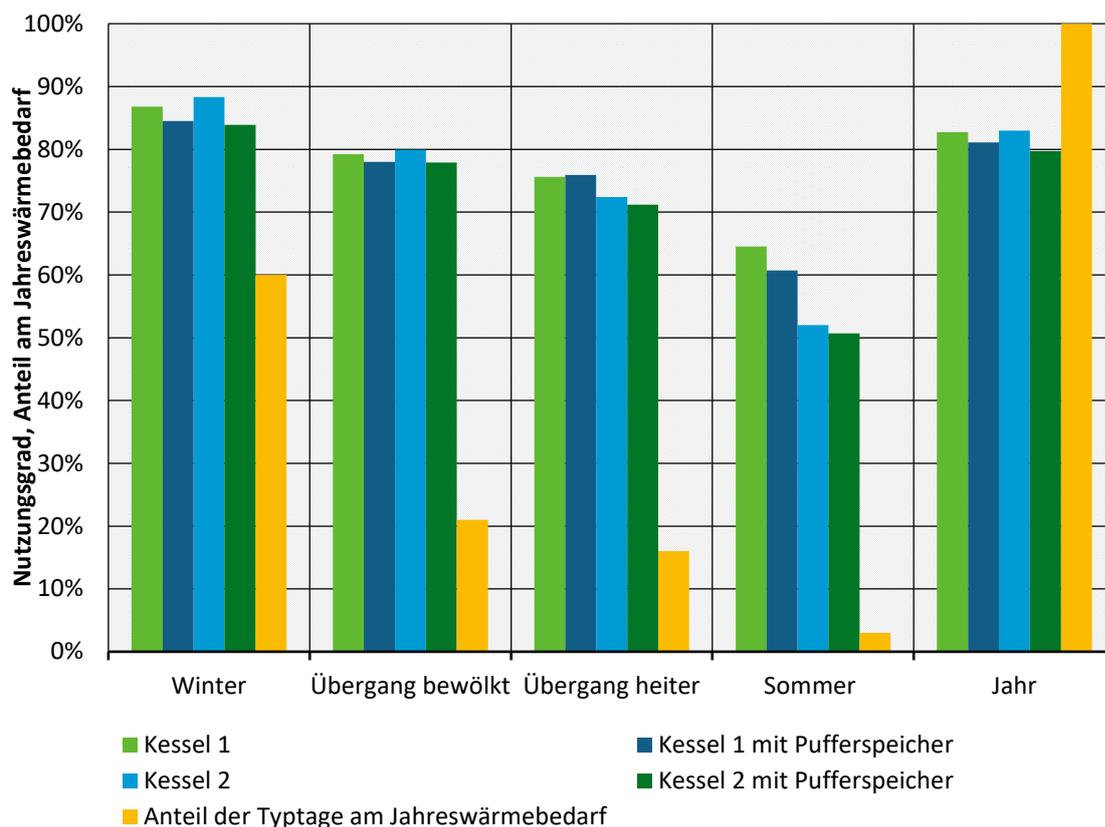
Analog zu den Einzelfeuerstätten liegen im Bereich der kleinen bis mittelgroßen Biomassekessel keine Ergebnisse von repräsentativen Feldtests vor, anhand denen die Nutzungsgrade eindeutig

bestimmt werden könnten. Anders als bei den Einzelfeuerstätten ist insbesondere bei den automatisch beschickten Kesseln der Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Nutzungsgrad viel niedriger.

In der Literatur werden oft, z. B. für Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Nutzungsgrade für Biomassekessel im Bereich zwischen 75 % und 84 % angenommen (vgl. H. Hartmann, 2013, H. Hartmann, 2007). Dabei werden für Scheitholzessel 75 % bis 78 % unterstellt. Die Hackschnitzelkessel werden mit knapp 80 % und für die Pelletkessel werden die Nutzungsgrade zwischen 78 % und 84 % angesetzt.

In ähnlicher Größenordnung liegen die von ZAE Bayern anhand der gemessenen Typtagnutzungsgrade gerechneten Jahresnutzungsgrade für vier Pelletkesselvarianten, vgl. J. Kuckelkorn (2013). Die für die untersuchten Pelletkessel berechneten Jahresnutzungsgrade variieren zwischen rund 80 % und 83 % (vgl. Abbildung 19). Zu beachten ist hier, dass es sich um eine Untersuchung aus dem Jahr 2013 handelt und damit die technologische Entwicklung der letzten Jahre nicht berücksichtigt werden kann.

Abbildung 19: Gemessene Typtagnutzungsgrade und hochgerechnete Jahresnutzungsgrade für zwei Pelletkessel jeweils ohne und mit Pufferspeicher



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an J. Kuckelkorn (2013)

In (BFE, 2020) werden für Biomassekessel die in folgender Tabelle 64 ausgewiesenen Jahresnutzungsgrade in Abhängigkeit des Jahres der Errichtung dargestellt und für Modellrechnungen verwendet. Dabei werden im Folgenden nur die für den Bereich der privaten Haushalte und GHD relevanten Anlagenkategorien betrachtet.

Tabelle 64: Jahresnutzungsgrade für Biomassekessel nach BFE (2020) in Abhängigkeit vom Jahr der Errichtung

Kesselart	1980	1990	2000	2005	2010	2019
Stückholzkessel	60 %	60 %	70 %	70 %	70 %	70 %
Pelletfeuerungen < 50 kW	-	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Pelletfeuerungen 50 - 500 kW	-	-	80 %	83 %	85 %	85 %
sonstige automatische Feuerungen < 50 kW	60 %	60 %	70 %	70 %	70 %	70 %
Sonstige automatische Feuerungen 50 - 500 kW	65 %	75 %	80 %	83 %	85 %	85 %

3.1.5 Vorschlag für zukünftige Bewertung von Zentralfeuerungen

Basierend auf der durchgeführten Datenanalyse und Experteneinschätzung werden für die Zentralfeuerungen die in folgenden drei Tabellen ausgewiesenen Jahresnutzungsgrade in Abhängigkeit des Zeitpunktes der Errichtung und der Nennwärmeleistung vorgeschlagen. Darüber hinaus werden in Tabelle 65 Vorschläge für die Kennwerte zur Bewertung des Eigenstrombedarfs von Zentralfeuerungen ausgewiesen.

Tabelle 65: Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für handbeschickte Feuerungsanlagen, Brennstoff: Scheitholz

Jahr der Errichtung	Nennwärmeleistung in kW		
	≤ 15	> 15 ≤ 50	> 50 ≤ 500
1990	55 %	60 %	60 %
2000	65 %	70 %	70 %
2010	65 %	70 %	70 %
2020	65 %	70 %	70 %

Scheitholz weist aus Sicht der Verbrennung ungünstigere Eigenschaften auf. Beispielsweise kann der Brennraum bei sinkender Geräteleistung nur bedingt verkleinert werden, auch die Leistungsregelung ist im kleinen Leistungsbereich kaum möglich. Dies begründet die im Vergleich mit Pellet- und auch Hackschnitzelkesseln ungünstigeren Nutzungsgraden bei Leistungen < 15 kW.

Tabelle 66: Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für automatisch beschickte Feuerungsanlagen, Brennstoff: Holzpellets

Jahr der Errichtung	Nennwärmeleistung in kW		
	≤ 15	> 15 ≤ 50	> 50 ≤ 500
1990	75 %	75 %	-
2000	80 %	80 %	80 %
2010	80 %	80 %	85 %
2020	80 %	80 %	85 %

Tabelle 67: Vorgeschlagene Jahresnutzungsgrade für automatisch beschickte Feuerungsanlagen, Brennstoff: Hackschnitzel

Jahr der Errichtung	Nennwärmeleistung in kW		
	≤ 15	> 15 ≤ 50	> 50 ≤ 500
1990	70 %	70 %	70 %
2000	75 %	75 %	75 %
2010	75 %	75 %	80 %
2020	75 %	75 %	80 %

Sollten Pellet-Brennwertkessel perspektivisch eine höhere Marktdurchdringung erreichen und den Anlagenbestand an Pelletfeuerungen maßgeblich erweitern, wäre zu überprüfen, ob eine zusätzliche Kategorie „Pellet-Brennwertkessel“ mit einem Jahresnutzungsgrad von 90 % in die Technologiematrix aufgenommen werden sollte.

Die vorgeschlagenen Kennwerte zur Bewertung des Eigenstrombedarfs in Abhängigkeit der Technologie zur Nutzung fester Biomasse stellt Tabelle 68 dar. Dabei werden bis auf die kleineren Hackschnitzelkessel tendenziell niedrigere Werte vorgeschlagen. Bei Hackschnitzelkesseln werden die Verhältnisse umgedreht. Üblicherweise ist der spezifische Hilfsenergieeinsatz bei größeren Anlagen niedriger. Bei den handbeschickten Anlagen wird von einem mittleren Eigenstrombedarf zwischen Heizkesseln mit Gebläsebrenner und Kesseln ohne Gebläse ausgegangen. Die normative Bewertung nach DIN V 18559-5 (09/2018) sieht für den Hilfsenergieeinsatz bei Nutzung fester Biomasse keine Differenzierung hinsichtlich des Baujahrs vor, allerdings wurden die Standardwerte für die Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme von automatisch beschickten Pellet- und Hackschnitzelkessel in der Neuausgabe der DIN V 18559-5 (09/2018) gegenüber der alten Ausgabe von 2011 signifikant abgesenkt. Daher wird für die beiden Kesselarten eine Differenzierung nach Baujahr zusätzlich vorgeschlagen, die technische Entwicklung der vergangenen Jahre in den Kennwerten wiederzugeben. Angesichts fehlender statistisch belastbarer Realdaten basieren die vorgeschlagenen Kennwerte auf den normativen Ansätzen.

Tabelle 68: Vorschlag zum Hilfsenergieeinsatz bei Nutzung fester Biomasse in Zentralfeuerungen

Technik		Eigenstrombedarf, bisher [%]	Eigenstrombedarf, Vorschlag [%]
handbeschickte Feuerungsanlagen (Stückholz)		1,5	1,0
automatisch beschickte Feuerungsanlagen	Holzhackschnitzel bis 2010, < 50kW	1,5	2,5
	Holzhackschnitzel nach 2010, < 50kW	1,5	2,0
	Holzhackschnitzel bis 2010, > 50kW	2,5	2,0
	Holzhackschnitzel nach 2010, > 50kW	2,5	1,5
	Pelletkessel bis 2010	2,5	2,5
	Pelletkessel nach 2010	2,5	1,5

3.2 Solarthermie

3.2.1 Bisherige Annahmen

Tabelle 69 stellt die bisher verwendeten Datensätze für die Wärmebereitstellung aus Solarthermie dar. Die bisherigen Werte für den Nutzungsgrad und den Eigenstrombedarf wurden basierend auf der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94 abgeleitet. Der Eigenstrombedarf einer Solarthermieanlage entspricht dem Hilfsenergieaufwand der Solarpumpe.

Tabelle 69: Basisannahmen der bisher verwendeten Ökobilanz-Datensätze für die Wärmebereitstellung aus Solarthermie

Technik	Thermischer Nutzungsgrad [%]	Eigenstrombedarf [%]	Erzeugungsmix
Flachkollektor	93	2	82,5
Vakuumröhrenkollektor	93	2	15,7
Schwimmbadabsorber	93	2	1,8

3.2.2 Datenanalyse und Vorschlag für die zukünftige Bewertung

Eine Minderung des Nutzungsgrades ($\eta_{th} < 100 \%$) bei Systemen mit Flach- und Vakuumröhrenkollektoren ist bedingt durch die o. g. Verluste zutreffend und der bisher verwendete Wert von 93 % wird als weiterhin plausibel angesehen. Eine Minderung des Nutzungsgrades bei Schwimmbadabsorbern erscheint nicht plausibel. Des Weiteren ist dabei zu beachten, dass Schwimmbadabsorber oft keine Substitutionswirkung haben, da alternativ keine Beheizung stattfindet.

Neuere Messdaten auf Basis von Feldtestmessungen von Solarthermieanlagen liegen gemäß einer Literaturrecherche nicht vor. In Tabelle 70 werden die Angaben zum Eigenstrombedarf für

die drei betrachteten Arten der Solarthermienutzung nach aktueller GEMIS 5.0 angegeben. Dabei bezieht sich der Eigenstrombedarf auf den Solarertrag

Tabelle 70: Angaben aus GEMIS 5.0 für Solarthermie (ab 2010)

Technik	Eigenstrombedarf [%]
Flachkollektor	2,0
Vakuumröhrenkollektor	2,5
Schwimmbadabsorber	2,9

Je nach System zur Solarthermienutzung weist die neue GEMIS-Datenbank GEMIS 5.0 Eigenstrombedarfswerte aus, die zwischen 2,0 % und 2,9 % liegen. Bisher wurde im Rahmen der Emissionsbilanz einheitlich mit 2 % bezogen auf die genutzte Wärme aus Solarthermie gerechnet. Je nach Gebäude- und Anlagengröße, der Nennleistungsaufnahme der Solarpumpe und dem Standort können die Werte in der Praxis jedoch abweichen. Eine Differenzierung des Parameters würde zwar den Detaillierungsgrad erhöhen, hätte jedoch für die vorliegenden Berechnungen keinen realen Vorteil, da eine entsprechende Differenzierung bei der Berechnung des Solarertrages fehlt, so dass weiterhin ein pauschaler Wert für den Hilfsenergiebedarf der Solarpumpe als geeignet angesehen wird.

Gemäß dem Bewertungsverfahren der DIN V 18599-8 (September 2018) kann der Hilfsenergieaufwand der Solarpumpe bei einer fehlenden Auslegungsplanung mit 2,5 % bezogen auf den Energieertrag der Solaranlage berechnet werden. Dieser Wert wird ebenso im Tabellenverfahren für Wohngebäude DIN 18599-12 (April 2017) als durchschnittlicher Hilfsenergieaufwand einer Solarpumpe angegeben.

Basierend auf der normativen Bewertung wird daher für die Flach- und Vakuumröhrenkollektoren ein einheitlicher Wert von 2,5 % bezogen auf den Energieertrag der Solaranlage vorgeschlagen.

Darauf aufbauend werden für die zukünftige Bewertung der Wärmebereitstellung aus Solarthermie die in folgender Tabelle ausgewiesenen Parameter vorgeschlagen.

Tabelle 71: Vorschlag für die zukünftige Bewertung der Wärmebereitstellung aus Solarthermie

Technik	Thermischer Nutzungsgrad [%]	Eigenstrombedarf [%]
Flachkollektor	93	2,5
Vakuumröhrenkollektor	93	2,5
Schwimmbadabsorber	100	2,9

3.3 Umgebungswärme: Umweltwärme und oberflächennahe Geothermie

3.3.1 Bisherige Annahmen

Als Umgebungswärme wird im Sinne der Emissionsbilanz sämtliche mit Wärmepumpen nutzbar gemachte erneuerbare Wärme verstanden. Als Wärmeerzeuger kommen sowohl elektrisch

betriebene Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen sowie Brauchwasserwärmepumpen als auch gasbetriebene Wärmepumpen zum Einsatz.

Tabelle 72 stellt die bisher verwendeten Datensätze für Wärmepumpen dar. Dabei beschreibt der Nutzungsgrad den Anteil der erneuerbar erzeugten Wärme die an das zentrale Speichersystem abgegeben wird. Die Antriebsenergie, die zur Erzeugung der Wärme eingesetzt wird, ergibt sich aus dem in der Tabelle ausgewiesenen „Bedarf Antriebsenergie“ und der erneuerbar erzeugten Wärme. Bei elektrisch betriebenen Wärmepumpen entspricht der Wert „Bedarf Antriebsenergie“ dem Kehrwert der Jahresarbeitszahl. Bei den Gaswärmepumpen handelt es sich bei dem ausgewiesenen Wert von 2 % nur um die elektrische Leistungsaufnahme zur Erschließung der Umweltwärme. Zusätzlich wird die Antriebsenergie in Form von Erdgas berücksichtigt. Der Wärmebereitstellung durch Gaswärmepumpen liegt eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 1,4 zugrunde.

Tabelle 72: Basisannahmen der bisher verwendeten Ökobilanz-Datensätze für Wärmepumpen

Technik	Nutzungsgrad [%]	Bedarf Antriebsenergie [%]	Erzeugungsmix [%]
Elektro-WP-aerothermisch (Luft/Wasser)	100	32	50,6
Elektro-WP-aerothermisch (Brauchwasser)	100	40	1,1
Erdgas-WP alle Wärmequellen	100	Strom: 2 Gas: 72	1,1
Elektro-WP – geothermisch (Sole/Wasser, oberflächennah)	100	26	39,0
Elektro-WP - hydrothermisch (Wasser/Wasser)	100	26	8,2

Quelle: Lauf et al. (2019)

Tabelle 73 stellt die aus dem den bisherigen Berechnungen zugrunde gelegten Bedarf für die elektrische Antriebsenergie berechnete Jahresarbeitszahlen für die betrachteten Wärmepumpen dar. Dabei unterscheiden sich die berechneten Werte für elektrische Wärmepumpen geringfügig von den durchschnittlichen Jahresarbeitszahlen des Wärmepumpenbestandes, die in der Emissionsbilanzierung ausgewiesen werden. Diese entsprechen den vom Internationalen Geothermiezentrum Bochum (GZB) im Rahmen der zweiten Aktualisierung der Studie „Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes“ anhand der zum Zeitpunkt der Analyse vorhandenen Datenbasis abgeschätzten durchschnittlichen Jahresarbeitszahlen des Wärmepumpenbestandes in Deutschland (vgl. (GZB, 2017)).

Tabelle 73: Bisher unterstellte Jahresarbeitszahlen Wärmepumpen

Technik	JAZ als Kehrwert des Bedarfs für die elektrische Antriebsenergie	Ø JAZ des Wärmepumpenbestandes 2018 im Text der Publikation
Elektro-WP-aerothermisch (Luft/Wasser)	3,13	3,0

Technik	JAZ als Kehrwert des Bedarfs für die elektrische Antriebsenergie	Ø JAZ des Wärmepumpenbestandes 2018 im Text der Publikation
Elektro-WP-aerothermisch (Abluft/Wasser)	2,50	-
Elektro-WP-aerothermisch (Brauchwasser)	2,50	3,10
Erdgas-WP alle Wärmequellen	-	1,40
Elektro-WP – geothermisch (Sole/Wasser, oberflächennah)	3,85	3,70
Elektro-WP - hydrothermisch (Wasser/Wasser)	3,85	3,70

Quelle: Lauf et al. (2019)

3.3.2 Analyse der verfügbaren Daten zu elektrisch betriebenen Wärmepumpen (Heizungswärmepumpen)

Die Jahresarbeitszahl im realen Betrieb und damit die Energieaufnahme der Wärmepumpe ist von einer Reihe physikalischen Faktoren abhängig. Dazu zählen insbesondere:

- ▶ Art der Wärmepumpe (u. a. Luft-Wasser, Sole-Wasser, Wasser-Wasser)
- ▶ Systemkonfiguration (Vorrangschaltung der Trinkwassererwärmung vor der Raumheizung oder Kombibetrieb mit gleichzeitiger Trinkwassererwärmung und Raumheizung)
- ▶ Betriebsweise im bivalenten Betrieb (parallel, teilparallel, alternativ)
- ▶ Laufzeiten für Raumheizung, Trinkwassererwärmung und Kombibetrieb
- ▶ Auswirkungen der Schwankung der Quellen- und Senktemperatur auf die Leistung und die Leistungszahl der Wärmepumpe
- ▶ Auswirkungen des Teillastbetriebs (taktend, regelbar) von einstufigen und mehrstufigen sowie stetig geregelten Wärmepumpen auf die Leistung und die Leistungszahl
- ▶ erforderliche Hilfsenergie zum Betrieb der Wärmepumpe, die bei Prüfstandbedingungen nicht berücksichtigt wird

Die realen Jahresarbeitszahlen elektrisch betriebener Wärmepumpen können damit sehr stark variieren, was bereits die Ergebnisse in vielen Untersuchungen zeigen, z. B. Miara et. al. (2010), Miara, et. al. (2011). Für die Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Erdkollektoren wurden im Bestand Arbeitszahlen zwischen 3,0 und 3,4 gemessen. Bei Wärmepumpen mit Erdsonden als Wärmequelle wurden Arbeitszahlen zwischen ca. 2,2 und 4,2 bei Anlagen mit Warmwasserbereitung erreicht. Die mittlere Arbeitszahl lag bei 3,28. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen lagen die Arbeitszahlen zwischen 2,1 und ca. 3,4, die mittlere Arbeitszahl betrug 2,55, vgl. M. Miara et. al. (2010). Im Neubau werden tendenziell höhere Arbeitszahlen erreicht. Entsprechend M. Miara et. al. (2010) wurde für Erdreich-Wärmepumpen eine mittlere Arbeitszahl von 3,88 berechnet, dabei variierten die Arbeitszahlen für die einzelnen Anlagen zwischen 3,1 und 5,1. Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen wurde eine mittlere Arbeitszahl im Betrachtungszeitraum von Juli 2007 bis Juni 2010 von 2,89 ermittelt. Die Arbeitszahlen der

einzelnen Luft/Wasser-Wärmepumpen lagen zwischen 2,3 und 3,4. Bei den drei untersuchten Wasser/Wasser-Wärmepumpen wurde eine mittlere Arbeitszahl von 3,71 berechnet. Insbesondere für Luft/Wasser-Wärmepumpen wird häufig ein bivalenter Betrieb vorgesehen. Die elektrische Leistungsaufnahme eines Elektro-Heizstabes wurde in den oben genannten Arbeitszahlen bereits berücksichtigt.

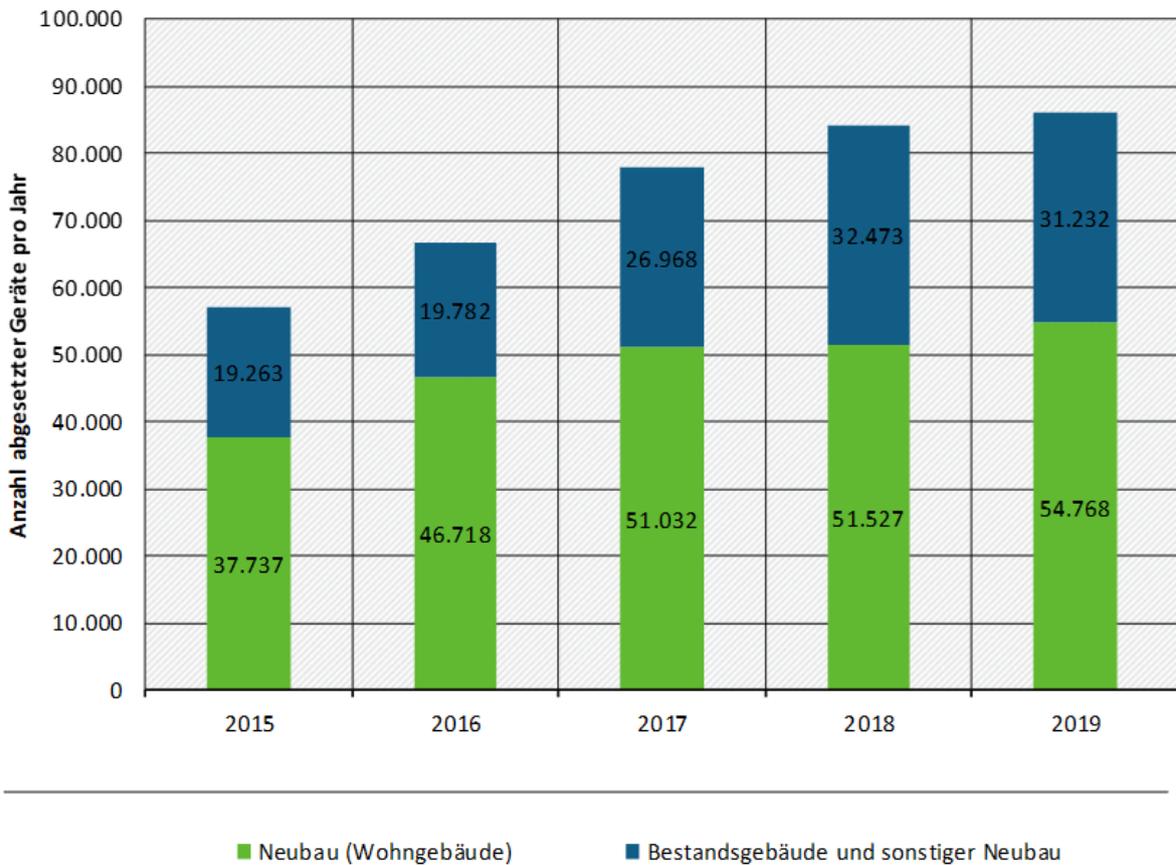
In einer neueren Untersuchung wurden im Zeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 41 Wärmepumpen in sanierten Bestandsgebäuden von Fraunhofer ISE analysiert. Die Außenluft-Wärmepumpen erreichten Jahresarbeitszahlen von 2,5 bis 3,8. Der Mittelwert lag bei 3,1. Bei den 12 analysierten Erdreich-Wärmepumpen wurden Jahresarbeitszahlen zwischen 3,3 und 4,7 gemessen. Die mittlere Jahresarbeitszahl lag bei 4,1, vgl. (Schmelzer 2020). In Tabelle 74 werden die aktuellen Feldtestergebnisse den zuvor beschriebenen Feldtests im Neubau und Bestand gegenübergestellt.

Tabelle 74: Bandbreite der in den o.g. Feldtests erreichten Jahresarbeitszahlen je nach Gebäudezustand mit Angabe des Zeitraums der durchgeführten Feldtests

	Bestand (01/2008 bis 12/2009)	Neubau (07/2007 bis 06/2010)	Sanierter Bestand (07/2018 bis 06/ 2019)
Luft/Wasser-EWP	Ø 2,55 (2,1 bis 3,4)	Ø 2,89 (2,3 bis 3,4)	Ø 3,1 (2,5 bis 3,8)
Sole/Wasser-EWP	Ø 3,28 (2,2 bis 4,2)	Ø 3,88 (3,1 bis 5,1)	Ø 4,1 (3,3 bis 4,7)
Wasser/Wasser-EWP	-	Ø 3,71 (3 Anlagen)	-

Für die Emissionsbilanzierung ist eine Festlegung der Jahresarbeitszahl, die sich an der mittleren Jahresarbeitszahl des Wärmepumpenbestandes orientiert, erforderlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die meisten Wärmepumpen im Neubau sowie energetisch sanierten Bestand installiert werden. Zwischen 60 bis 70 % der in den letzten Jahren abgesetzten Wärmepumpen wurden in neu gebauten Wohngebäuden in Betrieb genommen (siehe Abbildung 20). Damit bilden Jahresarbeitszahlen, die sich eher an den im Neubau bzw. saniertem Bestand erreichbaren Werten orientieren, die durchschnittlichen Jahresarbeitszahlen des Wärmepumpenbestandes in Deutschland besser ab. Diese Einschätzung bestätigt die von AGEE-Stat auf Basis GZB "Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends 2. Aktualisierung" ab 2000 zuletzt aktualisierten durchschnittlichen JAZ des Anlagenbestandes. Demnach liegen die durchschnittlichen JAZ im Jahr 2019 für Luft/Wasser-Wärmepumpe bei 3,01, für Sole/Wasser-Wärmepumpe bei 3,74 und Wasser/Wasser-Wärmepumpe bei JAZ=3,72.

Abbildung 20: Jährliche Absatzzahlen von Wärmepumpen differenziert nach Anzahl im Wohngebäude Neubau und in Bestandsgebäuden sowie sonstigem Neubau (z. B. im GHD-Bereich)



Quelle: Eigene Darstellung ITG in Anlehnung an BWP (2020)

3.3.3 Analyse der verfügbaren Daten zu Brauchwasser-Wärmepumpen

Die Jahresarbeitszahl einer Brauchwasser-Wärmepumpe³³ im realen Betrieb wird maßgeblich durch die Wärmequelle und die erforderliche Speichertemperatur bestimmt. Für Warmwasser-Wärmepumpen mit Außenluft als Wärmequelle werden tendenziell niedrigere Jahresarbeitszahlen als bei Geräten mit Raumluft als Wärmequelle erreicht. Für Warmwasser-Wärmepumpen liegen bisher keine repräsentativen Feldtestergebnisse vor. In DIN V 18599-8 (September 2018) wird als Standardwert eine Leistungszahl von 3,06 für Trinkwarmwasser-Wärmepumpen bei einer Trinkwarmwassertemperatur von 50 °C angegeben. Bei Kellerluft-Trinkwarmwasser-Wärmepumpen beträgt der Standardwert für die Leistungszahl 3,4.

³³ Die Brauchwasser-Wärmepumpen werden in der Praxis oft als Warmwasser-Wärmepumpen bezeichnet. In den meisten Fällen handelt es sich um Kompaktgeräte mit einem integrierten Warmwasserspeicher.

Für unterschiedliche Geräte namhafter Hersteller mit Außenluft als Wärmequelle werden basierend auf dem Berechnungsverfahren der VDI 4650 Blatt 1, (März 2019) je nach Speichertemperatur folgende Jahresarbeitszahlen berechnet:

- ▶ Speichertemperatur 50 °C: 2,77 bis 3,92
- ▶ Speichertemperatur 60 °C: 2,48 bis 3,29

Die durchschnittliche JAZ einer Brauchwasser-Wärmepumpe wird nach AGEE-Stat auf Basis GZB "Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends 2. Aktualisierung" für das Jahr 2017 folgerichtig mit JAZ=3,10 angenommen.

3.3.4 Analyse der verfügbaren Daten zu gasbetriebenen Wärmepumpen

Bei den gasbetriebenen Wärmepumpen wird bisher eine Jahresheizzahl, die thermodynamisch der Jahresarbeitszahl entspricht, in Höhe von 1,4 angenommen. Diese Werte sind mit motorischen Gaswärmepumpen gut erreichbar, da zusätzlich zur Umgebungswärme die im Kühlwasser und in den Abgasen enthaltenen Wärmemengen ausgenutzt werden können. Die bisher im Wärmemarkt installierten Absorptionswärmepumpen erreichen in Abhängigkeit von der Wärmequelle und der Heiznetztemperatur folgende gemäß VDI 4650 Blatt 2 gemessene Werte:

- ▶ Jahresnutzungsgrad für die Raumheizung: 1,36 bis 1,58
- ▶ Jahresheizzahl für die Raumheizung: 1,29 bis 1,48

Dabei werden erwartungsgemäß bei der Wärmequelle Erdreich und einer niedrigen Heiznetztemperaturen höhere Werte erreicht. Die Geräte werden überwiegend in Gebäuden ohne nennenswerten Warmwasserbedarf, z. B. in Bürogebäude oder Schulen eingesetzt.

Im Rahmen der zukünftigen Emissionsbilanzierung wird eine mittlere Leistungszahl für gasbetriebene Wärmepumpen in Höhe von 1,4, die in gleicher Höhe von AGEE-Stat auf Basis GZB "Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends 2. Aktualisierung" ermittelt wurde, weiterhin als zutreffend angesehen, da überwiegend motorische Wärmepumpen mit tendenziell höheren Leistungszahlen und Absorptionswärmepumpen mit Außenluft als Wärmequelle den Bestand an gasbetriebenen Wärmepumpen dominieren³⁴.

Die bisher in der Berechnung angesetzte Hilfsenergie von 2 % bezogen auf die durch gasbetriebene Wärmepumpen erneuerbar erzeugte Wärme wird unter Berücksichtigung der Produktdaten aktuell marktverfügbaren Geräte als weiterhin zutreffend anzusehen. Nach Yanmar beträgt die elektrische Leistungsaufnahme der motorischen Gaswärmepumpen ca. 1,7 bis 1,9 % bezogen auf die Nennleistung der Geräte, bei Absorptionswärmepumpen liegt der Wert zwischen 1,9 und 2,2 % (Robur).

3.3.5 Vorschlag für zukünftige Bewertung von Wärmepumpen

Als Basis für die zukünftige Bewertung für Wärmepumpen wird vorgeschlagen, die von der AGEE-Stat auf Basis des zuvor genannten GZB-Gutachtens ermittelten Jahresarbeitszahlen zu verwenden. Damit wäre die der Emissionsbilanzierung zugrunde gelegten Jahresarbeitszahlen konsistent mit dem Wärmepumpenmodell der AGEE-Stat und mit der GZB Studie und würden

³⁴ Die in der Vergangenheit installierten Adsorptionswärmepumpen erreichen z. T. je nach Wärmequelle und Auslegungstemperatur niedrigere Leistungszahlen, sind jedoch bedingt durch die vergleichsweise niedrigen Stückzahlen für den Gesamtbestand nicht maßgebend.

mit den aus dem Wärmepumpenmodell stammenden als Input für die Emissionsbilanzierung einfließenden Energiemengen korrespondieren. Die resultierenden Parameter für die fünf Technikarten werden in Tabelle 75 ausgewiesen.

Tabelle 75: Vorschlag für die zukünftige Bewertung für Wärmepumpen

Technik		Elektrische Antriebsenergie [%]	JAZ
Elektrisch betriebene Wärmepumpen	Luft/Wasser-Wärmepumpe	33,2	3,01
	Sole/Wasser-Wärmepumpe	26,7	3,74
	Wasser/Wasser-Wärmepumpe	26,9	3,72
	Brauchwasser-Wärmepumpe	32,3	3,10
Gasbetriebene Wärmepumpen		2,0	1,40

3.4 Tiefe Geothermie

Insgesamt waren Ende 2020 rd. 350 MW thermischer Leistung in Geothermie-Heizwerken und Heizkraftwerken installiert, davon rd. 152 MW_{th} in Heizkraftwerken (Geotiss 2020)

Der Hilfsenergieaufwand für tiefe Geothermie-Heizwerke wird in der aktuellen UBA-Emissionsbilanz basierend auf GZB (2017) mit sechs Prozent bezogen auf die Wärme für die Pumpe und sonstige Hilfsenergie angegeben.

Eine statistisch repräsentative Quelle ist auch nach Rücksprache mit dem Bundesverband Geothermie und Recherche von Ökobilanz- und Wirtschaftlichkeitsstudien nicht verfügbar. Mündliche Mitteilungen bestätigen aber die Größenordnung von 6 %. In der Anlage in Pullach beispielsweise wird je MWh Strom eine Thermalwasserförderung von 16,4 MWh bereitgestellt³⁵. 89 % dieses Stromeinsatzes gehen in die Tauchkreiselpumpen samt Trafo, Frequenzumrichter und Kühlsysteme der elektrischen Anlagen, der Rest wird für die Fernwärmenetzpumpen aufgewendet.

Durch eine Reduzierung der Temperaturen des Kundenrücklaufs, Netzerweiterungen, weitere Effizienzsteigerungen wird der Stromeinsatz in Zukunft tendenziell sinken. Auch die Gradtagzahlen haben einen Einfluss auf den Stromeinsatz.

Die 6 % können als Wert also beibehalten werden. Mit zunehmender Realisierung von Anlagen im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken sind zukünftig durch eine Betreiberbefragung weitere Informationen zu erheben.

3.5 Weitere, fossile Energieträger

Neben den Nutzungsgraden für erneuerbare Energieträgern werden auch jene der fossilen Energieträger, die in bestehenden Heizsystemen überwiegend Einsatz finden, zur Berechnung

³⁵ Information im Rahmen eines persönlichen Gesprächs mit Hr. H. Mangold.

der Emissionsbilanz benötigt. Die Werte werden aus dem Haushaltsmodell der Prognos abgeleitet, da es keine amtlichen Daten zu den Nutzungsgraden des Heizungsbestandes gibt. Im bisherigen Mengengerüst der Emissionsbilanz sind Nutzungsgrade aus demselben Modell enthalten, die auf das Jahr 2011 zurückzuführen sind. Im Rahmen dieser Studie werden die Werte in Bezug auf das Jahr 2019 aktualisiert. Darüber hinaus werden diese Werte in den aktuellen energiewirtschaftlichen Projektionen des Klimaschutzprogramms 2030 verwendet (Prognos et al. 2020). Im Haushaltsmodell der Prognos werden die wichtigsten Heizungssysteme über Kohorten abgebildet. Zentrale Eingangsgrößen für die Kohortenmodelle sind die jährlichen Zugänge an neuen Anlagen, der mittlere Nutzungsgrad der Neuanlagen und die Lebensdauer der Anlagen. Angenommen wird eine mittlere Lebensdauer von 25 Jahren. Mit den Kohortenmodellen lassen sich für jedes Jahr der Anlagenbestand und der mittlere Nutzungsgrad ermitteln. Der durchschnittliche Nutzungsgrad eines Wärmeerzeugers hängt vom Wirkungsgrad des Heizkessels und den Verlusten im Zwischenspeicher und des Wärmeverteilsystems ab. Aufgrund der höheren Effizienz neuer Heizungsanlagen steigen die durchschnittlichen Nutzungsgrade mancher Energieträger infolge der Substitution im Zeitverlauf an. Die einzelnen Modellparameter basieren auf Informationen diverser Studien, Expertengesprächen, Unternehmensangaben und eigenen Berechnungen. Eine detaillierte Zuordnung oder Ausweisung der verwendeten Quellen ist nicht möglich. In der folgenden Tabelle 76 sind die bisher verwendeten sowie der Vorschlag für die aktualisierten Nutzungsgrade nach Energieträgern aufgelistet. Als Vereinfachung wird die Warmwasserbereitung nicht berücksichtigt und für Haushalte und GHD die gleichen Werte verwendet. Eine Berücksichtigung der Warmwasserbereitung würde zu geringeren Nutzungsgraden führen.

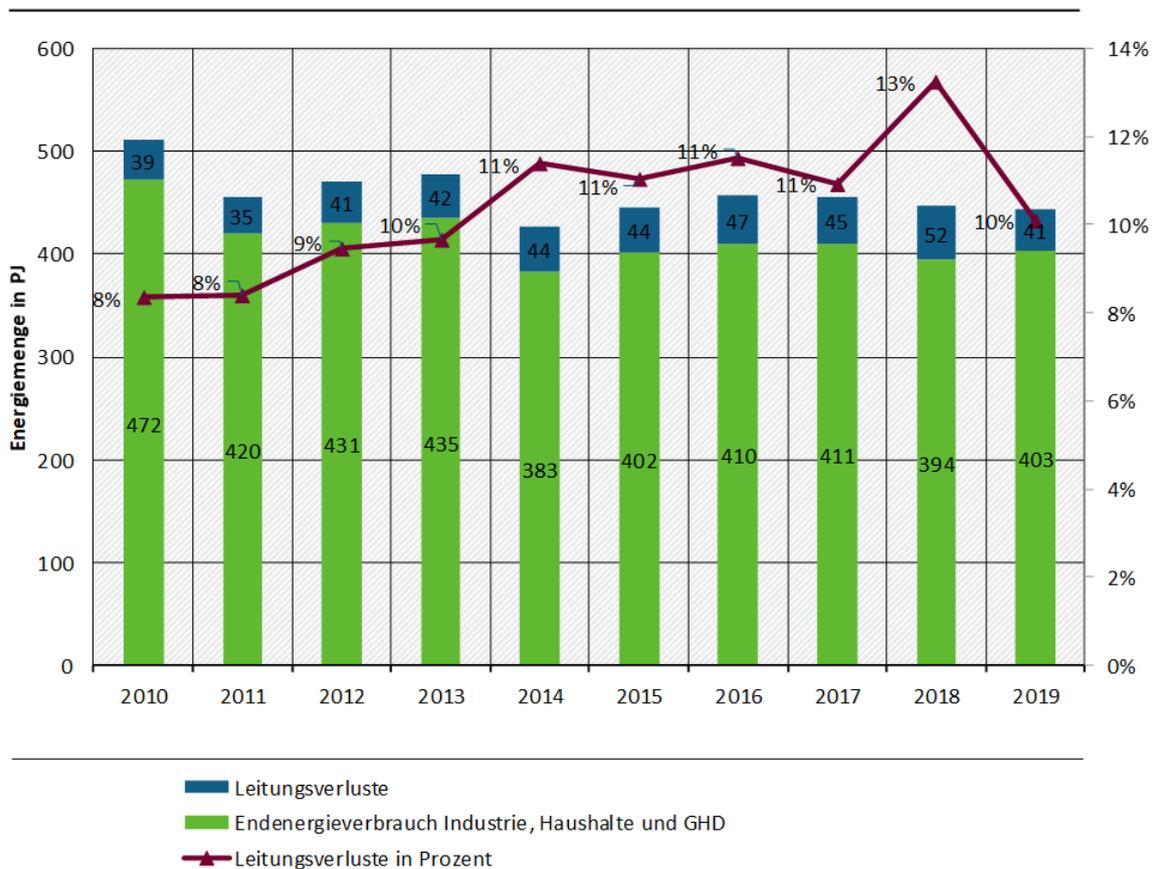
Tabelle 76: Nutzungsgrade der Heizungssysteme zur Erzeugung von Raumwärme auf Basis fossiler Energieträger

Energieträger	Technik	Durchschnittlicher Nutzungsgrad, bisher [%]	Durchschnittlicher Nutzungsgrad, Vorschlag [%]
Heizöl (Haushalte/GHD)	Kessel	83 %	86 %
Erdgas (Haushalte/GHD)	Kessel	88 %	92 %
Steinkohlen (Haushalte/GHD)	Kessel	73 %	74 %
Braunkohle-Brikett (Haushalte/GHD)	Kessel	73 %	74 %
Fernwärme ohne Netzverluste	-	96 %	96 %
Fernwärme mit Netzverluste ³⁶	-	-	85 %
Strom (ohne Wärmepumpen)	-	98 %	98 %

³⁶ Netzverluste der Fernwärme werden nicht mit dem Haushaltsmodell der Prognos berechnet, sondern auf Basis der offiziellen Energiebilanzen (AGEB 2021)

Aufgrund der technologischen Verbesserung der Heizkesseln resultiert für Heizöl und Erdgas ein Anstieg von jeweils 3 % und 4 %-Punkten im Zeitraum 2011 bis 2019. Da im Heizungsbestand so gut wie keine neue Heizungsanlagen auf Basis von Stein- und Braunkohle verbaut werden, verändert sich der Nutzungsgrad dementsprechend kaum. Ein Sonderfall stellt die Fernwärme dar. Allgemein wird ein Wert in Höhe von 96 % unter Berücksichtigung der durch die Hausübergabestation und interne Verteilungsrohre verursachten Wärmeverluste angerechnet. Dieser Anteil verändert sich nicht bzw. wenig über die Zeit. Demgegenüber variieren die Netzverluste der Fernwärme, da diese von unterschiedlichen Faktoren (Trassenlängen, Rücklaufetemperatur, Wärmeübertrager etc.) abhängig sind. Die Schwankung der Netzverluste der letzten 10 Jahre werden in Abbildung 21 auf Basis der Energiebilanzen der AGEB dargestellt (AGEB 2021). Um ein möglichst aktuelles, konsistentes Ergebnis verwenden zu können, wurde hierfür ein Mittelwert der letzten 5 vorhandenen Jahre ermittelt. Letzterer entspricht 11 % und wurde in Tabelle 76 berücksichtigt.

Abbildung 21: Berechnung der Leitungsverluste der Fernwärme auf Basis von (AGEB 2021)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von AG Energiebilanzen

4 Quellenverzeichnis Substitutionsfaktoren

AGEB. (2020). Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken.

AGEB 2020. Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1990-2019. Download [AG Energiebilanzen e.V. | Bilanzen 1990-2019 \(ag-energiebilanzen.de\)](https://www.ag-energiebilanzen.de/) (letzter Zugriff 05.05.2021)

AGEE-Stat. (2020a). Erneuerbare Energien in Deutschland - Daten zur Entwicklung 2019. Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2019> (Letzer Zugriff 07.02.2022)

AGEE-Stat. (2020b). Zeitreihe zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Dezember 2020).

AGEE Stat. (2019). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.

AGEE Stat. (2021). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.

AGFW. (2019). AGFW-Hauptbericht 2018.

BDH. (2018). 10-Jahres-Verlauf Absatz Wärmeerzeuger Deutschland, 2014.

BFE. 2020. Schweizerische Holzenergiestatistik Erhebungsjahr 2019. 2020.

Bine Informationsdienst. (2012). Ismaning setzt auf Geothermie.

Blum, K., Löffert, S., Offermanns, M., & Steffen, P. (2014). Krankenhaus Barometer 2014.

Buttermann, H. G., Baten, T., Engerer, H., Wernicke, I., Nieder, T., & Schmidt, M. (2018). Abbau von Divergenzen zwischen nationaler und internationaler Energiestatistik Projektnummer I C 4 – 37/17.

bwp. 2020. <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/> [Online] 2020.

Cischinsky, H., & Diefenbach, N. (2018). Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Darmstadt.

Diefenbach, N., Cischinsky, H., Rodenfeld, M., & Clausnitzer, K.-D. (2010). Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GmbH. Darmstadt. URL: http://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht_Datenbasis.pdf (letzter Zugriff 07.02.2022)

DIN V 18559-5. 09/2018. Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen . 09/2018.

DIN V 18599-8. September 2018. Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen. September 2018.

Döring, P., Glasenapp, S., & Mantau, U. (2020). Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2018. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Hamburg.

Europäisches Statistisches System (ESS). (2018). Energiebilanzen – Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/energy/data/energy-balances> (letzter Zugriff 07.02.2022)

Flamme, S., Hanewinkel, J., Quicker, P., & Weber, K. (2018). Energieerzeugung aus Abfällen. Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Texte 51/2018. Dessau: UBA. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26_texte_51-2018_energieerzeugung-abfaelle.pdf

Fritz, S., & Pehnt, M. (2019). Der Kohleausstieg und die Auswirkungen auf die betroffenen Wärmenetze. Heidelberg.

Frondel, M., Andor, M., Ritter, N., Sommer, S., Vance, C., Matuschek, P., & Müller, U. (2011). Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2009 - 2010. Wirtschaftsforschung Rheinischwestfälisches Institut. URL: <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/bericht-erhebung-des-energieverbrauchs-private-haushalte-2006-2008,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

Frondel, M., Andor, M., Ritter, N., Tauchmann, H., Vance, C., Matuschek, P., & Müller, U. (2013). Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006-2010, (August), 1-203. URL: <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/bericht-erhebung-des-energieverbrauchs-private-haushalte-2006-2008,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

GEMIS 4.94. s.l. : Globales Emissions-Modell integrierter Systeme

GEMIS 5.0. s.l. : Globales Emissions-Modell integrierter Systeme

Geotis. (2021). Übersicht aller geothermischen Anlagen.

Geotis 2020. Projektliste Tiefe Geothermie. Download [https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Projektliste Tiefe Geothermie 2020 KS.pdf](https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Projektliste_Tiefe_Geothermie_2020_KS.pdf) (letzter Zugriff 20.2.2021)

GZB. 2017. Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends. Bochum : s.n., 2017.

Schmelzer, D. (2019) Feldtest zu Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. HLH. 09/2020.

ifeu, Fraunhofer IEE, & Consentec. (2018). Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung.

Köhrer, M., Hennig, P., Yanev, D., Brodbeck, F., Peter, I., & Otto, M. (2018). Die Zusatzheizung - Nutzung ergänzender Heizsysteme im Gebäudebereich.

Kunze, R., Miehl, H., Anke, C.-P., Dierstein, C., Hinz, F., Ladwig, T., ... Reiter, U. (2019). Projekt SeEiS – Substitutionseffekte erneuerbarer Energien im Stromsektor, 36. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-08-30_climate-change-31-2019_methodenpapier_seeis.pdf (letzter Zugriff 07.02.2022)

Lauf, T., Memmler, M., & Schneider, S. (2019). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018. Climate Change, 37/2019, 156. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf (letzter Zugriff 07.02.2022)

Metzger, S., Jahnke, K., Walikewitz, N., Otto, M., Grondy, A., & Fritz, S. (2019). Wohnen und Sanieren Empirische Wohngebäudedaten seit 2002 Hintergrundbericht, 131. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/hintergrundbericht-wohnen-sanieren> (letzter Zugriff 07.02.2022)

Miara, M., et. al. 2010. Feldmessung Wärmepumpen im Gebäudebestand. 2010.

MULEWF. 08/2014. Effizient Heizen mit Holz und Sonne, Ein Ratgeber zu klima- und umweltbewusstem Handeln. 08/2014.

Ortner, S., Blömer, S., Over, M., Ochse, S., Bohn, K., Rein, M., ... Roth, T. (unveröffentlicht.). Dekarbonisierung dezentrale Energieinfrastrukturen - Entwicklung eines Unterstützungsrahmens am Beispiel von Wärmenetzen. Noch unveröffentlicht.

Pehnt, M., Weiß, U., Fritz, S., Jessing, D., Lempik, J., Mellwig, P., ... Lambrecht, K. (2018). Evaluation des Erneuerbare - Wärme - Gesetz (EWärmeG). Endbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Heidelberg, Berlin, Freiburg, Karlsruhe, Rottenburg.

Kemmler, A., Kirchner, A., Auf der Maur, A., Ess, F., Piegsa, A., Spillmann, T., Straßburg, S., Wunsch, M., Ziegenhagen, I., Schломann, B., Plötz, P., Lutz, C., Becker, L., Fritsche, U.2021. Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 – Gesamtdokumentation der Szenarien, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Februar 2021, ergänzt Mai 2021

Rensberg, N., Daniel-Gromke, J., & Denysenko, V. (2019). Wärmenutzung von Biogasanlagen. DBFZ Report Nr. 32, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, 10, Mai 2019, Online verfügbar unter:
https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_32.pdf
letzter Zugriff: 01.04.2022

Robur. https://www.roburshk.de/waermepumpe/gas_absorptionsluftwaermepumpe_gahp_a [Online]

StaBuA. (2019). Monatserhebung über die Elektrizitäts-und Wärmeerzeugung zur allgemeinen Versorgung. Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt. (2006). Wohnen 2006, Ergebnisse der Wohnungserhebung im Mikrozensus Jahresdurchschnitt 2006. Wien.

Statistisches Bundesamt. (2009). Wohnen 2008, Ergebnisse der Wohnungserhebung im Mikrozensus Jahresdurchschnitt 2008. Wien.

Statistisches Bundesamt. (2016). Mikrozensus-Zusatzerhebung 2014 - Bestand und Struktur der Wohneinheiten; Wohnsituation der Haushalte - Fachserie 5 Heft 1. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. <https://doi.org/10.1007/s001170170196>

Statistisches Bundesamt. (2018). Pressemitteilung Nr. 434 vom 9.November 2018.

Statistisches Bundesamt. (2019a). Jahresherhebung über Erzeugung und Verwendung von Wärme sowie über den Betrieb von Wärmenetzen, 064.

Statistisches Bundesamt. (2019b). Wohnen in Deutschland - Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018.

Statistisches Bundesamt. (2020). Sonderauswertung zu Wohnungen mit Einzel- oder Mehrraumöfen aus den Ergebnissen des Mikrozensus 2018 Zusatzzerhebung Wohnen.

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2018). Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihen ab 1980. 2017. Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2019a). Bauen und Wohnen: Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihe ab 1980.

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2019b). Gebäude und Wohnungen: Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969-2018.

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2020a). Bauen und Wohnen Baugenehmigungen - Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihen ab 1980.

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2020b). Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden. Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden. Lange Reihen ab 1969 - 2019.

Steinbach, J., Henrich, J., Christ, C., Fritz, M., Billerbeck, A., Ortner, S., & Auberger, A. (2020). Umfassende Bewertung des Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kältenutzung für Deutschland (Comprehensive Assessment Heating and Cooling Germany] Gemäß Artikel 14 Absatz 1 und Anhang VIII der Richtlinie 2012/27/EU.

Umweltbundesamt (2022): Umgebungswärme und Wärmepumpen. Weblink: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#umgebungsw%C3%A4rme> Letzter Zugriff am 01.04.2022

VDI 4650 Blatt 1. März 2019. Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen - Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung. März 2019.

Yanmar. <https://www.energysystem-yanmar.com/technologie/luft-wasser-system-hydrobox/> [Online]

Zech, D., Ullrich, S., Wülbeck, H.-F., Stubile, A., Wapler, J., Valenbreder, P., ... Schröder, G. (2019). Evaluation des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2018 - Evaluation des Förderjahres 2018, (November).

18599-12, DIN V. April 2017. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 12: Tabellenverfahren für Wohngebäude. April 2017.

—. 2011. Wärmepumpen Effizienz, Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. 2011.

A Anhang

A.1 Anhang zu den Substitutionsfaktoren in Haushalten

A.1.1 Weitere Datengrundlage

Tabelle 77: Überblick über die verwendete Heizart in fertiggestellten Wohnungen im Zeitverlauf

Jahr	Gesamt	Kohle	Öl	Gas	Strom	Fernwärme	Wärmepumpe*	Solarenergie	Holz**	Biogas und sonstige Biomasse	Sonst.
	Anzahl	Darstellung in %									
2000	220.797	0,2	19,5	73,6	1,4	4,2	0,6	0,1			0,4
2001	177.767	0,2	17,33	74,6	2,0	3,9	1,1	0,2			0,7
2002	164.826	0,2	16,1	73,7	2,4	4,0	2,0	0,3			1,4
2003	158.176	0,2	13,7	75,8	1,8	4,1	2,4	0,3			1,7
2004	170.374	0,2	12,5	76,3	1,5	4,1	3,1	0,3			2,1
2005	145.577	0,2	11,8	75,0	1,5	4,4	4,4	0,3			2,7
2006	146.245	0,2	8,4	73,4	1,3	4,7	8,0	0,4			4,6
2007	120.196	0,2	7,1	66,5	1,3	4,3	13,8	0,5			6,3
2008	94.373	0,2	5,8	63,5	1,4	4,5	18,5	0,5			5,7
2009	82.567	0,2	4,2	56,7	1,3	5,4	25,1	0,8			6,5
2010	84.029		3,2	52,8	1,2	5,2	29,0	0,8			7,8
2011	96.549		2,4	52,6	1,4	6,0	29,3	0,6	4,1	0,4	3,2
2012	100.816		1,9	52,4	1,2	6,7	30,2	0,5	4,8	0,5	1,8
2013	103.331		1,6	50,6	1,1	7,1	32,2	0,6	5,0	0,5	1,3

Jahr	Gesamt	Kohle	Öl	Gas	Strom	Fernwärme	Wärmepumpe*	Solar-energie	Holz**	Biogas und sonstige Biomasse	Sonst.
2014	108.908		1,2	50,7	0,9	7,9	31,8	0,6	5,5	0,5	0,9
2015	105.568		1,1	51,5	0,9	7,8	31,4	0,6	5,5	0,5	0,7
2016	109.990		1,0	52,9	0,9	7,1	31,8	0,5	4,7	0,6	0,5
2017	110.051		1,0	47,4	0,9	7,1	37,2	0,6	4,9	0,6	0,3
2018	107.581		0,9	43,1	1,0	7,4	41,1	0,6	4,9	0,5	0,5
2019	108.071		0,9	41,9	1,2	7,9	42,7	0,6	4,0	0,4	0,4

A.1.2 Dynamisierung der Substitutionsfaktoren

In Tabelle 78 sind die Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Biomasse in der Einzelfeuerung bezogen auf die Anlagenzahl dargestellt. Dabei sind die vorhandenen Datenpunkte (2010 und 2018) hervorgehoben.

Tabelle 78: Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Biomasse in der Einzelfeuerung (Anlagenbezogen)

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	36,3	34,0	0	0	0,6	0
2006	35,7	34,3	0	0	0,8	0
2007	35,2	34,7	0	0	1,0	0
2008	34,7	35,1	0	0	1,1	0
2009	34,1	35,5	0	0	1,3	0
2010	33,4	35,7	0	0	1,5	0,3
2011	32,6	35,8	0	0	1,7	0,8
2012	31,8	36,0	0	0	1,9	1,3
2013	31,0	36,1	0	0	2,0	1,8
2014	30,2	36,3	0	0	2,2	2,3
2015	29,4	36,4	0	0	2,4	2,7

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2016	28,6	36,5	0	0	2,6	3,2
2017	27,8	36,7	0	0	2,7	3,7
2018	27,0	36,8	0	0	2,9	4,2
2019	26,2	36,9	0	0	3,1	4,7

In Tabelle 79 sind die Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Solarthermieranlagen zur Warmwasserbereitung bezogen auf die Anlagenzahl dargestellt. Dabei sind die vorhandenen Datenpunkte (2010 und 2016) hervorgehoben.

Tabelle 79: Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Solarthermieranlagen (Anlagenbezogen)

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	52,8	47,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2006	51,7	48,3	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	50,5	49,5	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	49,4	50,6	0,0	0,0	0,6	0,0
2009	48,2	51,8	0,0	0,0	1,3	0,0
2010	46	51,9	0	0	2,1	0
2011	44,4	52,6	0,0	0,0	2,9	0,2
2012	42,7	53,2	0,0	0,0	3,6	0,5
2013	41,1	53,9	0,0	0,0	4,4	0,7
2014	39,4	54,6	0,0	0,0	5,1	0,9
2015	37,8	55,2	0,0	0,0	5,9	1,2
2016	36,1	55,9	0	0	6,6	1,4
2017	34,5	56,6	0,0	0,0	7,4	1,6
2018	32,8	57,2	0,0	0,0	8,1	1,9
2019	31,2	57,9	0,0	0,0	8,9	2,1

In Tabelle 80 sind die dynamischen Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Wärmepumpen bezogen auf die Anlagenzahl dargestellt. Dabei sind die vorhandenen Datenpunkte (2010 und 2016) hervorgehoben.

Tabelle 80: Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Wärmepumpen (Anlagenbezogen)

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	24,7	63,9	0,9	2,5	8,0	0,0
2006	28,5	61,2	0,8	2,3	7,3	0,0
2007	32,1	57,8	0,8	2,1	6,6	0,8
2008	35,7	54,4	0,7	1,9	5,9	1,6
2009	39,3	51,1	0,6	1,6	5,1	2,4
2010	42,9	47,7	0,5	1,4	4,4	3,2
2011	46,5	44,3	0,4	1,2	3,7	4,0
2012	50,1	41,0	0,3	0,9	2,9	4,8
2013	53,7	37,6	0,3	0,7	2,2	5,6
2014	57,3	34,2	0,2	0,5	1,5	6,4
2015	60,9	30,9	0,1	0,2	0,7	7,2
2016	64,5	27,5	0	0	0	8
2017	67,4	23,9	0,0	0,0	0,0	8,7
2018	70,2	20,3	0,0	0,0	0,0	9,4
2019	73,0	16,9	0,0	0,0	0,0	10,1

Das Ergebnis für die gewichteten Substitutionsfaktoren für Solarthermie und Biomasse (Einzelfeuerung) sind in Tabelle 81 und Tabelle 82 dargestellt.

Tabelle 81: Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Solarthermie unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand in Kombination mit dem Hauptwärmerzeuger eingesetzt werden sowie im Neubau.

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	42,3 %	56,0 %	0,0 %	0,0 %	1,2 %	0,4 %
2006	40,7 %	57,5 %	0,0 %	0,0 %	1,4 %	0,4 %
2007	41,2 %	57,1 %	0,0 %	0,0 %	1,2 %	0,4 %
2008	41,7 %	56,8 %	0,0 %	0,0 %	1,6 %	0,3 %
2009	41,3 %	57,0 %	0,0 %	0,0 %	2,4 %	0,3 %
2010	39,5 %	57,1 %	0,0 %	0,0 %	3,1 %	0,3 %
2011	37,2 %	58,2 %	0,0 %	0,0 %	4,0 %	0,6 %

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2012	35,5 %	58,9 %	0,0 %	0,0 %	4,9 %	0,7 %
2013	35,0 %	58,6 %	0,0 %	0,0 %	5,5 %	0,9 %
2014	33,2 %	59,3 %	0,0 %	0,0 %	6,4 %	1,0 %
2015	32,0 %	59,8 %	0,0 %	0,0 %	6,9 %	1,2 %
2016	30,4 %	60,8 %	0,0 %	0,0 %	7,4 %	1,4 %
2017	29,2 %	61,0 %	0,0 %	0,0 %	8,2 %	1,6 %
2018	28,0 %	61,1 %	0,0 %	0,0 %	9,0 %	1,9 %
2019	26,7 %	61,3 %	0,0 %	0,0 %	9,8 %	2,1 %

Tabelle 82: Gewichtete Substitutionsfaktoren im Zeitverlauf für Biomasse in der Einzelfeuerung unter Berücksichtigung jener Anlagen, die jeweils im Bestand in Kombination mit dem Hauptwärmeerzeuger eingesetzt werden sowie im Neubau.

	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Fernwärme	Strom
2005	32,3 %	41,8 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %	0,3 %
2006	31,4 %	42,5 %	0,0 %	0,0 %	1,5 %	0,2 %
2007	31,6 %	41,5 %	0,0 %	0,0 %	1,6 %	0,2 %
2008	31,7 %	40,5 %	0,0 %	0,0 %	1,7 %	0,2 %
2009	31,4 %	40,1 %	0,0 %	0,0 %	2,0 %	0,2 %
2010	30,8 %	40,3 %	0,0 %	0,0 %	2,1 %	0,5 %
2011	29,6 %	40,9 %	0,0 %	0,0 %	2,5 %	0,9 %
2012	28,7 %	41,1 %	0,0 %	0,0 %	2,8 %	1,3 %
2013	28,3 %	40,6 %	0,0 %	0,0 %	2,9 %	1,8 %
2014	27,4 %	41,0 %	0,0 %	0,0 %	3,3 %	2,2 %
2015	26,7 %	41,0 %	0,0 %	0,0 %	3,4 %	2,6 %
2016	25,9 %	41,5 %	0,0 %	0,0 %	3,5 %	3,0 %
2017	25,2 %	41,4 %	0,0 %	0,0 %	3,7 %	3,5 %
2018	24,6 %	41,2 %	0,0 %	0,0 %	4,0 %	4,0 %
2019	23,9 %	41,1 %	0,0 %	0,0 %	4,2 %	4,5 %

A.2 Anhang zu den Substitutionsfaktoren in GHD und Industrie

A.2.1 Vergleich Eurostat vs. AGEB

Die zwei Energiebilanzsysteme weisen trotz gemeinsamer Basis an Datenquellen und Primärstatistiken sowohl methodische als auch formale Unterschiede auf. Eine Studie zeigte anhand einer empirischen Untersuchung beider Datensätze im Zeitraum 2003-2016, dass der mittlere absolute prozentuale Fehler 0,78 % und 1,97 % jeweils für den Primärenergie- und Endenergieverbrauch beträgt (Buttermann et al., 2018). Dieser Fehler ist im Rahmen dieser Studie akzeptabel, sofern eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse notwendig sei.

Tabelle 83: Unterschied der sektoralen Aufteilung in Eurostat und AGEB basierend auf (Buttermann et al., 2018)

	Eurostat	AGEB
Industrie	Eisen und Stahl (Iron & steel) Chemie und Petrochemie (Chemical & petrochemical) NE-Metalle (Non-ferrous metals) Steine und Erden (Non-metallic minerals) Fahrzeugbau (Transport equipment) Maschinenbau (Machinery) Bergbau u. Gew. Steine u. Erden (Mining & quarrying) Ernährung und Tabak (Food, beverages & tobacco) Papier- und Druckgewerbe (Paper, pulp & printing) Holz und Holzprodukte (Wood & wood products) Bau (Construction) Textil und Leder (Textile & leather) Sonstige Wirtschaftszweige (Not elsewhere specified)	Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau Ernährung und Tabak Papiergewerbe Grundstoffchemie Sonstige chemische Industrie Gummi- u. Kunststoffwaren Glas u. Keramik Verarbeitung v. Steine u. Erden Metallerzeugung NE-Metalle, -gießereien Metallbearbeitung Maschinenbau Fahrzeugbau Sonstige Wirtschaftszweige
GHD	Dienstleistungen (Commercial & public services) Land- und Forstwirtschaft (Agriculture & forestry) Fischerei (Fishing) Sonstige GHD-Bereiche (Not elsewhere specified (other))	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher

Abbildung 22: Vergleich der Energieträgerstrukturen nach Energiebilanz Deutschland und Eurostat (JAQ) (Buttermann et al., 2018)

Energiebilanz Deutschland



Steinkohlen (4 Energieträger)
Steinkohle, Briketts, Koks, Andere Steinkohlenprodukte



Braunkohlen (4 Energieträger)
Rohbraunkohle, Briketts, Andere Braunkohlenprodukte, Hartbraunkohle



Mineralöle (11 Energieträger)
Rohöl, Ottokraftstoffe, Rohbenzin, Flugturbinenkraft., Diesel, Heizöl l., Heizöl s, Petrolkoks, Flüssiggas, Raffineriegas, Andere Mineralölprodukte



Gase (4 Energieträger)
Erdgas, Grubengas, Gicht- u. Konvertergas, Kokerei- u. Stadtgas



Erneuerbare Energien (3 Energieträger)
Wasser-, Windkraft u. Photovoltaik
Biomasse u. erneuerbare Abfälle
Sonstige EE



Elektrischer Strom (3 Energieträger)
Strom, Kernenergie, Fernwärme

JAQ



JAQ Kohle (17 Energieträger)
Anthracite, Bituminous Coal, Coking Coal, Sub-bituminous Coal, Lignite, Patent Fuel, Coke Oven Coke, Gas Coke, Coal Tar, BKB, GasWorks Gas, CokeOven Gas, BlastFurnace Gas, Other Recoverd Gases, Peat, Peat Products, Oil Shale&Oil Sands



JAQ Öl (29 Energieträger)
Crude Oil, NGL, Additives-Oxygenates, Refinery Gas, Ethane, LPG, Naphta,...; Petroleum Coke, Other Products



JAQ Natural Gas (1 Energieträger)
Natural Gas



JAQ Renewables (15 Energieträger sowie Strom und Wärme aus EE)
Geothermal, Solarthermal, Industrial Waste (non-renewable), Municipal Waste (ren), Municipal Waste (non-renewable), Solid Biofuels, Charcoal, Woodpellets, Biogases, Solid Biofuels and Biogases, Biogasoline, Bioethanol, Biodiesel, Bio Jet Kerosene, Other Liquid Biofuels



JAQ Strom u. Fernwärme (2 Energieträger)
Electricity, Heat